การสร้างตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โครงสร้าง UMSM โดยเทคนิคการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก

FABRICATION OF Al/n-Si/Al UMSM PHOTODETECTOR BY ANISOTROPIC SILICON ETCHING TECHNIQUE

ธนกฤต แสงโฮง
THANAKRIT SANGHONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-043-175

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โครงสร้าง UMSM โดยเทคนิคการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก

FABRICATION OF Al/n-Si/Al UMSM PHOTODETECTOR BY ANISOTROPIC SILICON ETCHING TECHNIQUE

T148685

ธนกฤต แสงโฮง

THANAKRIT SANGHONG

เลขหมู่ 148685
เลขทะเบียน
วัน.เดือน.ปี 14 พ.ย. 2560

.b.00265317
.i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-043-175

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FABRICATION OF Al/n-Si/Al UMSM PHOTODETECTOR BY ANISOTROPIC SILICON ETCHING TECHNIQUE

THANAKRIT SANGHONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL-2016-EN-M-043-175

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โครงสร้าง UMSM โดยเทคนิคการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก

Thesis Title Fabrication of Al/n-Si/Al UMSM Photodetector by Anisotropic Silicon Etching Technique

นักศึกษา นายธนกฤต แสงโฮง

รหัสประจำตัว 57601187

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-043-175

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิสุทธิ์	ฐิติรุ่งเรือง	
ผศ.ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
ดร.อัมพร	โพธิ์ใย	
ดร.นรินทร์	อติวงศ์แสงทอง	
รศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 3 ตุลาคม พ.ศ. 2559 เวลา 13.00-15.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 3 ตุลาคม พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึก... ...ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โครงสร้าง UMSM โดยเทคนิคการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก
นักศึกษา	นายธนกฤต แสงโฮง
รหัสนักศึกษา	57601187
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู (U-shaped) หรือ UMSM ด้วยเทคนิคการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก โดยใช้สารละลายเตตระเมทธิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ในการกัดซิลิคอนบริเวณระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้น โดยเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงจากแบบพลานาร์ เป็นแบบร่องรูปตัวยู ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่รับแสงให้กับตัวตรวจวัดแสงโดยที่ไม่จำเป็นต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยคุณสมบัติของสารละลายที่ใช้ในการกัดร่องรูปตัวยูนี้จะทำให้เกิดการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก โดยพื้นที่รับแสงที่เพิ่มขึ้นมีอัตราส่วนระหว่างระนาบ (111)/(100) เป็น 1.7 เท่า หลังจากสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูแล้ว จากนั้นทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า โดยพบว่าลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างร่องรูปตัวยู พื้นผิวของซิลิคอนมีความขรุขระ มีลักษณะเป็นพีระมิดแบบสุ่ม จึงมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเพิ่มความเรียบให้กับพื้นผิวซิลิคอน โดยการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ลงไปในสารละลาย TMAH โดยที่ IPA มีคุณสมบัติเป็นสารลดแรงตึง ซึ่งพบว่าสามารถช่วยลดความขรุขระของพื้นผิวได้ ในส่วนของลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าพบว่ากระแสมืดมีค่าเท่ากับ 34 μA เมื่อให้แรงดันไบอัสเท่ากับ 3 V ส่วนกระแสแสง โดยที่ความเข้มแสง 20,000 lux ที่แรงดันไบอัส 3 V จะมีค่ากระแสแสง 352 μA ซึ่งพบว่ามีกระแสแสงเพิ่มขึ้นเป็น 25 เท่าเมื่อเทียบกับแบบพลานาร์ที่สร้างขึ้น และเมื่อทำการศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน พบว่ามีค่าความจุไฟฟ้าลดลงตามความลึกของร่องรูปตัวยูบริเวณระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบพลานาร์ด้วย จากข้อมูลทั้งหมดที่ได้ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาคุณสมบัติของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	FABRICATION OF Al/n-Si/Al UMSM PHOTODETECTOR BY ANISOTROPIC SILICON ETCHING TECHNIQUE
Student	Mr. Thanakrit Sanghong
Student ID	57601187
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Surasak Niemcharoen

ABSTRACT

This thesis proposes to fabrication a U-shaped groove photodetector Al/n-Si/Al structure or UMSM silicon etching technique with anisotropic by tetramethylammonium hydroxide (TMAH). To etch silicon area between the two electrodes of the photodetector up changes structure of the photodetector from the planar to U-shaped groove which increases the exposure to the photodetector without the need to increase the distance between the electrodes. The properties of the solution used in the U-shaped grooves etch will cause an isotropic etching. By the light area of the increased ratio between the plane (111) / (100) was 1.7 times after creating the photodetector U-shaped groove then study the physical and electrical properties. It shows that the physical characteristics of the photodetector U-shaped grooves, the surface of the silicon is rough, the redevelopment of the random pyramid. Then more focus on adding smoothness to the surface of silicon by the addition of isopropyl alcohol (IPA) into the solution TMAH by the IPA has a surfactant then found that it can reduce the roughness of the surface. In terms of electrical characteristics, the dark current 34 μA when a bias voltage of 3 V by the light intensity of 20,000 lux at the bias voltage 3 V to the photocurrent will be 352 μA, which found that the light was increased 25 times compared to a planar. And when the capacitance-voltage characteristic, found that the capacity reduction by the depth of the U-shaped area between the electrodes. In this thesis has been compared to a planar structure. All of the results in this study can be used to improve the properties of the photodetector U-shaped grooves for a better performance in the future.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษารองศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางและการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัย ตลอดจนให้ความรู้ อบรมสั่งสอน ทั้งเรื่องเรียนและบอกเล่าประสบการณ์เพื่อเป็นแนวทางในการเรียน และการดำเนินชีวิต จนบรรลุตามเป้าหมายที่ตั้งใจไว้ด้วยดีทุกประการ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, ดร.นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ให้ความเมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดจนให้คำปรึกษาทางวิชาการ รวมไปถึงปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้แก่ศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ดร.อัมพร โพธิ์ใย ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) , ดร. จิรวัฒน์ ปราบเขต และนักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน สำหรับการสนับสนุนเทคโนโลยีในการสร้างและเครื่องมือในการทดลองบางส่วน ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ดร.กอบศักดิ์ ศรีประภา, ดร.ทวีวัฒน์ กระจ่างสังข์, ดร.จรัญ ศรีธาราธิคุณ และนักวิจัยห้องปฏิบัติการห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (STL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ทุกท่าน สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือในการทดลองบางส่วน ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณไอลดา สุวรรณชาตรี, คุณงามจิต มงคลธนานนท์, คุณวุฒิไกร คำอ่อน และคุณยุทธนา แจ้งอรุณ ที่ช่วยเหลือและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์เล่มนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ทุ่มเทแรงกายแรงใจ สนุบสนุน ข้าพเจ้าทั้งในด้านการเรียน และให้กำลังใจในยามที่ท้อแท้ รวมทั้งบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่านที่ช่วยให้คำแนะนำและช่วยเหลือ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณประโยชน์อันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และห้องปฏิบัติการไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัยจนกระทั่งจบการศึกษา

ธนกฤต แสงโฮง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย........ I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ........ II

กิตติกรรมประกาศ........ III

สารบัญ........ IV

สารบัญตาราง........ VII

สารบัญรูป........ VIII

รายการคำย่อ........ XII

รายการสัญลักษณ์........ XIII

รายการคำศัพท์เทคนิค........ XV

บทที่ 1 บทนำ........ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย........ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย........ 3

1.3 ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา........ 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย........ 4

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์........ 4

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง........ 5

2.1 ตัวตรวจวัดแสง........ 6

2.1.1 ตัวตรวจวัดแสงในสภาวะสมดุล........ 6

2.1.2 ตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแรงดันไบอัส........ 7

2.1.3 ตัวตรวจวัดแสงเมื่อมีความเข้มแสงตกกระทบ........ 8

2.2 การกัด........ 11

2.2.1 การกัดแบบเปียก........ 11

2.2.2 การกัดแบบแห้ง........ 15

2.3 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย TMAH........ 17

2.4 การกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก........ 20

2.4.1 ปฏิกิริยาการกัดซิลิคอน........ 20

2.4.2 โครงสร้างอะตอมของซิลิคอน........ 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 ปฏิกิริยาการกัดอะลูมิเนียม	23
บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง	25
3.1 การออกแบบ	25
3.2 เงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการกัดแผ่นซิลิคอน	25
3.3 กระบวนการสร้าง	26
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นผลึกซิลิคอน	26
3.3.2 กระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียม	26
3.3.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี	27
3.3.4 กระบวนการกัด	27
3.3.5 กระบวนการซินเตอริง	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	30
4.1 การสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลานาร์	30
4.1.1 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลานาร์	30
4.2 การสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู	32
4.2.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู	32
4.2.2 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบ	35
4.2.3 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เมื่อได้รับแสงตกกระทบ	38
4.2.4 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เมื่อได้รับแสงตกกระทบที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่างกัน	41
4.3 การสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูโดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูโดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย ... 46

4.3.2 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลายเมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบ 50

4.3.3 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย .. 50

4.3.4 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลายเมื่อได้รับแสงตกกระทบ 53

4.3.5 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลายเมื่อได้รับแสงตกกระทบ ที่ความลึกของระยะห่างระหว่างขั้วฟ้าต่างกัน 55

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 57

เอกสารอ้างอิง 59

ภาคผนวก ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์ 62

ประวัติผู้เขียน 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลาย TMAH 18
2.2 เปรียบเทียบอัตราการกัดของสารละลาย 19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM
(ก) แบบเชิงราบ
(ข) แบบร่องรูปตัวยู 2

2.1 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงในสภาวะสมดุลความร้อน 6

2.2 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์เมื่อได้รับแรงดันไบอัส. 7

2.3 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสง เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบ 8

2.4 แผนผังของพันธะซิลิคอน (ก) ระนาบ (100) และ (ข) ระนาบ (111) 13

2.5 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า – แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์
เมื่อได้รับแรงดันไบอัส 10

2.6 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า – แรงดันตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์.... 11

2.7 ลักษณะการกัดเปียกแบบไอโซทรอปิก 12

2.8 ลักษณะการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก 12

2.9 แผนผังของพันธะซิลิคอน (A) ระนาบ (100) และ (B) ระนาบ (111) 13

2.10 การเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของซิลิคอน โดยที่ h คือ ประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำ สี่เหลี่ยม
คือ อะตอมซิลิคอนบนพื้นผิว และ A คือ สารละลายใช้ในการกัด 14

2.11 ลักษณะการกัดแห้ง 15

2.12 การกัดด้วยพลาสมา อะตอมของซิลิคอนระเหยออกจากพื้นผิว 15

2.13 การกัดด้วยสารเคมีแบบแห้ง อะตอมของซิลิคอนทำปฏิกิริยากับไอออนปฏิกิริยาบนพื้นผิว 16

2.14 การกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยา 17

2.15 ซิลิคอนมีลักษณะโครงสร้างเป็น FCC (face-centered cubic) พันธะในอะตอมซิลิคอน
ระนาบ (100), ระนาบ (111) และระนาบ (110) 22

2.16 ลักษณะของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกโดยมีขนาดของมุม 54.7° 23

3.1 ลวดลายกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง U-MSM 25

3.2 ลักษณะโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงแบบ U-shaped 28

3.3 ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการตัดแยกชิ้นและเชื่อมต่อขา 28

3.4 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู 29

4.1 ลักษณะกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์แบบพลานาร์
ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.2 ลักษณะกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์แบบพลา-นาร์ขณะได้รับแสงตกกระทบ 31
4.3 ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู
(ก) ภาพถ่ายด้วยกล้องไมโครสโคปกำลังขยาย 40 เท่า
(ข) ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 500 เท่า.. 32
4.4 ภาคตัดขวางจาก SEM ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่กำลังขยาย 3,000 เท่า 33
4.5 ลักษณะของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู 34
4.6 ภาพถ่ายพื้นผิวบริเวณพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู 35
4.7 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษะสมบัติกระแส-แรงดัน เมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบ 35
4.8 ลักษณะสมบัติกระแสแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่เวลาซินเตอริงต่างกัน 36
4.9 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษะสมบัติกระแส-แรงดัน เมื่อได้รับแสงตกกระทบ 38
4.10 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อผ่านการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 15 นาที ขณะได้รับแสงตกกระทบ 39
4.11 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อผ่านการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 30 นาที ขณะได้รับแสงตกกระทบ 39
4.12 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อผ่านการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 15 และ 30 นาที ขณะได้รับแสงตกกระทบ. 40
4.13 ลักษณะสมบัติกระแส-ความเข้มแสงเมื่อผ่านการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 15 และ 30 นาที ขณะได้รับแสงตกกระทบ 41
4.14 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะได้รับแสงตกกระทบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 60 μm 42
4.15 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะได้รับแสงตกกระทบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 80 μm 42
4.16 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะได้รับแสงตกกระทบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 100 μm 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.17 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะได้รับแสงตกกระทบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 40-100 μm 43

4.18 ลักษณะสมบัติกระแส-ความเข้มแสง ขณะได้รับแสงตกกระทบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 40-100 μm 44

4.19 แผนภาพแถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าขนาดกว้างเมื่อได้รับแรงดันไบอัส 45

4.20 ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูโดยมีการเติมไอโซ-โพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย
(ก) ภาพถ่ายด้วยกล้องไมโครสโคปกำลังขยาย 30 เท่า
(ข) ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 500 เท่า.. 47

4.21 ภาพถ่าย SEM ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ....
(ก) เมื่อไม่มีการเติม IPA ลงไปในสารละลาย
(ข) เมื่อมีการเติม IPA ลงไปในสารละลาย 47

4.22 ภาพถ่าย SEM ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูโดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย ที่กำลังขยาย 3000 เท่า............................... 48

4.23 ภาคตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่กำลังขยาย 10,000 เท่า.
(ก) เมื่อไม่มีการเติม IPA ลงไปในสารละลาย
(ข) เมื่อมีการเติม IPA ลงไปในสารละลาย 48

4.24 ภาพถ่ายพื้นผิวบริเวณพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่ใช้เวลาในการกัดต่างกัน 49

4.25 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูโดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลายขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ 50

4.26 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย.............................. 51

4.27 ภาพแสดงบริเวณปลอดพาหะ. 52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.28 ลักษณะความกว้างบริเวณปลอดพาหะ-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย 52

4.29 ลักษณะกระแสแสง-ความกว้างบริเวณปลอดพาหะของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย 53

4.30 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่มีความลึกของระยะห่างขั้วไฟฟ้า 2 μm ขณะได้รับแสงตกกระทบ 54

4.31 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่มีความลึกของระยะห่างขั้วไฟฟ้า 0.3 μm ขณะได้รับแสงตกกระทบ 55

4.32 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่มีความลึกของระยะห่างขั้วไฟฟ้า 3.5 μm ขณะได้รับแสงตกกระทบ 56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
DI	De-ionization water	น้ำไร้ประจุ
EDP	Ethylenediamine pyrocatechol	เอธิลีนไดแอมมีน ไพโรคำทิคอล
ERC	Electronic Research Center	ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์
FCC	Face Centred Cubic	เฟสเซ็นเตอร์คิวบิก
HF	Hydrofluoric acid	กรดไฮโดรฟูออริก
H_2O	Water	น้ำ
IPA	Isopropyl alcohol	ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์
KOH	Potassium hydroxide	โพแทสเซียมไฮดรอกไซ
MEMS	Microelectromechanical systems	ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค
NaOH	Sodium hydroxide	โซเดียมไฮดรอกไซด์
NH_4OH	Ammonium hydroxide	แอมโนเนียมไฮดรอกไซด์
n-Si	N type Silicon	ซิลิคอนชนิดเอ็น
OH	Hydroxide	ไฮดรอกไซด์
PR	Photoresist	น้ำยาไวแสง
Si	Silicon	ซิลิคอน
SiO_2	Silicon dioxide	ซิลิคอนไดออกไซด์
TMEC	Thai Microelectronics Center	ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์
TMAH	Tetramethyl ammonium hydroxide	เตตระเมธิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์
μm	Micrometer	ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

A	คือ	พื้นที่รอยสัมผัส
A^*	คือ	ค่าคงตัวริชาร์ดสัน
C	คือ	ค่าความจุไฟฟ้า
D	คือ	ระยะห่างระหว่างจุดกำเนิดรังสีและอุปกรณ์
D_{TxR}	คือ	ปริมาณรังสีที่ดูดซับโดยเฉลี่ยในเนื้อเยื่อ
E_0	คือ	ระดับสุญญากาศ
E_A	คือ	ระดับผู้รับแบบลึก
E_a	คือ	ระดับพลังงานกระตุ้น
E_C	คือ	ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า
E_D	คือ	ระดับผู้ให้แบบลึก
E_F	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิ
E_{FM}	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิด้านโลหะ
E_{FS}	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิด้านสารกึ่งตัวนำ
E_g	คือ	ช่องว่างพลังงาน
E_i	คือ	ระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน
E_V	คือ	ระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์
E_T	คือ	ระดับพลังงานของจุดบกพร่อง
ε_S	คือ	ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ
h	คือ	ค่าคงที่ของแพลงค์
I_0	คือ	ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ
I_F	คือ	กระแสไฟฟ้าด้านไบอัสตรง
I_{MS}	คือ	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านโลหะไปด้านสารกึ่งตัวนำ
I_R	คือ	กระแสไฟฟ้าด้านไบอัสย้อนกลับ
I_s	คือ	ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับหรือกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัส
I_{SM}	คือ	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปด้านโลหะ
I_P	คือ	กระแสแสง
I_c	คือ	กระแสคอนดัคเตอร์
I_d	คือ	กระแสโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

J	คือ	ความหนาแน่นกระแส
k	คือ	ค่าคงที่โบสต์มันน์
kV	คือ	พลังงานรังสีเอกซ์
mA	คือ	กระแสที่ถูกป้อนให้หัวจ่ายรังสีเอกซ์
n	คือ	แฟคเตอร์อุคมคติ
N_A	คือ	ความหนาแน่นของพาหะผู้รับ
N_A^-	คือ	ไอออนลบของอะตอมผู้รับ
N_D	คือ	ความหนาแน่นของพาหะผู้ให้
N_D^+	คือ	ไอออนบวกของอะตอมผู้ให้
q	คือ	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
S	คือ	เวลาการฉายรังสีเอกซ์
T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์
V_A	คือ	แรงดันไบอัส
V_{bi}	คือ	แรงดันภายใน
W_d	คือ	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ
χ	คือ	อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี
ϕ_{bn}	คือ	ความสูงกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์
ϕ_M	คือ	ฟังก์ชันงานของโลหะ
ϕ_S	คือ	ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำศัพท์เทคนิค

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

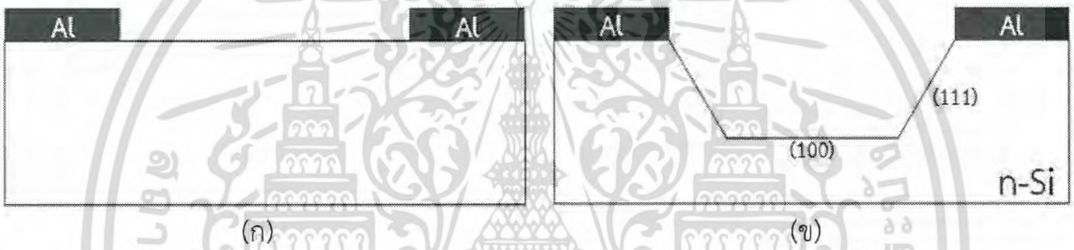
อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันมีความก้าวหน้าและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เป็นส่วนสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศไทย อีกทั้งยังอำนวยความสะดวกให้กับการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งเทคโนโลยีสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนี้ สามารถตอบสนองต่อความต้องการของมนุษย์โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายด้าน ยกตัวอย่างเช่น ในกล้องถ่ายภาพ จะใช้เป็นอุปกรณ์วัดความเข้มของแสงขณะถ่ายภาพ (Light meter) ใช้ควบคุมระบบโฟกัสภาพอัติโนมัติ (Automatic shutter control) ใช้ควบคุมการเปิดปิดแฟลช (Flash contral) ในอุตสาหกรรมยานยนต์ (Automotive) ใช้ในการหรี่ไฟ (Headlight dimmer) ใช้ในการตรวจจับโลหะ (Twilight detectors) ในด้านการแพทย์ ใช้ในงานด้านเอกซ์เรย์ (X-ray detection) ใช้ในเครื่องวัดออกซิเจนในเลือด (Pulse oximeters) ใช้ในการวิเคราะห์เลือด (Blood particle analyzers) ในด้านการรักษาความปลอดภัย ใช้ในการตรวจจับควัน (Smoke detectors) ใช้ในการตรวจจับเปลวไฟ (Flame monitors) ใช้ในการรักษาความปลอดภัยในสนามบิน (Security inspection equipment - airport X ray) ในด้านการติดต่อสื่อสาร ใช้ในการเชื่อมต่อของเส้นใยแก้วนำแสง (Fiber optic links) ใช้ในการควบคุมระยะไกล (Optical remote control) [1] ใช้ในงานด้านอุตสาหกรรม เช่น เครื่องอ่านบาร์โค๊ด (Bar code sanners) [2] ปากกาแสง (Light pens) ระบบเปิด-ปิดหน้าจออัตโนมัติ (Brightness controls) [3] เอนโค้ดเดอร์ (Encoders) เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (Position sensors) เป็นต้น [4] อุปกรณ์เหล่านี้ล้วนเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีการนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลายและเป็นการนำเอาตัวตรวจวัดแสง (Photodetector) ไปประยุกต์ใช้งานทั้งสิ้น

ตัวตรวจวัดแสงหรือโฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetector) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความเข้มของแสงโดยสามารถเปลี่ยนพลังงานทางแสงให้อยู่ในรูปพลังงานทางไฟฟ้าได้โดยอาศัยการดูดกลืนพลังงานของโฟตอนไปใช้ในการกระตุ้นให้มีการปลดปล่อยพาหะอิสระทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้น ตัวตรวจวัดแสงมีโครงสร้างหลายลักษณะด้วยกันขึ้นอยู่กับรูปแบบการใช้งาน เช่น เช่น พี-เอ็นโฟโตไดโอด (p-n photodiode), พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode) และตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Metel-Semiconductor-Metal: MSM) เป็นต้น โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือโครงสร้าง MSM นี้เป็นอุปกรณ์ที่จัดอยู่ในประเภท กลุ่มของช็อตต์กีย์ไดโอด มีวัตถุประสงค์เพื่อนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดแสง โดยมีโครงสร้างเป็นรอย สัมผัสช็อตต์กีย์ 2 รอยสัมผัสต่อแบบหันหลังชนกัน มีคุณสมบัติเด่นคือ สัญญาณรบกวนต่ำ ความจุไฟฟ้าต่ำ ทำงานด้วยความเร็วสูง มีเสถียรภาพที่ดี มีสภาพการตอบสนองที่ดี มีโครงสร้างแบบพลานาร์ที่ง่ายต่อกระบวนการสร้าง และที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำคัญสามารถออกแบบและทดสอบ รวมทั้งสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM กันมาอย่างต่อเนื่อง [5]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบเชิงราบหรือแบบพลานาร์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อกระบวนการสร้าง ไม่ยุ่งยากซับซ้อน แต่พบว่าตัวตรวจวัดแสงที่สร้างแบบพลานาร์นั้นจะมีพื้นที่รับแสงจำกัดอยู่ที่บริเวณระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง วิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงมีแนวความคิดในการเพิ่มพื้นที่รับแสงซึ่งอยู่บริเวณระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าโดยการกัดเป็นร่องรูปตัวยูโดยที่ไม่จำเป็นต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ซึ่งใช้กระบวนการกัดแบบเปียกด้วยสารละลายเตตระเมทธิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ หรือ TMAH ในการกัดบริเวณพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงให้เป็นร่องรูปตัวยู การกัดซิลิคอนโดยใช้สารละลาย TMAH นี้จะทำให้เกิดสมบัติการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic)



รูปที่ 1.1 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM
(ก) แบบเชิงราบ
(ข) แบบร่องรูปตัวยู

สารละลาย TMAH นี้สามารถใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตซีมอสได้แตกต่างจากสารละลาย KOH ซึ่งอาจทิ้งโลหะอัลคาไลน์ (alkali metal) ของโพแทสเซียมซึ่งทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตมอส (MOS) และซีมอส (CMOS) ได้ [6] แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) เป็นหนึ่งในไฮดรอกไซด์ที่ไม่มีโลหะอัลคาไลน์และสามารถเจือจางไปกับน้ำได้ ง่ายต่อระบวนการกำจัดทิ้ง อีกทั้งแอมโมเนียมสามารถที่จะระเหยออกไปจากสารละลายได้เมื่อใช้อุณหภูมิสูง

ในวิทยานิพนธ์นี้ทำการศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู (UMSM) โดยใช้กระบวนการกัดเปียกด้วยสารละลาย TMAH ซึ่งมีคุณสมบัติแบบแอนไอโซทรอปิกคือกัดระนาบใดระนาบหนึ่งมากกว่าอีกระนาบหนึ่ง เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพตัวตรวจวัดแสงให้ดียิ่งขึ้น โดยรวมเอาเทคโนโลยีการกัดซึ่งเป็นส่วนสำคัญในงานทางด้านระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (Microelectromechanical systems : MEMS) และเทคโนโลยีทางด้านการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเข้าด้วยกัน จึงเกิดเป็นงานวิจัยนี้ขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู
2. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู
3. ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบ
4. ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เมื่อได้รับแสงตกกระทบ
5. ศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู
6. ศึกษาผลจากการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลายเตตระเมทธิวแอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์

1.3 ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

จากวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ที่ต้องการศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยทำการกัดร่องรูปตัวยูด้วยสารละลายเตตระเมทธิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ โดยหวังว่าตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูนี้จะมีกระแสแสงที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มพื้นที่รับแสงที่เพิ่มขึ้น จากนั้นนำตัวตรวจวัดแสงที่สร้างเสร็จแล้วมาทำการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองทางแสง เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างร่องรูปตัวยูต่อไป การศึกษาแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้

ส่วนแรก ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลานาร์ เพื่อที่จะศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างร่องรูปตัวยู

ส่วนที่สอง ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ด้วยกระบวนการกัดแบบเปียก โดยใช้สารละลาย TMAH และมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ลงไปในสารละลาย TMAH ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อดูพื้นผิวของซิลิคอนหลังจากผ่านกระบวนการกัดเปียกด้วยสารละลาย TMAH ทั้งที่ไม่เติมและเติม IPA ลงไปในสารละลาย TMAH

ส่วนสุดท้าย ทำการทดลองลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ทั้งในกรณีที่ไม่มีแสงตกกระทบ และมีแสงตกกระทบ โดยมีความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงในช่วง 5,000 –

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20,000 lux เพื่อทดสอบการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง รวมทั้งศึกษาความจุไฟฟ้า-แรงดัน เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์กระแสแสงที่เกิดขึ้นในกาสต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีและกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู
2. ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู
3. ความรู้ความเข้าใจผลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู
4. ความรู้ความเกี่ยวกับวิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างร่องรูปตัวยู ด้วยการวัดกระแส-แรงดัน ในกรณีที่ไม่มีแสงตกกระทบ และมีแสงตกกระทบ

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีตัวตรวจวัดแสง กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างเป็นแบบร่องรูปตัวยู และเหตุผลสนับสนุนต่องานวิจัยนี้ วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนของการศึกษาและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยในครั้งนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง จะกล่าวถึงทฤษฎีตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ และขณะได้รับแสงตกกระทบ ภายใต้แรงดันไบอัส และกระบวนการกัดในรูปแบบต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในกระบวนการสร้างให้เป็นร่องรูปตัวยู

บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง จะกล่าวถึงการออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบ การเลือกเงื่อนไขในงานวิจัย และกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ประกอบด้วย ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพ ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการทดลอง และแนวทางในการพัฒนาตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือ MSM ชนิด Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู (U-Shape) หรือ UMSM บนแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น โดยใช้กระบวนการกัดเปียก (Wet Etching) แบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ในกระบวนการกัดร่องรูปตัวยู จะใช้สารละลายเตตระเมทธิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Tetramethyl Ammonium Hydroxide:TMAH) กัดแผ่นผลึกซิลิคอน ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ รวมทั้งกระบวนการกัดแบบเปียกของแผ่นผลึกซิลิคอน

โครงสร้าง MSM หรือโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ เป็นอุปกรณ์ที่จัดอยู่ในประเภทกลุ่มของช็อตต์กีย์ไดโอด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดแสง โดยมีโครงสร้างเป็นรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ 2 รอยสัมผัส มีคุณสมบัติเด่น คือ ความจุไฟฟ้าต่ำ ทำงานด้วยความเร็วสูง มีเสถียรภาพที่ดี มีสภาพการตอบสนองที่ดี มีโครงสร้างที่ง่ายต่อกระบวนการสร้าง และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM อย่างหลากหลาย ซึ่งงานวิจัยที่เคยทำมาแล้วส่วนใหญ่จะเป็นโครงสร้างแบบพลานาร์

ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการเปลี่ยนจากโครงสร้างแบบพลานาร์เป็นแบบกัดร่องรูปตัวยูลงไป หรือเรียกว่า U-Shape เทคนิคการกัดร่องรูปตัวยูจะใช้สารละลายเตตระเมทธิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ในกระบวนการกัดแบบเปียก การกัดซิลิคอนโดยใช้สารละลายนี้จะทำให้เกิดสมบัติการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก คือเป็นการเลือกระนาบและทิศทางในการกัดซิลิคอนหรือเป็นการกัดระนาบใดระนาบหนึ่งมากกว่าอีกระนาบหนึ่ง

สารละลาย TMAH นี้สามารถใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตซีมอสได้แตกต่างจากสารละลาย KOH ซึ่งอาจทิ้งโลหะอัลคาไลน์ (alkali metal) ของโพแทสเซียมซึ่งทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ในในกระบวนการผลิตมอส (MOS) และซีมอส (CMOS) ได้ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) เป็นหนึ่งในไฮดรอกไซด์ที่ไม่มีโลหะอัลคาไลน์และสามารถเจือจางไปกับน้ำได้ ง่ายต่อการกำจัดทิ้ง อีกทั้งแอมโมเนียมสามารถที่จะระเหยออกไปจากสารละลายเมื่อใช้อุณหภูมิสูง วิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้สารละลาย TMAH มาใช้ในกระบวนการกัดแบบเปียกเพื่อสร้างร่องรูปตัวยูในบริเวณพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงที่จะทำการสร้างขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อเป็นการพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

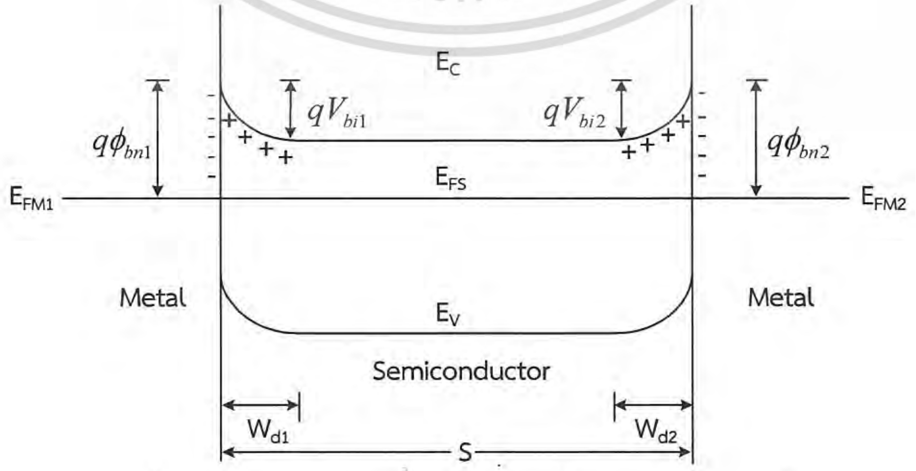
2.1 ตัวตรวจวัดแสง

ตัวตรวจวัดแสงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับแสง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทั้งในด้านภาพและแสงอย่างกว้างขว้าง มักเป็นส่วนประกอบอยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในชีวิตประจำวันต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ กล้องถ่ายรูป โทรทัศน์ เครื่องฉาย (Projector) รวมไปถึงระบบสัมผัสต่างๆ นอกจากนี้ยังนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวตรวจจับความร้อน (Thermal detector) โดยอาศัยการเปลี่ยนแสงที่มีความยาวคลื่นอินฟาเรดให้กลายเป็นภาพความร้อน (Thermal picture) [7] หรือภาพที่แสดงอุณหภูมิของวัสดุต่างๆ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสง ซึ่งประกอบไปด้วยสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นคือ มีเสถียรภาพที่ดี กระแสมืดต่ำ มีสภาพการตอบสนองทางแสงที่ดี มีโครงสร้างที่ง่ายต่อกระบวนการสร้าง และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย สามารถนำไปใช้ทางด้านงานภาพและแสงได้อย่างกว้างขว้าง จึงทำให้ได้รับความสนใจในปัจจุบัน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างหลักการทำงาน และความสัมพันธ์ทางแสงที่เกี่ยวกับตัวตรวจวัดแสง [8-10]

2.1.1 ตัวตรวจวัดแสงในสภาวะสมดุล

รูปที่ 2.1 แสดงแถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสง ในสภาวะสมดุลความร้อน ซึ่งจะเกิดบริเวณปลอดพาหะ และกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายกำหนดให้เป็นขั้วแคโทด (cathode) และรอยสัมผัสด้านขวากำหนดให้เป็นขั้วแอโนด (anode) โดยทั่วไปโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทด และขั้วแอโนดจะเป็นโลหะชนิดเดียวกัน เพื่อลดจำนวนต้นแบบและกระบวนการสร้างลง จึงทำให้กำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ของขั้วแคโทด (ϕ_{bn1}) และขั้วแอโนด (ϕ_{bn2}) มีขนาดเท่ากันหรือ $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$ กำแพงศักย์ภายในของขั้วแคโทด (V_{bi1}) และขั้วแอโนด (V_{bi2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $V_{bi1}=V_{bi2}=V_{bi}$ และความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_{d1}) และด้านแอโนด (W_{d2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $W_{d1}=W_{d2}=W_d$ ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร

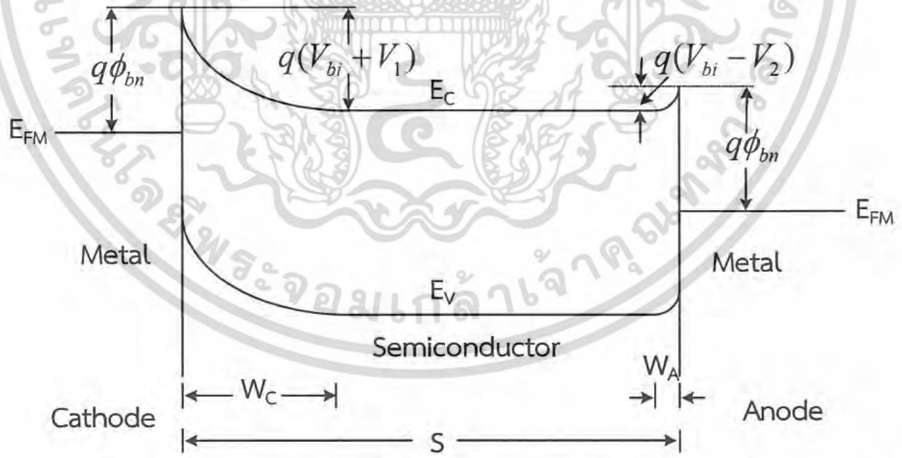


รูปที่ 2.1 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงในสภาวะสมดุลความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแรงดันไบอัส

ตัวตรวจวัดแสงเมื่อได้รับการไบอัสดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายมือเป็นขั้วแคโทดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสย้อนกลับ รอยสัมผัสด้านขวามือเป็นขั้วแอโนดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสตรง บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) มีการขยายตัวกว้างมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสย้อนกลับ และมีกำแพงศักย์ภายในสูงขึ้นเป็น $V_{bi}+V_1$ อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนส่วนน้อยที่มีพลังงานมากพอจากด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{SM}) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ ส่วนด้านแอโนดที่ได้รับการไบอัสตรง บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) แคบมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสตรงค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเท่ากับ $V_{bi}-V_2$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า (I_{MS}) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านแคโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current : I_{dark}) ของโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ โดยกระแสมืดของโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ จะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น เนื่องจากกระแสโฮลที่ถูกฉีดจากรอยสัมผัสด้านแอโนดมีค่าน้อยกว่ากระแสอิเล็กตรอนมาก



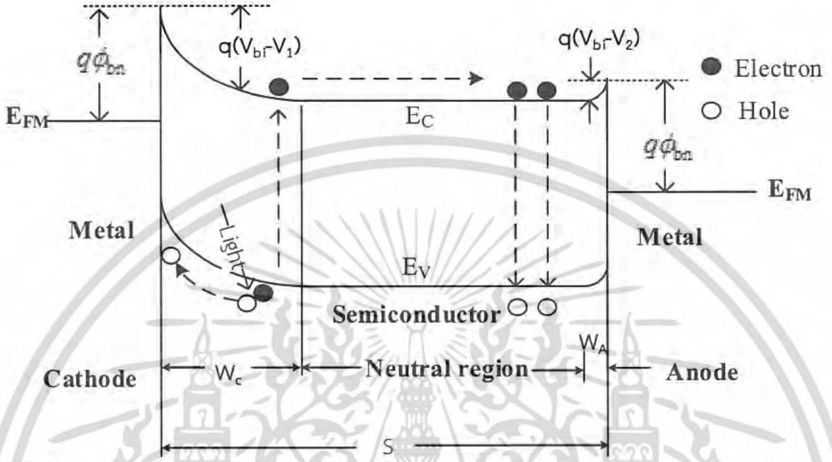
รูปที่ 2.2 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์เมื่อได้รับแรงดันไบอัส

ซึ่งความกว้างบริเวณปลอดพาหะของโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง จะพิจารณาให้ความสำคัญเฉพาะส่วนบริเวณปลอดพาหะที่เกิดทางด้านแคโทดเพียงด้านเดียว เนื่องจากกลไกการเกิดกระแสแสงจะเกิดขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทดเป็นหลัก ซึ่งจะอธิบายกลไกการเกิดกระแสแสงในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ตัวตรวจวัดแสงเมื่อมีความเข้มแสงตกกระทบ

เมื่อตัวตรวจวัดแสง ได้รับแสงตกกระทบ พื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงจะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน (S) แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงภายใต้การให้แรงดันไบอัส แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสง เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบ

เมื่อแสงตกกระทบลงบนพื้นที่รับแสง ซึ่งรวมทั้งส่วนที่เป็นบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล โดยที่พลังงานโฟตอนต้องมากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu \geq E_g$) จะเกิดการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น คู่อิเล็กตอน-โฮลที่เกิดบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณปลอดพาหะเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแคโทดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า หรือที่เรียกว่ากระแสแสง (photocurrent : I_{photo}) ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทิศกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอโนด ซึ่งจะต้องเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่บริเวณนิวทรัล ในบริเวณนิวทรัล โฟตอนจะถูกดูดกลืนพลังงานและกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เช่นเดียวกับในบริเวณปลอดพาหะ แต่เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำจึงเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อแสงตกกระทบและมีการกระตุ้นให้เกิดโฮลทำให้ความหนาแน่นของโฮลหรือประจุส่วนน้อยมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละจุดจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนที่ความหนาแน่นของโฮลต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดพาหะและถูกสนามไฟฟ้าเร่งเข้าหาขั้วแคโทด แต่โฮลส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่อยู่ในชิ้นสารกึ่งตัวนำและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในที่สุด ส่วนในบริเวณนิวทรัลเนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโฟตอนในบริเวณนิวทรัลและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณปลอดพาหะเป็นประจุพาหะส่วนมากในชิ้นสารกึ่งตัวนำจึงไม่เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้ อิเล็กตรอนบางส่วนจึงเกิดการรวมตัวกับโฮลใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สุด ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างจึงเป็นกระแสที่เกิดจากโฮล

โดยที่ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะรวม (W_T) ของตัวตรวจวัดแสงจะเป็นผลรวมของบริเวณปลอดพาหะทางด้านคาโทด (W_C) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และบริเวณปลอดพาหะทางด้านอาโนด (W_A) ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ดังสมการที่ 2.1

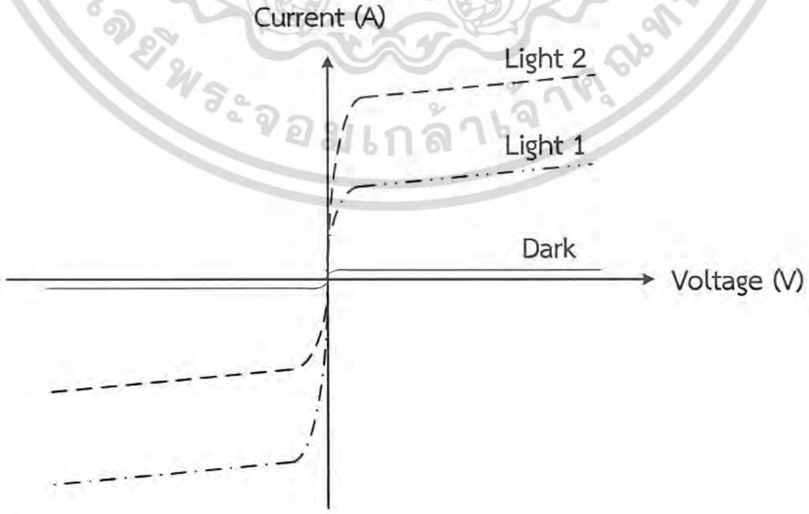
$$W_T = W_C + W_A \tag{2.1}$$

โดยที่

$$W_C = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \tag{2.2}$$

$$W_A = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_{bi} + V_A)}{qN_D}} \tag{2.3}$$

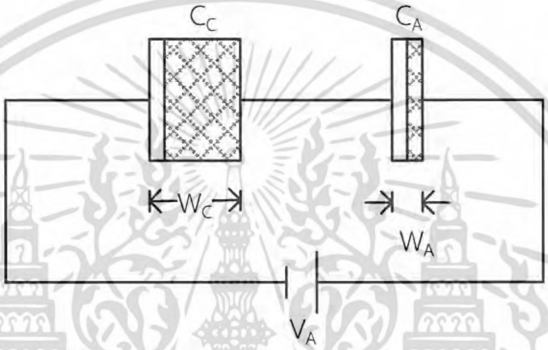
ลักษณะสมบัติสำคัญของตัวตรวจวัดแสงที่มักถูกพิจารณาคือ ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และ ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดัน โดยในรูปที่ 2.4 เป็นลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ เมื่อได้รับความเข้มแสงตกกระทบมีความสมมาตรกันทั้งด้านที่ได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับ ซึ่งกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อได้รับค่าความเข้มแสงที่สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.4 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนลักษณะสำคัญของค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง คือความจุไฟฟ้าที่มีความสมมาตรกัน โดยค่าความจุไฟฟ้าจะแปรผกผันกับแรงดันไบแอส โดยเมื่อให้แรงดันไบแอสมากขึ้นค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลง โดยค่าความจุไฟฟ้าเมื่อได้รับแรงดันไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งความจุไฟฟ้ารวม (C_T) เกิดจากผลรวมของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ประกอบด้วยความจุไฟฟ้าทางด้านคาโทด (C_C) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และความจุไฟฟ้าทางด้านอาโนด (C_A) ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ดังสมการที่ 2.4 นอกจากนี้ยังสามารถใช้ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้เพื่อวิเคราะห์หาค่าแรงดันภายในและความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในฐานรองซิลิคอน



รูปที่ 2.5 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์เมื่อได้รับแรงดันไบอัส

และความจุไฟฟ้ารวมเท่ากับ

$$C_T = \frac{C_C C_A}{C_C + C_A} \tag{2.4}$$

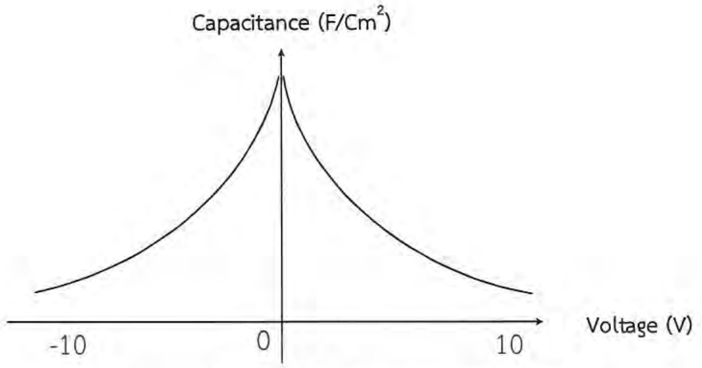
โดยที่

$$C_C = \sqrt{\frac{2q\varepsilon_S N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \tag{2.5}$$

$$C_A = \sqrt{\frac{2q\varepsilon_S N_D}{2(V_{bi} + V_A)}} \tag{2.6}$$

และในรูปที่ 2.6 แสดงลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ที่มีลักษณะสมมาตรกันและเมื่อได้รับแรงดันไบอัสความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า – แรงดันตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์

2.2 การกัด (Etching process)

กระบวนการกัดโดยทั่วไปจะเป็นการสร้างลวดลายวงจรในงานอิเล็กทรอนิกส์จะมีกระบวนการกัดมีสองประเภทคือ การกัดแบบเปียก (wet etching) และการกัดแบบแห้ง (dry etching) เมื่อทำการกัดผิวหน้าของวัสดุด้วยสารเคมีหรือก๊าซแล้วนั้นจะทำให้ผิวหน้าของวัตถุมีลักษณะเป็นไอโซทรอปิก (isotropic) จะกัดแบบสม่ำเสมอกันในทุกทิศทาง หรือแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) จะกัดแบบสม่ำเสมอในทิศทางของระนาบ การกัดแบบเปียกมักจะมีอัตราการกัดที่เร็วกว่าการกัดแบบแห้งและสามารถเปลี่ยนแปลงอัตราการกัดได้โดยอุณหภูมิที่แตกต่างกันหรือความเข้มข้นของสารขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน [11-12]

2.2.1 การกัดแบบเปียก

การกัดแบบเปียกเป็นการกัดผิวหน้าของวัสดุโดยจะใช้สารเคมีที่เป็นของเหลวหรือที่เรียกว่า etchants เพื่อกัดส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยจะสร้างลวดลายไว้บนผิวหน้าของวัสดุเป็นการกำหนดลวดลายก่อนทำการกัดในส่วนที่ไม่ต้องการออก

ขั้นตอนในกระบวนการกัดแบบเปียกจะต้องเกิดปฏิกิริยาทางเคมีด้วยสารละลายที่ใช้ในกระบวนการ ดังนั้นในกระบวนการกัดแบบเปียกจะอธิบายได้ 3 ขั้นตอนนี้

(1) การแพร่กระจายของสารละลายบนผิวหน้าของวัสดุที่ไม่ต้องการ

(2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายและผิวหน้าของวัสดุที่ไม่ต้องการ จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชัน (reduction-oxidation) หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) ปฏิกิริยานี้จะส่งผลให้ออกซิเดชันของวัสดุที่ละลายแล้วเกิดออกซิไดซ์

(3) การแพร่กระจายของสารละลายโดยเกิดปฏิกิริยาขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุที่มีปฏิกิริยาตอบสนอง [13]

การกัดแบบเปียกจะแบ่งเป็น 2 แบบดังนี้

(1) การกัดเปียกแบบไอโซทรอปิก (isotropic etching)

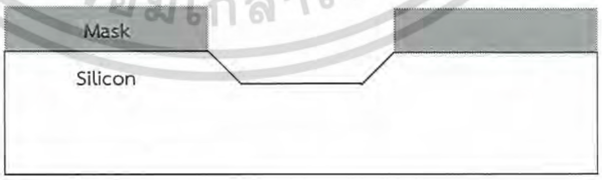
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกัดเปียกแบบไอโซทรอปิกจะมีส่วนผสมของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid) กรดไนตริก (nitric acid) และกรดอะซิติก (HNA) เป็นสารละลายที่ให้สำหรับทำการกัดซิลิคอน โดยการกัดนั้นจะมีความเข้มข้นของสารละลายที่เป็นการกำหนดอัตราการกัดและการกัดส่วนใหญ่มักใช้ซิลิคอนออกไซด์หรือซิลิคอนไนไตรด์เพื่อเป็นการลดอัตราการกัดลง การกัดด้วยสารเคมีโดยทั่วไปมักจะเป็นลักษณะไอโซทรอปิก ทิศทางของการกัดนั้นมีความสำคัญมากสำหรับรูปแบบการถ่ายโอนความละเอียดสูงดังรูปที่ 2.7 แต่การกัดเปียกแบบไอโซทรอปิกจะไม่นิยมนำมาใช้ทำการกัด

รูปที่ 2.7 ลักษณะการกัดเปียกแบบไอโซทรอปิก

(2) การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching)

สารละลายที่ทำการกัดบนผิวหน้าของวัสดุ ในอัตราที่ต่างแตกกันขึ้นอยู่กับผลึกของวัสดุกับสารละลายที่ใช้ในการกัดซึ่งจะมีความแตกต่างของอัตราการกัดขึ้นอยู่กับระนาบของผลึกในวัสดุ เช่น ซิลิคอนจะเกิดการกัดในลักษณะแบบแอนไอโซทรอปิกสูงมาก สารละลายบางตัวเท่านั้นที่จะทำให้เกิดการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกได้ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซ (KOH), เอธิลีนไดแอมมีน ไพโรคาทิคอล (EDP) และเตตระเมธิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) การกัดซิลิคอนระนาบ (100) จะมีลักษณะเป็นร่องรูปตัวยูดังในรูปที่ 2.8 [14]



รูปที่ 2.8 ลักษณะการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก

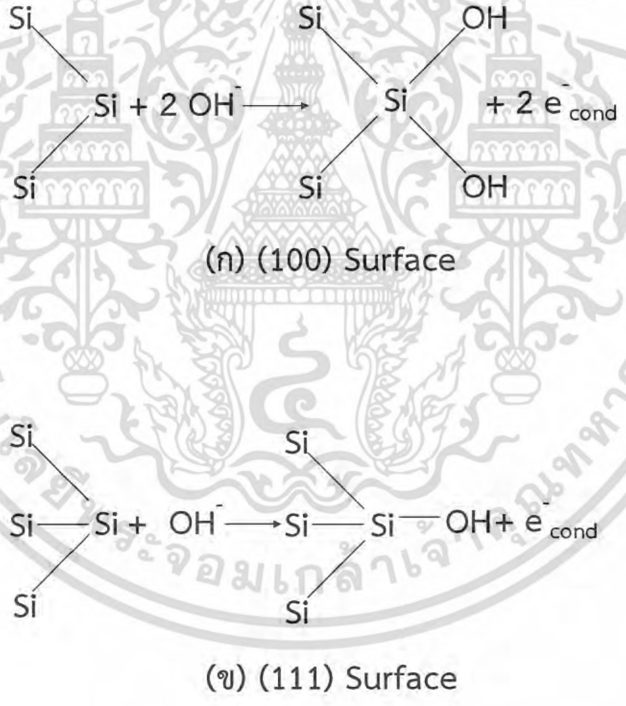
กลไกของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (Mechanism of Anisotropic Etching)

การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกมีรายละเอียดเป็นอัตราการกัด, การเกิดปฏิกิริยาและพื้นผิวของวัสดุ แสดงให้เห็นว่ากลไกที่ซับซ้อนมีส่วนร่วมในการกัดซิลิคอนในสารละลายที่เป็นด่าง รูปแบบของกลไกนั้นมีปัจจัยอยู่ 3 แบบ (1) สาเหตุทางกายภาพของความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกต่างในอัตราการกำจัดอะตอมจากพื้นผิวของผลึกทิศทางที่แตกต่างกัน (2) กระบวนการเกี่ยวกับการเคลื่อนไหวที่เป็นสาเหตุทางกายภาพและ (3) สภาพพื้นผิวที่กำหนดอัตราการกำจัดอะตอมพื้นผิว

ทางกายภาพในด้านแรกคือส่วนใหญ่เชื่อที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎี back-bond strength นั่นคืออะตอมในพื้นผิวของระนาบ (111) มีสามพันธะเชื่อมต่อกับตาข่ายพื้นผิว ในขณะที่พื้นผิวของระนาบ (100) นั้นมีเพียงสองพันธะที่ยึดเกาะอยู่ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.9 พันธะของอะตอมซิลิกอนบนพื้นผิวจะถูกสารละลายชนิด OH^- ดึงออกจากการยึดเกาะของพันธะ จำนวนของพันธะหลัก (back-bond) และความแข็งแรงของพันธะบนพื้นผิวเพื่อที่จะเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกันของพื้นผิวของผลึก นี้คือสาเหตุพื้นฐานทางกายภาพของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก



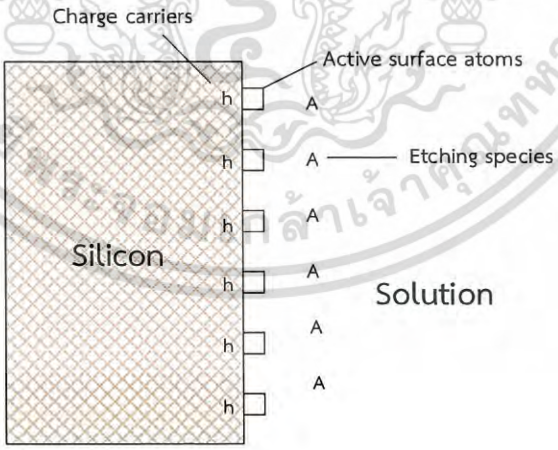
รูปที่ 2.9 แผนผังของพันธะซิลิคอน (ก) ระนาบ (100) และ (ข) ระนาบ (111)

โดยทั่วไปดังแสดงในรูป 2.10 อาจจะมี 3 ส่วนในเกิดปฏิกิริยาของการกัด ชนิดนี้ในรูปแบบของการจ่ายประจุพาหะนั้นคืออิเล็กตรอนและโฮลที่อยู่บนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ ชนิดของสารเคมีที่มีผลต่อพื้นผิวของวัสดุ เช่น OH^-, NO_3^- และH_2O และอะตอมซิลิกอนบนพื้นผิวที่ใช้งานซึ่งเหมาะสำหรับการเกิดปฏิกิริยาและการกำจัด ซึ่งแตกต่างจากอีกสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดที่จ่ายประจุพาหะอาจจะหรืออาจจะไม่ได้เกี่ยวข้องกับการขึ้นอยู่กับว่าเป็นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของธรรมชาติ ความเข้มข้นของแต่ละชนิดนี้จะถูกกำหนดโดยกระบวนการที่แตกต่างกัน เช่น การแพร่กระจาย (diffusion) การโยกย้าย (migration) การดูดซับ (adsorption) และการจับกันในลักษณะเครือข่ายของโมเลกุลตัวทำละลายกับโมเลกุลในสารละลาย (solvation) โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นของอะตอมซิลิคอนบนพื้นผิวที่ใช้งานขึ้นอยู่กับทิศทางของผลึก

การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลายที่เป็นด่างที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของซิลิคอนที่มีออกไซด์ การเกิดของฟิล์มออกไซด์ขึ้นจะปกปิดบนพื้นผิวของวัสดุซึ่งมีทิศทางที่แตกต่างกันและจะทำให้มีผลต่อการกัดแบบไอโซทรอปิก นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าถึงแม้จะทำการกัดแบบไอโซทรอปิกอาจเกิดขึ้นภายใต้การควบคุมการแพร่กระจายอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหรือการควบคุมการใช้งานของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกสามารถเกิดขึ้นโดยกระบวนการที่มีการควบคุมพื้นผิวอย่างน้อยสำหรับการกัดพื้นผิว การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกไม่เกิดขึ้นเมื่ออัตราการกัดทั้งหมดของพื้นผิวรวมทั้งสารละลายที่มีอัตราการกัดช้าที่สุดจะขึ้นอยู่กับสารละลาย ไม่ว่าจะเป็นการจ่ายประจุพาหะที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาการกัด ประจุพาหะที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการกัดแบบไอโซทรอปิกในสารละลาย HF แต่ไม่ได้ในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกในสารละลาย KOH [15]

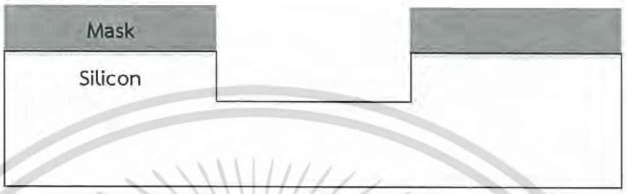


รูปที่ 2.10 การเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของซิลิคอน โดยที่ h คือ ประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำ รูปสี่เหลี่ยม คือ อะตอมซิลิคอนบนพื้นผิว และ A คือ สารละลายใช้ในการกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การกัดแบบแห้ง

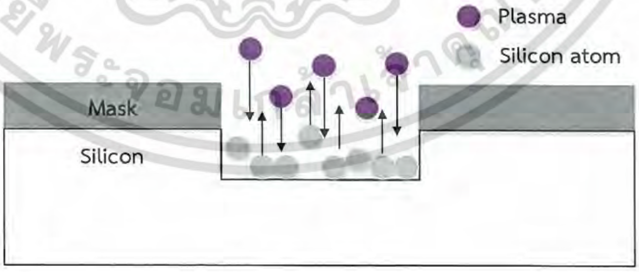
ในกระบวนการกัดแบบแห้งนี้ใช้พลาสมาหรือก๊าซในการกัดบนพื้นผิวของวัสดุ การเกิดปฏิกิริยาขึ้นโดยใช้พลังงานของอนุภาคที่เกิดการเคลื่อน และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี จะมีลักษณะการกัดแบบแห้งดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะการกัดแห้ง

(1) การกัดแบบพลาสมา (Plasma etching)

กระบวนการนี้จะมีการกำเนิดพลาสมาที่ความดันต่ำโดยใช้แหล่งจ่ายกระแสสลับย่านความถี่วิทยุ 13.56 เมกะเฮิรตซ์ พลาสมาที่เกิดขึ้นจะมีไอออนบวกและลบ ไอออนบวกจะกระจายตัวไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการกำจัดออก เมื่ออนุภาคที่มีพลังงานสูงนั้นหลุดออกมาจากอะตอมบนพื้นผิวของวัสดุจะระเหยไป จะไม่มีการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีดังนั้นจะเกิดปฏิกิริยาทางกายภาพดังรูปที่ 2.8 ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องจักรที่ใช้มีความสามารถกำเนิดพลาสมาที่มีความหนาแน่นสูง



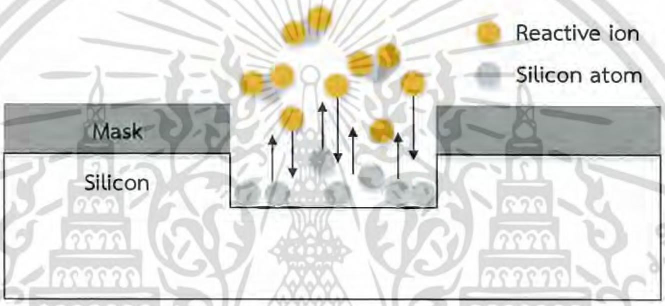
รูปที่ 2.12 การกัดด้วยพลาสมา อะตอมของซิลิคอนระเหยออกจากพื้นผิว

(2) การกัดด้วยสารเคมีแบบแห้ง (Chemical dry etching)

การกัดด้วยสารเคมีแบบแห้งนั้นจะไม่ใช้สารเคมีที่เป็นของเหลว หรือที่เรียกว่า vapor phase etching กระบวนการนี้จะเกี่ยวข้องกับระหว่างปฏิกิริยาทางเคมีกับการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัดด้วยก๊าซบนพื้นผิวหน้าของวัสดุ กระบวนการกัดทางเคมีนั้นมักจะเกิดเป็นลักษณะของไอโซ-ทรอปิกและเป็นการกัดที่มีเทคนิคขั้นสูง การกัดแห้งแบบแอนไอโซทรอปิกสามารถกัดที่ความละเอียดมากและอัตราการกัดที่สูงกว่าการกัดแบบไอโซทรอปิก เนื่องจากการกัดแบบแห้งสามารถหลีกเลี่ยง undercutting ได้ ในรูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการกัดแบบแห้ง โดยสารเคมีที่ใช้ในการกัดแบบแห้ง คือ เตตระฟลูออโรมีเทน (:tetrafluoromethane : CH_4), ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (sulfur hexafluoride : SF_6), ไนโตรเจนไตรฟลูออไรด์ (nitrogen trifluoride : NF_3), ก๊าซคลอลีน (chlorine gas : Cl_2) หรือ ฟลูออรีน (fluorine : F_2) เป็นต้น [16]



รูปที่ 2.13 การกัดด้วยสารเคมีแบบแห้ง อะตอมของซิลิคอนทำปฏิกิริยากับไอออนปฏิกิริยาบนพื้นผิว

(3) การกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive Ion Etching : RIE)

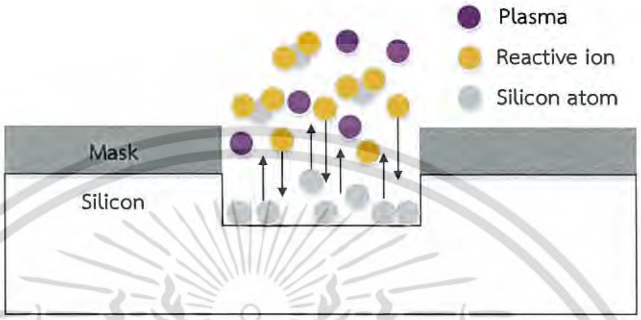
การกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยาจะใช้ปฏิกิริยาทางกายภาพและทางเคมี กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่มีความหลายหลากและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในทางด้านอุตสาหกรรม กระบวนการนี้จะปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเร็วมาก การชนกันของอนุภาคที่มีพลังงานสูงจากไอออไนซ์จะช่วยให้สารละลายแตกตัวและทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของวัสดุ

การเกิดส่วนไวต่อปฏิกิริยา (active species generation) เมื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนอย่างน้อยหนึ่งตัวในระบบอิเล็กตรอนจะถูกสนามไฟฟ้าเร่งจนมีพลังงานขนาดเพียงพอแก่การเกิดไอออไนซ์ การชนกับโมเลกุลของก๊าซจะทำให้เกิดพลาสมาที่เรืองแสง ซึ่งประกอบไปด้วยทั้งส่วนที่เป็นประจุบวก ประจุลบ อิเล็กตรอนและส่วนที่เป็นกลางทางไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะมีสภาพคล่องสูงกว่าประจุบวก ดังนั้นจะแพร่ออกสู่ผิวหน้าของวัตถุได้เร็วกว่า ผิวหน้าของวัตถุมีศักดาเป็นลบเมื่อเทียบกับพลาสมา การแยกสภาพขั้วออกจากกันจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นระหว่างหมู่พลาสมาและฐานรอง โดยออกจากพลาสมาไปสู่ผิวหน้าของวัตถุ ไอออนที่เกิดมีประจุหลุดออกจากผิวหน้าของวัตถุ แต่ส่วนของพลาสมาที่มีสภาพเป็นกลางจะไม่เคลื่อนที่ตามสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ก๊าซส่วนหนึ่งที่ถูกไอออไนซ์แล้วนั้นจะเป็นส่วนที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีซึ่งเรียกว่าส่วนไวต่อปฏิกิริยา (reactive species) เช่น ไอออนของฟลูออไรด์ (SF_6) และไอออนของคลอรีน (CF_4) [17]



รูปที่ 2.14 การกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยา

2.3 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย TMAH

การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกนั้นจะมีอัตราการกัดที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับระนาบของผลึกซิลิคอน และสารละลายที่ใช้ในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกมักจะเป็นสารละลายที่มีหมู่ OH เป็นส่วนประกอบแต่สารละลายที่ใช้กันส่วนมาก คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH), เอธิลีนไดแอมมีน ไพโรคาทิคอล (EDP) และเตตระเมธิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ในวิทยานิพนธ์นี้จะอธิบายเกี่ยวกับ TMAH เท่านั้น

สารละลายเตตระเมธิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ สูตรทางเคมี $(CH_3)_4NOH$ เป็นสารละลายที่มีโครงสร้างของไฮดรอกไซด์ (quaternary ammonium hydroxide) มากที่สุดและเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกในซิลิคอน มีอัตราการกัดออกไซด์ที่ต่ำมากและจะไม่กัดอลูมิเนียมถ้ามีซิลิเกตจำนวนมากพอ สารละลาย TMAH เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายถึงแม้จะมีราคาที่สูงเพราะเป็นสารละลายที่ไม่เป็นอันตรายหรือไม่มีพิษและเป็นสารละลายที่สามารถใช้กับงาน CMOS ได้ซึ่งมีอัตราการกัดซิลิคอนในระดับปานกลาง-สูง สารละลาย TMAH ที่ทำการกัดซิลิคอนนั้นพื้นผิวจะมีลักษณะขรุขระ แต่เมื่อเจือสารละลาย TMAH ด้วยปริมาณที่เหมาะสมของกรดซิลิสิค (silicic acid) และแอมโมเนียมเปอร์ออกไดซัลเฟส (ammonium peroxodisulphate : AP, $(NH_4)_2S_2O_8$), ผสมให้ลดการกัดอะลูมิเนียมที่สมบูรณ์พร้อมกับพื้นผิวที่เรียบ [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
148685

ตารางที่ 2.1 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลาย TMAH

สารละลาย	อุณหภูมิ (°C)	ระนาบ	อัตราการกัด (μm/min)	หมายเหตุ
22% TMAH	90	(100) (110) (111)	0.9 1.8 0.018	(110) เป็นระนาบที่เร็วที่สุดโดยไม่ต้องลดแรงตึงผิว
10% TMAH: 90% H_2O	60 70 80 90 80	(100) (111)	0.28 0.41 0.72 1.2 0.014	
2% TMAH: 98% H_2O	80	(100) (111)	0.65 0.41	
5% TMAH: 95% H_2O	60 70 80 90 60 70 80 90 60 80 90	(100) (110) (111) 	0.33 0.48 0.87 1.4 0.64 0.74 1.4 1.8 0.026 0.013 0.034	
22% TMAH + 0.5% surfactant	90	(100) (110) (111)	0.6 0.12 0.01	(100) ได้เร็วที่สุดด้วยสารลดแรงตึงผิว
22% TMAH + 1% surfactant	90	(100) (110) (111)	0.6 0.1 0.009	ลดแรงตึงผิวอิ่มตัวผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตารางที่ 2.1 แสดงอัตราการกัดซิลิคอนของสารละลาย TMAH สารละลายที่มีความเข้มข้น 4% จะมีอัตราการกัดที่เป็นอิสระ อัตราการกัดซิลิคอนในระนาบ (100) และ (110) จะลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายที่สูงขึ้น แต่อัตราการกัดจะเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มปริมาณของซิลิคอนที่ละลายในสารละลาย สารละลายจะเลือกกัดระนาบอื่นๆ มากกว่าระนาบ (111) เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลาย KOH อัตราส่วนของอัตราการกัดในระนาบ (100)/(111) ที่มีความเข้มข้นของสารละลายที่แตกต่างกันและที่อุณหภูมิต่ำๆ จะมีความเข้มข้นของสารละลาย 25% [19]

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการกัดของสารละลาย EDP, KOH และ TMAH ในตารางที่ 2.2 การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกจะมีอัตราการกัดที่มากหรือน้อยขึ้นกับชนิดของวัสดุ เช่น ซิลิกอนออกไซด์ ซิลิคอนไนไตรด์และโลหะอะลูมิเนียม การหยุดการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกโดยการเจือสารโบรอนมากในซิลิคอน (P^{++} etch stop) หรือรอยสัมผัส P-N (electrochemical etch stop) ปริมาณของโบรอนจะมีผลต่ออัตราการกัดของซิลิคอน ซึ่งทำให้อัตราการกัดนั้นลดลง

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบอัตราการกัดของสารละลาย

	EDP	KOH	TMAH
Si etch rate (μm/min)	0.75-1.25	1-2	≈1
SiO_2 etch rate (nm/min)	1-80	1-10	0.05-0.25
Si_3N_4 etch rate (nm/min)	0.1	very low	0.05-0.25
(100)/(111) etch ratio	35	400	10-35
Si roughness	low	very low	moderate
Al selectivity	no[(1)]	no	yes[(2)]
P^{++} etch stop [cm^{-3}]	$B>7\times10^{19}$ ER/50[(3)]	$B>10^{20}$ ER/20	$B>2\times10^{20}$ ER/40
Alkali ions	no	yes	no
Cost	high	low	moderate
Disposal	easy	difficult	moderate
Safety	low	moderate	high

(1) One specific formulation does not attack Al

(2) If specific amounts of silicon are dissolved in the etching solution

(3) Silicon etch rate divided by 50 if Boron doses higher than 7×10^{19} cm^{-3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกัดของสารละลายแต่ละชนิดนั้นมีข้อดีละข้อเสียแตกต่างกัน การกัดด้วยสารละลาย KOH นั้นเป็นที่รู้กันดีว่าจะเลือกกัดที่ระนาบ (111) มากกว่าระนาบ (100) เมื่อเปรียบเทียบกัน ในการผลิตจะกำหนดและควบคุมการกัดบนพื้นผิวของวัสดุ แต่สารละลาย KOH ไม่สามารถนำมาใช้ในงานจำพวก CMOS เนื่องจากอาจมีสารตกค้างอยู่พื้นผิวของวัสดุเป็นไอออนด่าง (โพแทสเซียม) ซึ่งสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและการกัดกร่อนอะลูมิเนียม สารละลาย EDP จะมีความน่าสนใจเนื่องจากในขณะที่ทำการกัดนั้นจะไม่มีโซเดียมหรือโพแทสเซียมไอออนตกค้างอยู่บนพื้นผิวของวัสดุ แต่ไม่เลือกกัดอะลูมิเนียม (ยกเว้นในสูตรเฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่ง) และมีข้อเสียอย่างอื่นสารละลาย EDP จะเป็นพิษและอันตรายมากมีความยุ่งยากในการจัดการ ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับกับการใช้ในงานพวก CMOS ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่สะดวกต่อการจัดการกับสารพิษ สารละลาย TMAH นี้จึงเหมาะสมสำหรับทำงานวิจัยและเป็นสารลายที่รู้จักกันดีเพราะสารละลาย TMAH จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสร้าง IC เป็นการพัฒนาของ positive photoresist อัตราการกัดซิลิคอนนั้นอยู่ในระดับธรรมดา สารละลาย TMAH เหมาะสำหรับการใช้ในงานพวก CMOS ไม่มีพวกไอออนด่างตกค้างบนพื้นผิวของวัสดุ ถ้าละลายสารเจือเพื่อทำการลดอัตราการกัดอะลูมิเนียมจะช่วยให้อะลูมิเนียมยังคงอยู่ ข้อเสียของสารลาย TMAH จะทำการกัดระนาบ (111) ต่ำมากและลักษณะพื้นผิวที่ผ่านการกัดจะขรุขระกว่าการกัดแบบทั่วไปอื่นๆ [20]

2.4 การกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก

2.4.1 ปฏิกิริยาการกัดซิลิคอน

การกัดซิลิคอนด้วยวิธีที่ประสบความสำเร็จที่สุด คือ การกัดซิลิคอนด้วยสารเคมีหรือกัดด้วยพลาสมา สารเคมีที่กัดกร่อนซิลิคอนได้นั้นมีมากมาย แต่ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยด่างผสมกับน้ำ เช่น โพรแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH), เอธิลีนไดแอมมีน (Ethylenediamine), ไฮดราซีน (Hydrazine), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ เตตระเมธิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ส่วนก๊าซที่ใช้กัดในพลาสมา ได้แก่ CF_4, SF_6, Cl_2 และก๊าซฮาโลหรือฟลูออโรคาร์บอนอื่นๆ เป็นต้น สารละลายการกัดดังกล่าวเหล่านี้มีทั้งที่มีคุณสมบัติไอโซทรอปิกหรือแอนไอโซทรอปิก อัตราการกัดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรืออุณหภูมิของสารละลาย สารละลายการกัดเหล่านี้จะกัดวัสดุต่างๆ กันได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นการเลือกสารละลายการกัดที่เหมาะสมจึงมีความจำเป็นด้วย

การกัดซิลิคอนนั้นมีขั้นตอนหลักอยู่ 4 ขั้นตอน

(1) โฮลจากสารละลายเข้าสู่ซิลิคอน เพื่อยกระดับสถานะออกซิเดชัน (oxidation state) ของซิลิคอนเป็น Si^+

(2) การรวมตัวของอะตอม OH^- และซิลิคอนประจุบวก เป็นซิลิคอนออกไซด์ที่ละลายน้ำได้

(3) การรวมตัวของซิลิคอนและองค์ประกอบในสารละลายกลายเป็น complexing agent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) การดึงซิลิคอนที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายออกสู่น้ำ ทำให้ซิลิคอนถูกกัดออกไป

จากขั้นตอนทั้งสี่ สารเคมีที่จะกัดซิลิคอนได้ต้องแตกตัวให้โฮลกับซิลิคอนและตัวมันเองต้องมีอะตอมไฮดรอกซิลเกิดขึ้นรวมทั้ง complexing agent นั้นต้องสามารถละลายน้ำได้

สำหรับปรากฏการณ์การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกในสารละลายเตตระเมธิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) นั้น มีกลไกกระบวนการกัดดังนี้

(1) สารละลาย TMAH จะลดรูปเป็นไอออนไฮดรอกซิล
(2) อะตอมไฮดรอกซิลจะเข้าจับกับแขนว่าง (dangling bond) ของซิลิคอน สำหรับแขนยื่นของซิลิคอนในระนาบ (100) มีสองแขน ในขณะที่เพียงแขนเดียวในซิลิคอนระนาบ (111) ขั้นตอนนี้ใช้พลังงานไอออนไนเซชั่นเพียง 0.35 อิเล็กตรอนโวลต์ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก
(3) พันธะซิลิคอนหลัก (back bond) ที่ยังไม่ถูกกัดออกไป (เท่ากับ 2 สำหรับระนาบ (100) และเท่ากับ 3 สำหรับระนาบ (111)) จะถูกดึงออกเพื่อรวมตัวกลายเป็น $Si(OH)^{+}_{2}$ หรือ $SiOH^{3-}$ (เรียกว่า ซิลิคอนไฮดรอกไซด์) ปฏิกิริยานี้ถ้าให้พลังงานแก่ผลึกต่างกัน อัตราส่วนการกัดของระนาบต่างๆ จะไม่เท่ากัน ที่อุณหภูมิใกล้จุดเดือดอัตราการระนาบ (110) : (100) : (111) เท่ากับ 160 : 100 : 1 แต่ที่อุณหภูมิห้องจะกับ 50 : 30 : 1
(4) ซิลิคอนไฮดรอกไซด์ดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับอะตอมไฮดรอกซิลกลายเป็นกรดออโธซิลิค (orthosilic acid) ซึ่งจะเกิดที่ผิวหน้าและถูกดึงออกสู่สารละลาย
(5) กรดออโธซิลิคแตกตัวเพื่อรวมกับน้ำ เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการเคมีนี้

$$(CH_3)_4NOH \rightarrow (CH_3)_4\,N^+ + OH^- \quad (2.7)$$

$$Si + 2OH^- \rightarrow Si(OH)_2^{2+} + 4e^- \quad (2.8)$$

$$4H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- + 2H_2 \quad (2.9)$$

$$Si(OH)_2^{2+} + 4(OH)^- \rightarrow SiO_2(OH)_2^{2-} + 2H_2O \quad (2.10)$$

$$Si + 2OH^- + 4H_2O \rightarrow Si(OH)_2^{2+} + 2H_2 + 4OH^- \quad (2.11)$$

2.4.2 โครงสร้างอะตอมของซิลิคอน

ในระนาบต่างๆ ของซิลิคอน จะมีจำนวนพันธะที่ถูกกัดออกไปก่อนหน้า (เหลือเป็นแขนยื่น) จำนวนพันธะที่กำลังถูกกัด และจำนวนพันธะที่ถูกดึงออกสู่สารละลายเป็นขั้นตอนต่อไปไม่เท่ากัน กล่าวคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

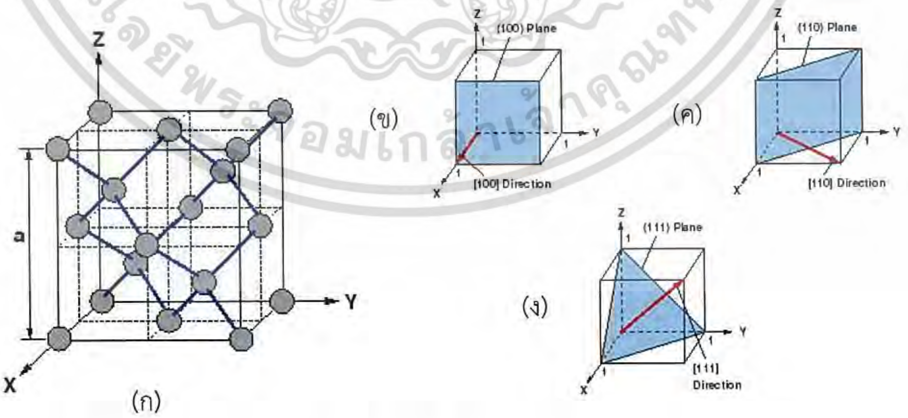
(1) ระนาบ (100) อะตอมที่ถูกกัดจะมีสองอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าระนาบและมีสองอะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า ดังนั้นการที่ถูกดึงอะตอมจากผิวหน้าต้องมีการทำลายพันธะถึงสองพันธะ

(2) ระนาบ (111) จะมีสามอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้า และมีหนึ่งอะตอมถูกตัดออกไปก่อนหน้านี้จึงเป็นระนาบที่แข็งแรงที่สุด

(3) ระนาบ (110) จะมีสามอะตอมอยู่ที่ผิวหน้า หนึ่งอะตอมอยู่ใต้ผิวหน้าและหนึ่งอะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า แม้ว่าจะมีสองอะตอมที่มีพันธะร่วมกับ อะตอมตรงกลางที่อยู่บนผิวหน้า แต่ก็ล้วนเป็นอะตอมที่อยู่ผิวหน้าด้วยกันจึงจะถูกกัดออกไปพร้อมกัน

สารละลายซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของ สารละลาย เตตระเมธิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และ น้ำปลอดประจุ มีชื่อย่อว่า (TMAH) เป็นสารละลายที่มีคุณสมบัติการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก อัตราการกัดของ TMAH ในผลึกซิลิคอนในระนาบต่างๆ เรียงเป็นลำดับดังนี้ (100) > (110) > (111) [12]

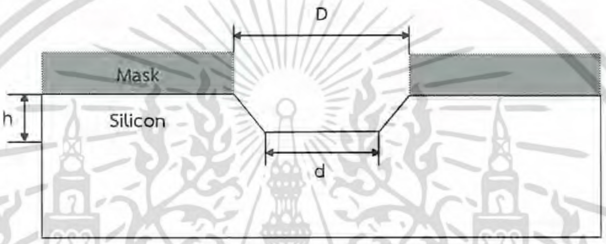
เนื่องจากสารละลาย TMAH เป็นสารละลายที่ทำการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก โครงสร้างของสารละลาย TMAH ต้องเพิ่มอุณหภูมิช่วยในการกัดระนาบของซิลิคอน เพื่อให้สารละลาย TMAH ทำการกัด ควรรู้ว่าโครงสร้างผลึกของซิลิคอน คือแบบเพชรมีค่าคงที่ของโครงสร้างอะตอมประกอบเท่ากับ 5.43 A เป็นโครงสร้างแบบ Face Centred Cubic (FCC) แต่มีอะตอมสองอะตอมในหน่วยเซลล์ ในรูปที่ 2.15 โครงสร้างอะตอมของซิลิคอนและ ระนาบต่างๆของผลึกซิลิคอน



รูปที่ 2.15 (ก) ซิลิคอนมีลักษณะโครงสร้างเป็น FCC (face-centered cubic)
(ข) พันธะในอะตอมซิลิคอนระนาบ (100)
(ค) พันธะในอะตอมซิลิคอนระนาบ (110)
(ง) พันธะในอะตอมซิลิคอนระนาบ (111)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่องรูปตัวยูที่เกิดจากการกัดเมื่อเปิดช่องเลือกกัดบนระนาบผลึกที่ไม่เหมือนกัน จะมีความแตกต่างกัน แต่ผนังที่เกิดขึ้นก็คือระนาบที่มีอัตราการกัดช้าที่สุด สำหรับแผ่นผลึกซิลิกอนระนาบ (100) ถ้าเปิดช่องเลือกกัดเป็นวงกลม ร่องรูปตัวยูที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยผนังสองด้านเอียงทำมุม 54.74 องศาขนานกับพื้นระนาบ (100) แนวขอบผนังขนานกับทิศทาง (110) ระนาบนั้นคือระนาบ (111) และยังมีระนาบ (100) ร่วมกันประกอบเป็นผนัง แต่ถ้าเปิดบริเวณเลือกกัดเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีด้านทั้งสี่ขนานกับทิศทาง (110) จะได้ผนังสี่ด้านเป็นระนาบ (111) ทั้งหมด พื้นที่หลุมจะเป็นระนาบ (100) โดยความสัมพันธ์ของเลขาคณิตที่แน่นอนของระนาบ (100) และระนาบ (111) ดังรูปที่ 2.16 การกัดของระนาบ (100)



รูปที่ 2.16 ลักษณะของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกของระนาบ (100)

$$D = d + \frac{2h}{\tan(54.74°)} \cong d + \sqrt{2}h \tag{2.12}$$

$$h = Rt \tag{2.13}$$

โดยที่ D คือ ขนาดของความกว้างของปากหลุม

d คือ ขนาดของความกว้างในหลุม

h คือ ขนาดความลึกของหลุม

R คือ อัตราการกัดในแนวดิ่งของซิลิคอน

t คือ เวลา

2.4.3 ปฏิกิริยาการกัดอะลูมิเนียม

การกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิกมีความสำคัญมีความต้องการเลือกใช้อะลูมิเนียมเป็นชั้น metallization ฟิล์มอะลูมิเนียมจะถูกควบคุมด้วยสารละลายที่เป็นกรดและด่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงอะลูมิเนียมไม่สามารถรักษาได้เพราะชั้นออกไซด์มี $Al(OH)_3$ ซึ่งทำปฏิกิริยาในสารละลายด่างอลูมิเนียมดังสมการที่ (2.14)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Al(OH)_3 + OH^- \leftrightarrow Al(OH)_4^- \qquad (2.14)$$

การลดลงของค่าความกรด-ด่าง โดยซิลิคอนการเปลี่ยนแปลงสมดุลเคมีไปทางด้านซ้ายของสมการเกิดปฏิกิริยาการเลือกของอะลูมิเนียมออกไซด์ในการกัดด้วยสารละลาย TMAH เพิ่มขึ้นด้วยซิลิคอนเราได้พิจารณาแล้วว่าในช่วงการตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลาย TMAH เป็นซิลิคอนเสมอจำเป็นสำหรับฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ซิลิเกตในสารละลายที่ทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium hydroxide : $Al(OH)_3$) ในรูปแบบซิลิเกต (pyrophyllite-type) ที่ละลายได้น้อยซึ่งพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ [21]

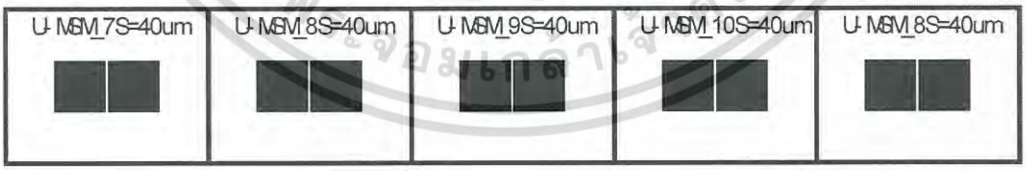
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบและกระบวนการสร้าง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM) แบบร่องรูปตัวยู (U-Shape) หรือ UMSM เป็นโครงสร้างที่สามารถสร้างได้ง่ายด้วยกระบวนการสร้างที่ใช้แผ่นกระจกต้นแบบเพียงแผ่นเดียว โดยมีการออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 40-100 ไมโครเมตร และมีความลึกที่แตกต่างกัน

3.1 การออกแบบ

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ U-Shape หรือ UMSM ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียม-เอ็นซิลิคอน-อะลูมิเนียม ซึ่งวัสดุที่ใช้นี้สามารถหาได้ง่ายและยังเป็นวัสดุที่สำคัญในการสร้างวงจรรวม เริ่มการออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบเพื่อทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกก่อนกระบวนการสร้างทั้งหมด การออกแบบนั้นจะใช้เงื่อนไขคือมีลักษณะของขั้วไฟฟ้าขนาด 1×1 ตารางมิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (electrode spacing : S) มีขนาด 40-100 ไมโครเมตร ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบเป็นชนิดที่ใช้กับน้ำยาไวแสงชนิดบวก (positive) โดยใช้โปรแกรม Corel DRAW X5 Graphic จากนั้นนำไฟล์ข้อมูลที่ได้ทำการออกแบบพิมพ์ลงบนแผ่นฟิล์มด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ด้วยความละเอียดสูง แล้วนำแผ่นฟิล์มที่ได้ ไปติดบนกระจกใส เพื่อสร้างเป็นกระจกต้นแบบสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างต่อไป โดยลวดลายที่ได้ทำการออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลวดลายกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM

3.2 เงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการกัดแผ่นผลึกซิลิคอน

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้มีการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงมีการเลือกใช้เงื่อนไขที่มีความเหมาะสมสำหรับการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยการกัดซิลิคอนเป็นร่องลึกนี้ โดยใช้กระบวนการกัดแบบเปียกในสารละลายเตตระเมทธิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ซึ่งสารละลายเตตระเมทธิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์นี้มีคุณสมบัติในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก คือเป็นการกัดระนาบใดระนาบหนึ่งมากกว่าอีกระนาบหนึ่ง ซึ่งจะใช้สารละลาย TMAH ที่

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้น 8.3 wt% และใช้ซิลิคอนผงผสมลงไปในสารละลายเป็นจำนวน 37.5 กรัมต่อลิตร ใช้อุณหภูมิในการกัด 80 องศาเซลเซียส [20] จะได้อัตราส่วนที่สามารถสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูในงานวิจัยนี้ได้

3.3 กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างเริ่มจากใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ที่มีระนาบ (100) และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า 75-95 โอห์ม-เซนติเมตร เพื่อใช้ในการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมโดยใช้กระบวนการสปัตเตอร์

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นผลึกซิลิคอน

ก่อนนำแผ่นผลึกซิลิคอนเข้าสู่กระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมจำเป็นต้องทำการเตรียมแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยการทำความสะอาด เพื่อป้องกันสิ่งสกปรกจากภายนอกเข้ามาปนเปื้อนซึ่งในการทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้นนั้น มีขั้นตอนดังนี้

- อุลตร้าโซนิค (ultrasonic) ในน้ำบริสุทธิ์ (de-ionization:DI) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดฝุ่นละออง
- จุ่มใน DI แก้ว 1
- เป่าแห้งด้วยก๊าซเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)
- ต้มในกรดไนตริก (nitric acid:HNO_3) จำนวน 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกโลหะ
- จุ่มในน้ำ DI 1 แก้ว
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที (กรด Nitric ละลายในน้ำร้อนได้ดี)
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคโลเอทธิลีน (Trichloroethylene) 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกคราบไขมัน
- Ultrasonic ในอะซิโตน (Acetone) 3 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3.2.2 กระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียม

ในกระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมจะสร้างด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง เป็นกระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมให้มีความหนา 2 ไมโครเมตร โดยอาศัยหลักการที่อะตอมของผิวหน้าสารเคลือบซึ่งใช้อะลูมิเนียมเป็นเป้าถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง เช่น อนุภาคของก๊าซอาร์กอน (Ar^+) จากนั้นอะตอมที่หลุดออกจากเป้าสารเคลือบจะวิ่งมาเคลือบบนแผ่นผลึกซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการสร้างลวดลายของชิ้นงานเพื่อสร้างลวดลายขั้วโลหะโครเมียมด้วยกระจกต้นแบบ ที่เรียกว่า โฟโตมาส์ค (photomask) ซึ่งมีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจก ที่ได้มาจากการออกแบบ แสงที่ฉายผ่านกระจกโฟโตมาส์คจะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลาย (สีดำทึบ) แสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสงจึงมีบางบริเวณที่ถูกแสง และบางบริเวณที่ไม่ถูกแสง ปฏิกิริยาเคมี-แสงที่เกิดขึ้น จะทำให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไป และแตกต่างกันตามชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อนำแผ่นผลึกนี้ไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป ส่วนชั้นของน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่บนผิวอะลูมิเนียม จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นอะลูมิเนียมบริเวณนี้ถูกกัดออกไป เมื่อลอกชั้นของน้ำยาไวแสงออกก็จะปรากฏลวดลายของชั้นโลหะอะลูมิเนียมขึ้นตามลวดลายที่เราออกแบบไว้ โดยกระบวนการทั้งหมดมีขั้นตอนดังนี้

-อบแผ่นไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที

-เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ P1350 ด้วยเครื่องสปินเนอร์ด้วยความเร็ว 500 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 10 วินาที และ 2000 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 30 วินาที

-อบแผ่นครั้งแรก (Pre bake) ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงแห้ง

-ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบด้วยเครื่องปรับซ้อนมาร์ก (Mask aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 25 วินาที

-ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงโดยจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย (AZ developer) 2 แก้ว แก้วละ 15 วินาที

-จุ่มใน DI 2 แก้ว

-เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

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

-กัดชั้นฟิล์มโลหะอะลูมิเนียมในส่วนที่ไม่ต้องการอออก เพื่อสร้างเป็นขั้วไฟฟ้า โดยใช้สารละลายสะกัดชั้นอะลูมิเนียม (Al etching) ซึ่งมีส่วนผสมของ H_3PO_4 : HNO_3 : CH_3COOH : DI ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 โดยจุ่มลงในสารละลายสกัดชั้นอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 10-20 วินาที

-จุ่มใน DI 2 แก้ว

-เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

-จุ่มในอะซิโตน 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที เพื่อลอกน้ำยาไวแสงที่เหลือออก

-จุ่มใน DI 2 แก้ว

-เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 กระบวนการกัด

ในกระบวนการกัด (etching) จะใช้สารละลายเตตระเมทธิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Tetramethylammonium Hydroxide : TMAH) ผสมกับผงซิลิคอนปริมาณ 37.5 กรัมต่อลิตร เพื่อใช้ในการลดอัตราการกัดอลูมิเนียม เพื่อที่จะใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือ UMSM โดยใช้อลูมิเนียมเป็นชั้นโลหะ

-ผสมผงซิลิคอนลงใน TMAH

-ต้มสารละลาย TMAH ที่ผสมผงซิลิคอนเรียบร้อยแล้ว ที่อุณหภูมิ 80 ^{0}C

-นำแผ่น n-Si/Al ที่ได้หลังจากกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาทำการกัดด้วย HF 5 %

-จุ่มใน DI 2 แก้ว

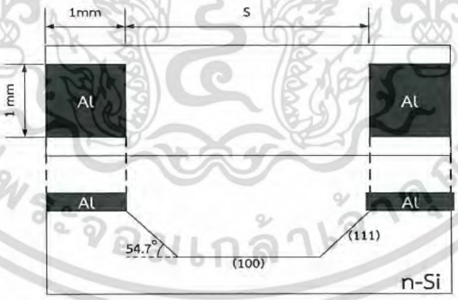
-นำแผ่น n-Si/Al มาทำการกัดด้วยสารละลาย TMAH

-จุ่มใน DI 2 แก้ว

-เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3.2.5 กระบวนการซินเตอริง

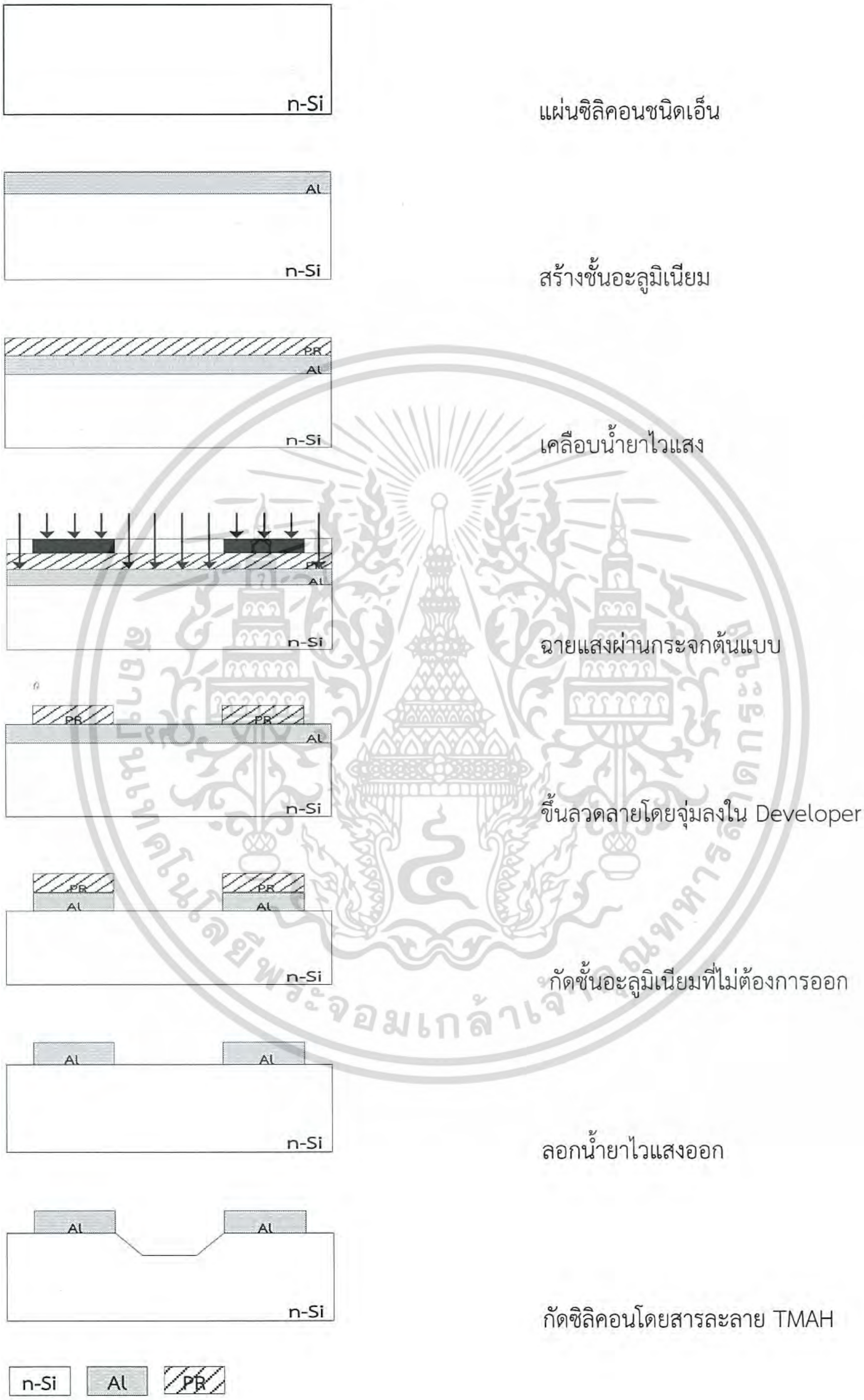
กระบวนการซินเตอริงเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้รอยสัมผัสของอะลูมิเนียมและซิลิคอนสมบูรณ์ขึ้น ด้วยการนำชิ้นงานไปไว้ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500 ^{o}C โดยมีอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 1 ลิตร/นาที เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งเป็นเงื่อนไขของเวลาที่ทำให้ได้รอยสัมผัสที่ดีและมีกระแสรั่วไหลต่ำ [22]



รูปที่ 3.2 ลักษณะโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงแบบ U-shaped

รูปที่ 3.3 ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการตัดแยกชิ้นและเชื่อมต่อขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากที่ได้ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นทั้งขณะไม่ได้รับการฉายแสง และเมื่อมีการฉายแสงด้วยความเข้มแสงค่าต่างๆ โดยใช้หลอดฮาโลเจนเป็นแหล่งกำเนิดแสง การทดลองจะแบ่งเป็น 3 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกเป็นการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลานาร์เพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ในส่วนที่สอง ว่ามีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าอย่างไร ซึ่งพบว่าตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูที่สร้างขึ้นมีค่ากระแสรั่วที่สูง อีกทั้งลักษณะพื้นผิวมีความขรุขระ จึงมีแนวความคิดในการลดปัจจัยที่เกิดขึ้น โดยในส่วนที่สามนี้เป็นการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ลงไปในสารละลายที่ใช้ในการกัดร่องรูปตัวยู

4.1 การสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลานาร์

ในหัวข้อนี้ได้ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลานาร์ เพื่อที่จะนำข้อมูลลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเช่น ค่ากระแสมืด และค่ากระแสแสงเบื้องต้นไปใช้ในการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้ากับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นจากแบบพลานาร์ โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างจากแบบพลานาร์ เป็นการกัดร่องรูปตัวยูบริเวณระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง หรือบริเวณพื้นที่รับแสงนั่นเอง

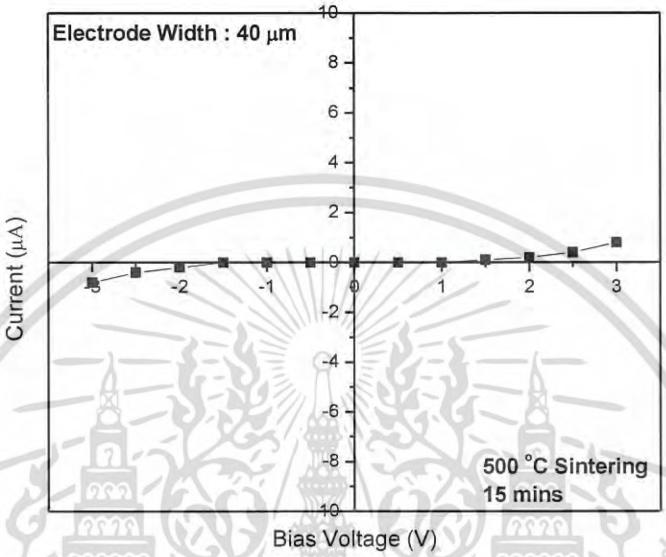
4.1.1 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลานาร์

ในรูปที่ 4.1 เป็นความสัมพันธ์ของลักษณะกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์แบบพลานาร์ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ ซึ่งมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm ใช้อุณหภูมิซินเตอริง 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที พบว่ามีค่ากระแสมืดของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 3 V มีค่าเท่ากับ 0.8 μA

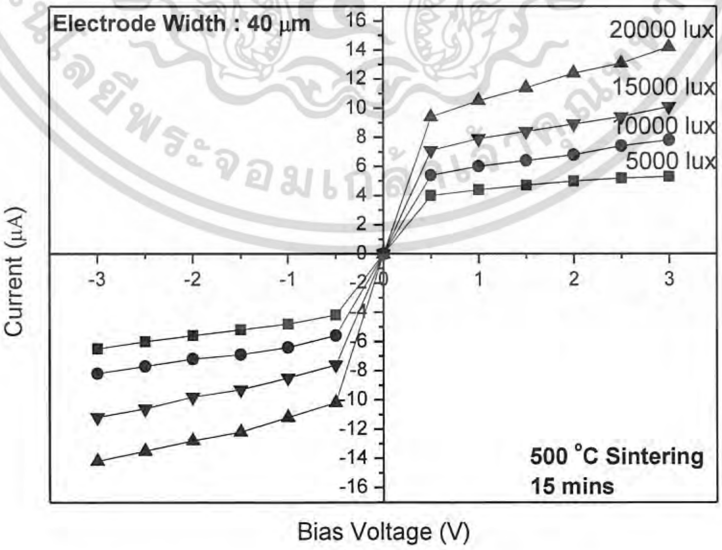
จากการทดลองในรูปที่ 4.1 จากนั้นนำตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลานาร์ที่สร้างขึ้นมาทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันภายใต้เงื่อนไขได้รับแสงตกกระทบจากหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้มแสงค่าต่างๆ ที่ความเข้มแสง 5,000 ถึง 20,000 lux ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าอุปกรณ์จะมีกระแสแสงเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาหะอิเล็กตรอน-โฮลที่มากขึ้นเมื่อได้รับความเข้มแสงเพิ่มขึ้น [23] โดยที่เมื่อให้แรงดันไบอัสเท่ากับ 3 V ที่ความเข้มแสง 5,000, 10,000, 15,000 และ 20,000 lux ตามลำดับ จะมีกระแสแสงเท่ากับ 5.3, 7.8, 10.1 และ 14.2 µA ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ลักษณะกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์แบบพลานาร์ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ



รูปที่ 4.2 ลักษณะกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์แบบพลา-นาร์ขณะได้รับแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู

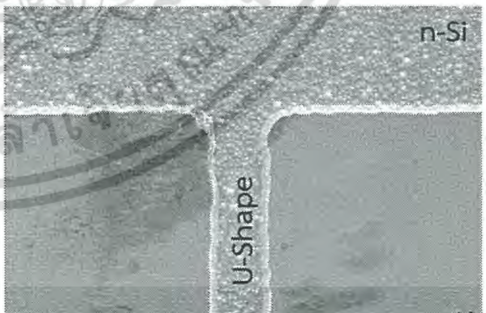
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงจากแบบเชิงราบหรือพลา-นาร์ โดยที่ตัวตรวจวัดแสงมีลักษณะโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ชนิด Al/n-Si/Al เนื่องจากโครงสร้างแบบพลานาร์นั้นมีบริเวณพื้นที่รับแสงจำกัดอยู่ที่บริเวณพื้นที่รับแสงหรือระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองเท่านั้น ในการศึกษาหัวข้อนี้จึงมีแนวความคิดในการเพิ่มพื้นที่รับแสงให้กับตัวอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงขึ้น โดยการกัดร่องรูปตัวยูบริเวณพื้นที่รับแสงนั้น

ในหัวข้อนี้ได้ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูหรือ UMSM ขึ้นโดยใช้กระบวนการกัดแบบเปียกในสารละลายเตตระเมทธิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ [TMAH] ซึ่งสารละลาย TMAH นี้มีคุณสมบัติในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก คือเป็นการกัดแบบกัดระนาบใดระนาบหนึ่งได้เร็วกว่าระนาบหนึ่ง โดยจะกัดระนาบ (100)>(111) แล้วทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู

4.2.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู

ตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นจากการทดลองในหัวข้อที่ 4.1 จะเป็นแบบพลานาร์ จากนั้นจะนำตัวตรวจวัดแสงแบบพลานาร์ที่สร้างขึ้นไปกัดร่องลึกด้วยกระบวนการกัดเปียก โดยใช้สารละลาย TMAH ซึ่งสารละลายนี้จะทำปฏิกิริยาการกัดกับแผ่นผลึกซิลิคอนทำให้ตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นมีลักษณะเป็นล่องรูปตัวยูตรงบริเวณพื้นที่รับแสงแสงหรือบริเวณระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองนั่นเอง ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูแสดงดังรูปที่ 4.3

(ก)



(ข)

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู
(ก) ภาพถ่ายด้วยกล้องไมโครสโคปกำลังขยาย 40 เท่า
(ข) ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

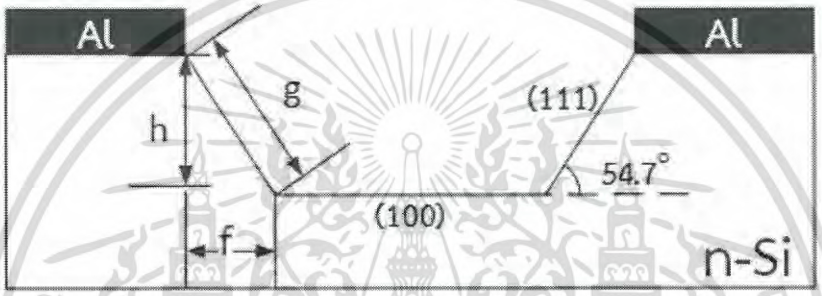
จากรูปที่ 4.3 (ก) แสดงถึงภาพถ่ายจากกล้องไมโครสโคปที่กำลังขยาย 40 เท่า แสดงให้เห็นลักษณะของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูที่ได้สร้างขึ้นโดยใช้มาส์กที่มีขนาดของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm กัดร่องรูปตัวยูโดยใช้สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 8.3 wt% ใช้ส่วนผสมของซิลิคอนผงจำนวน 37.5 g/l ผสมลงไปในสารละลาย โดยใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และใช้เวลาการกัด 15 นาที ในรูปที่ 4.3 (ข) แสดงถึงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าบริเวณผิวของซิลิคอนมีลักษณะขรุขระ ไม่ราบเรียบ ซึ่งภาพแสดงลักษณะร่องรูปตัวยูจะแสดงในรูปที่ 4.4

รูปที่ 4.4 ภาคตัดขวางจาก SEM ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

จากรูปที่ 4.4 เป็นภาพตัดขวางที่ถ่ายจาก SEM ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่กำลังขยาย 3,000 เท่า พบว่าลักษณะการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนมีลักษณะเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก ซึ่งมีลักษณะกัดทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางหนึ่ง จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าผลึกซิลิคอนระนาบ (111) และ (100) ถูกกัดออกไป โดยที่ระนาบ (100) จะถูกกัดออกไปมากที่สุด เนื่องจากอะตอมของซิลิคอนที่ถูกกัดจะมีอยู่สองอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าของระนาบและมีสองอะตอมที่ถูกกัดออกไปก่อนหน้า ดังนั้นการที่อะตอมที่ผิวหน้าถูกดึงออกไปจะต้องมีการทำลายพันธะถึงสองพันธะด้วยกัน ส่วนผลึกซิลิคอนระนาบ (111) จะถูกกัดน้อยกว่า เนื่องจากในระนาบ (111) นี้จะมีอะตอมสามอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าของระนาบและมีหนึ่งอะตอมที่ถูกกัดออกไปก่อนหน้า จึงทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นระนาบที่แข็งแรงที่สุดที่ทำให้เกิดร่องลึกขึ้น จากปฏิกิริยาดังกล่าวไว้ข้างต้นทำให้ได้เป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบกัดร่องลึก หรือลักษณะแบบ UMSM ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น จากรูปที่ 4.4 พบว่าตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นมีความลึก 2.7 μm จากการคำนวณพื้นที่ส่วนที่ราบเอียง (g) จาก g=h/sinθ จะได้พื้นที่ราบเอียงเท่ากับ 3.3 μm ที่วัดได้จาก SEM ได้ 3.4 μm ในส่วนพื้นที่ด้าน f จาก f=h/tanθ มีขนาด 1.9 μm ซึ่งที่วัดได้จาก SEM มีขนาด 2.0 μm ซึ่งค่า f และ g ที่คำนวณได้ถือว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากกับค่าที่วัดได้จาก SEM แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ส่วนที่ราบเอียง (g) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 1.7 เท่าของด้าน f แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ลักษณะของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู

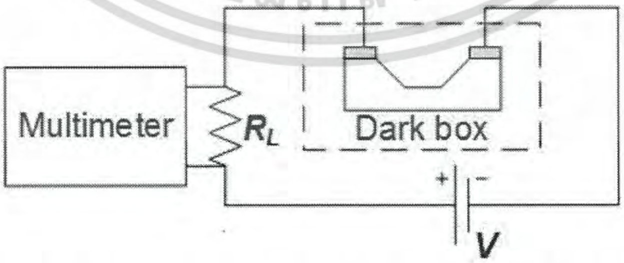
จากตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่สร้างขึ้นนี้ยังพบว่าบริเวณพื้นผิวของผลึกซิลิคอนมีความขรุขระ ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีลักษณะเป็นพีระมิดแบบสุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายพื้นผิวบริเวณพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูซึ่งมีลักษณะขรุขระ สาเหตุการเกิดพีระมิดนี้อาจเกิดได้จากข้อบกพร่องผลึกในแผ่นผลึกซิลิคอน (Defect) [25] ซึ่งบริเวณที่มีข้อบกพร่องผลึกนี้เกิดขึ้นอยู่จะโดนกัดด้วยอัตราส่วนที่น้อย ทำให้กลายเป็นยอดพีระมิดขึ้นแบบสุ่มตามตำแหน่งที่มีจุดบกพร่องผลึกอยู่ หรือเป็นไปได้ว่าอาจเกิดจากในระหว่างปฏิกิริยาการกัดมีฟองของก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นทำให้บริเวณที่เกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนไม่โดนกัดเกิดเป็นยอดของพีระมิดขึ้น [26] เป็นผลจากแรงตึงผิว [27] อาจเป็นผลจากค่า PH [28] เนื่องจากในการทดลองเราสารละลายความเข้มข้นต่ำ PH ประมาณ 12-13 ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคในการลดแรงตึงผิวบริเวณที่เกิดฟองก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งคาดว่าจะทำให้ฟองก๊าซไฮโดรเจนหลุดออกจากผิวของซิลิคอนเพิ่มขึ้น ถือเป็นการลดปัจจัยที่ทำให้เกิดพีระมิดขึ้นได้นั่นเอง ซึ่งเราสามารถกำจัดปริมาณของฟองก๊าซไฮโดรเจนได้จากการเติมสารละลายประเภทสารลดแรงตึงผิว (surfactant) เช่น ไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ ดังจะแสดงในการทดลองหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งเป็นการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ลงไปในสารละลายเพื่อลดปริมาณของพิรามิดที่เกิดขึ้น ซึ่งถือเป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดในการวิจัยในเบื้องต้นเพื่อสังเกตุการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเติมไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายพื้นผิวบริเวณพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู

4.2.2 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบ

เมื่อได้อุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูแล้วทำการหาความสัมพันธ์ของกระแสเมื่อได้รับแรงดันไบอัสเพื่อทดสอบลักษณะสมบัติของตัวอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบโดยต่อชุดการทดลองดังรูปที่ 4.7 โดยป้อนแรงดันไออัสตั้งแต่ -3 ถึง 3 V

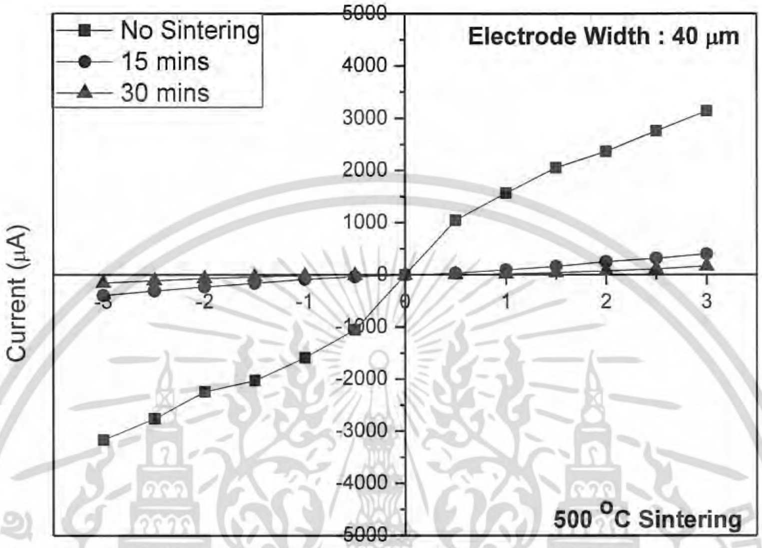


รูปที่ 4.7 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษะสมบัติกระแส-แรงดัน เมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบ

ตัวตรวจวัดแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีขั้วโลหะที่สร้างจากโลหะชนิดเดียวกัน คือ อลูมิเนียม (Al) ดังนั้นตัวตรวจวัดแสงในขณะสมดุล ตัวตรวจวัดแสงนี้จึงมีความสูงกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ของขั้วแคโทด (ϕ_{bn1}) และขั้วแอโนด (ϕ_{bn2}) มีขนาดเท่ากันหรือ $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$ แรงดันภายในของขั้วแคโทด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(V_{bi1}) และขั้วแอโนด (V_{bi2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$ และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_{d1}) และด้านแอโนด (W_{d2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $W_{d1} = W_{d2} = W_d$ ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ลักษณะสมบัติกระแสแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่เวลาซินเตอริงต่างกัน

ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสงไม่ได้รับแสงตกกระทบแต่มีการจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่ตัวตรวจวัดแสง โดยให้ขั้วโลหะด้านหนึ่งได้รับไบอัสตรง และขั้วโลหะอีกด้านหนึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ โดยขั้วโลหะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับนี้ จะส่งผลให้เกิดการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะ และมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากทางด้านโลหะ ข้ามกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ผลจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังกล่าวทำให้เกิดกระแสรั่ว หรือเรียกว่ากระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง มีทิศทางจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{sm}) ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่สามารถลดการเกิดกระแสมืดในตัวตรวจวัดแสงได้ คือกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนจากด้านโลหะไหลข้ามไปยังสารกึ่งตัวนำได้โดยง่าย

ค่าความสูงของกำแพงศักย์นี้มีผลในการลดกระแสรั่วไหลในตัวอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นได้ โดยจะทำหน้าที่ต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนจากด้านโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ถือเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการบอกระดับกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นในช็อตต์กีย์ไดโอดได้ ตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นนี้มีกระแสรั่วไหลที่ค่อนข้างสูงมากอาจเป็นไปได้จากหลายปัจจัยเนื่องจากมีกระบวนการกัดแบบเปียกเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งอาจจะมีสิ่งปนเปื้อนตามมาจากกระบวนกัดเปียกจึงส่งผลให้กระแสรั่วไหลมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่อนข้างสูง จึงมีแนวความคิดในการลดกระแสรั่วไหลขึ้นโดยใช้วิธีการเพิ่มค่าความสูงของกำแพงศักย์ขึ้น จากสมการที่ (4.2) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลต่อขนาดของกำแพงศักย์กระแสที่เกิดขึ้นในช็อตต์กีย์ไดโอดเท่ากับ

$$I = I_0\left\{\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right)-1\right\} \tag{4.2}$$

เมื่อให้แรงดัน V_A= 0 V ทำให้กระแส I มีค่าเท่ากับ I_0
โดย I_0 คือ กระแสอิ่มตัว มีค่าเท่ากับ

$$I_0 = ART^2\exp\left(\frac{-q\varphi_{bn}}{kT}\right) \tag{4.3}$$

ดังนั้นความสูงกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์จึงสามารถหาได้จาก

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

โดยที่

- k คือ ค่าคงที่ของโบลต์มันน์ มีค่าประมาณ 8.617×10^{-5} eV /K
- T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
- R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่าประมาณ 110 $A.cm^{-2}.K^{-2}$ (n-Si)
- q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าประมาณ 1.609×10^{-19} C
- A คือ พื้นที่รอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ (cm^2)

เนื่องจากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าเมื่อทำการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จะทำให้มีค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ของรอยสัมผัส Al/n-Si มีค่าประมาณ 0.72 eV [23] และเมื่อทำการซินเตอริงเป็นเวลา 30 นาที ค่ากำแพงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.86 eV [29] จะเห็นได้จากรูปที่ 4.8 ซึ่งพบว่ามีกระแสรั่วไหลลดลงเนื่องจากมีค่าความสูงของกำแพงศักย์เพิ่มขึ้นจากเวลาที่ใช้ในการซินเตอริงเพิ่มขึ้น

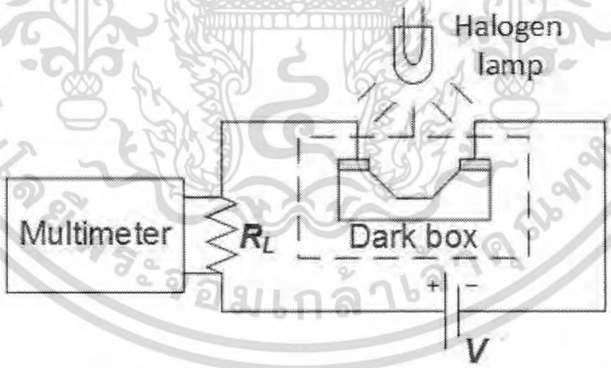
จากรูปที่ 4.8 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบกัดร่องลึกขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบ พบว่ามีกระแสรั่วไหลของอุปกรณ์ U-MSM โดยอุปกรณ์ที่ไม่ผ่านการซินเตอริงจะมีค่ากระแสรั่วไหลประมาณ 3,138 μA และจะมีค่ากระแสรั่วไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลงเมื่อทำการซินเตอริงเป็นเวลานานขึ้น อุปกรณ์ที่ผ่านการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 และ 30 นาที จะมีค่ากระแสรั่วไหลประมาณ 398 และ 164 μA ตามลำดับ เนื่องจากในช่วงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่ค่าความสูงของกำแพงศักย์มีค่าสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงของค่าความสูงกำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นนี้ มาจากอลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ โดยมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 660 องศาเซลเซียส ดังนั้นในช่วงที่อุณหภูมิอยู่ใกล้กับจุดหลอมเหลว จะทำให้อลูมิเนียมแพร่ลงไปในซิลิคอนชนิดเอ็น [30] แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสเปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการซินเตอริงเป็นเวลานานขึ้น ทำให้เป็นอัลลอย ซึ่งจะทำให้เป็นรอยสัมผัสที่ดียิ่งขึ้น

4.2.3 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เมื่อได้รับแสงตกกระทบ

จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิซินเตอริง 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 และ 30 นาที จะทำให้ได้กระแสรั่วไหลที่มีค่าต่ำลงเมื่อเวลาในการซินเตอริงเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเลือกอุปกรณ์นี้เพื่อทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ภายใต้เงื่อนไขได้รับแสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน ซึ่งให้ความเข้มแสงค่าต่างๆ ที่ 5,000, 10,000, 15,000 และ 20,000 lux โดยต่อวงจรการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.9

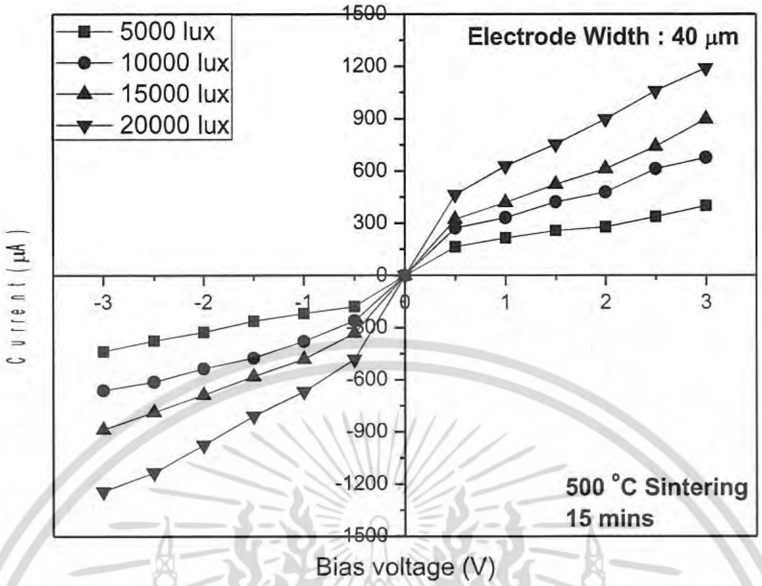


รูปที่ 4.9 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองลักษะสมบัติกระแส-แรงดัน เมื่อได้รับแสงตกกระทบ

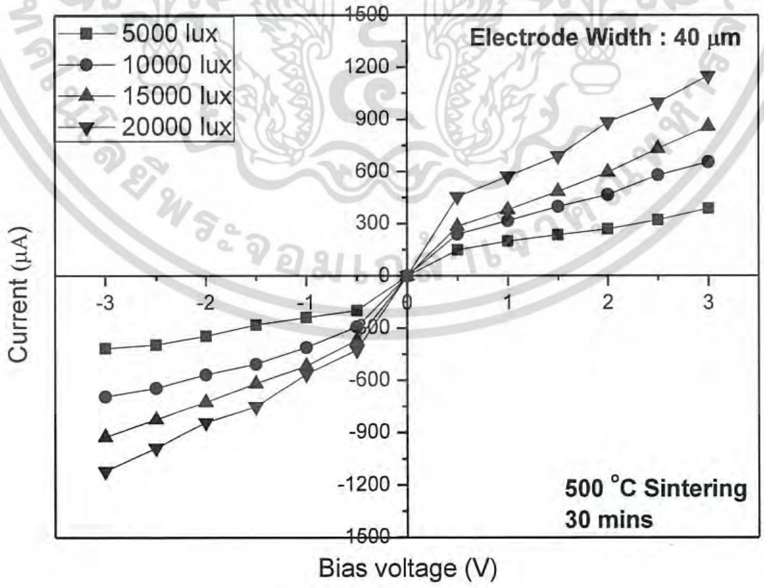
ความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบกัดร่องลึกขณะที่มีแสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้มค่าต่างๆ โดยต่อชุดการทดลองดังรูปที่ 4.9 โดยป้อนแรงดันไบอัสตั้งแต่ -3 ถึง 3 V กระแสแสงหาได้จากสมการ (4.5)

$$I_P = I_{Mea} - I_{Dark} \tag{4.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



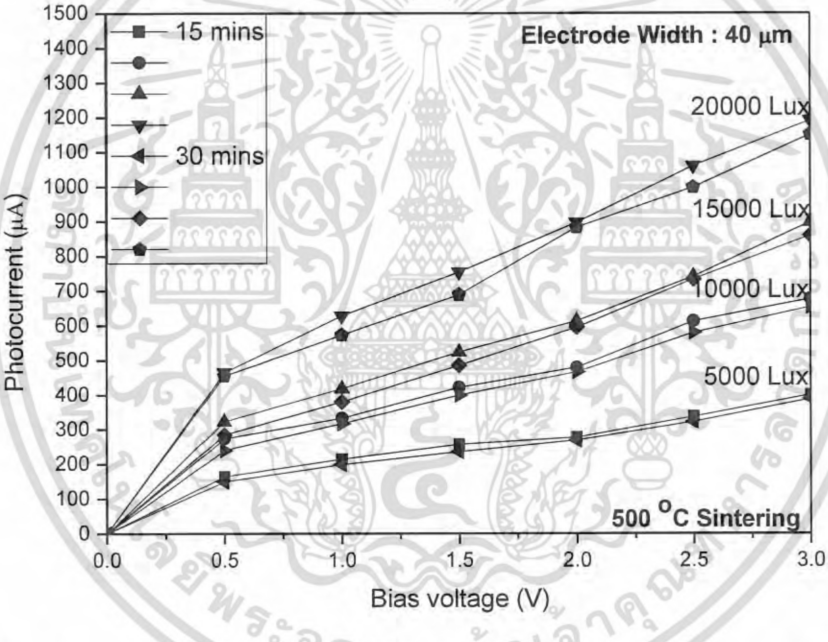
รูปที่ 4.10 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อผ่านการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 15 นาที ขณะได้รับแสงตกกระทบ



รูปที่ 4.11 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อผ่านการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 30 นาที ขณะได้รับแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

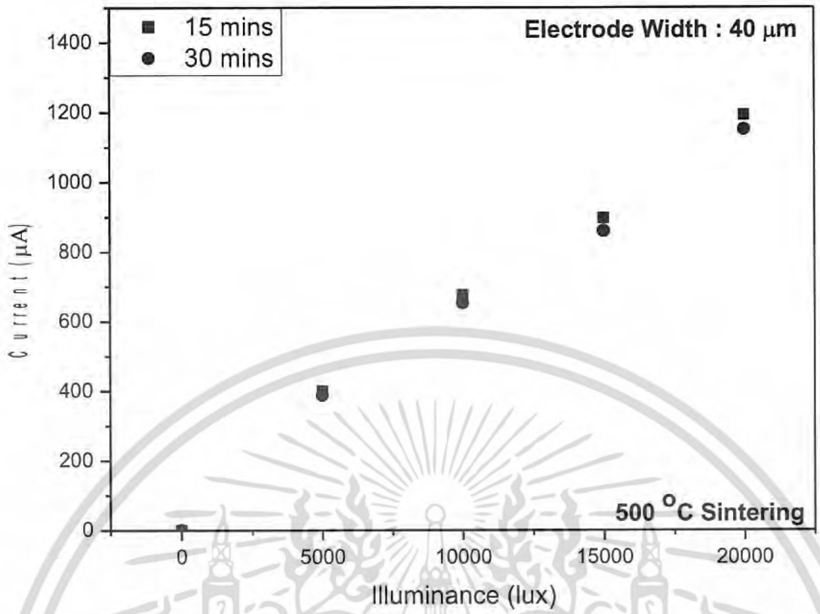
สำหรับกระแสแสง (I_P) หาได้จากกระแสที่ได้จากการวัด (I_{Mea}) ลบด้วยกระแสมืด (I_{Dark}) หรือกระแสรั่วไหล ตามสมการที่ (4.5) จะได้กราฟแสดงลักษณะกระแส-แรงดันเมื่อผ่านการซินเตอริงเป็นเวลา 15 และ 30 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 จากนั้นทำการเปรียบเทียบกระแสงของตัวอุปกรณ์เมื่อผ่านการซินเตอริงที่เวลาต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งพบว่ากระแสงที่ความเข้มค่าเดียวกัน เมื่อเพิ่มเวลาในการซินเตอริงจะมีค่าเกือบเท่ากัน และกระแสแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นอาจพิจารณาได้ว่าเวลาในการซินเตอริงมีผลต่อกระแสแสงที่เกิดขึ้นน้อย แต่จะมีผลในการลดกระแสรั่วไหลของตัวอุปกรณ์มากกว่า อย่างไรก็ตามถึงแม้การเพิ่มเวลาในการซินเตอริงจะมีผลต่อการลดกระแสรั่วไหลในตัวอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นได้ แต่ก็ยังมีค่ากระแสรั่วไหลที่สูงอยู่



รูปที่ 4.12 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อผ่านการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 15 และ30 นาที ขณะได้รับแสงตกกระทบ

เนื่องจากเวลาที่เพิ่มขึ้นในการซินเตอริงส่งผลต่อการลดกระแสรั่วไหลของตัวอุปกรณ์ได้ จึงได้ศึกษาผลของเวลาที่เพิ่มขึ้นในการซินเตอริงกับกระแสแสงที่เกิดขึ้น ผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.13 แสดงลักษณะสมบัติกระแส-ความเข้มแสงเมื่อผ่านการซิน เตอริงที่อุณหภูมิ 500 °C ที่เงื่อนไขเวลาในการซินเตอริงแตกต่างกันเป็นเวลา 15 และ 30 นาที ขณะได้รับแสงตกกระทบ ที่แรงดันไบอัส 3 V จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสงนั้นสามารถตอบสนองต่อแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ ได้เป็นอย่างดี โดยที่เวลาในการซินเตอริงที่เพิ่มขึ้นนั้นไม่ได้ส่งผลต่อกระแสแสงที่เกิดขึ้น แต่ส่งผลในการลดค่ากระแสรั่วไหลของตัวอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



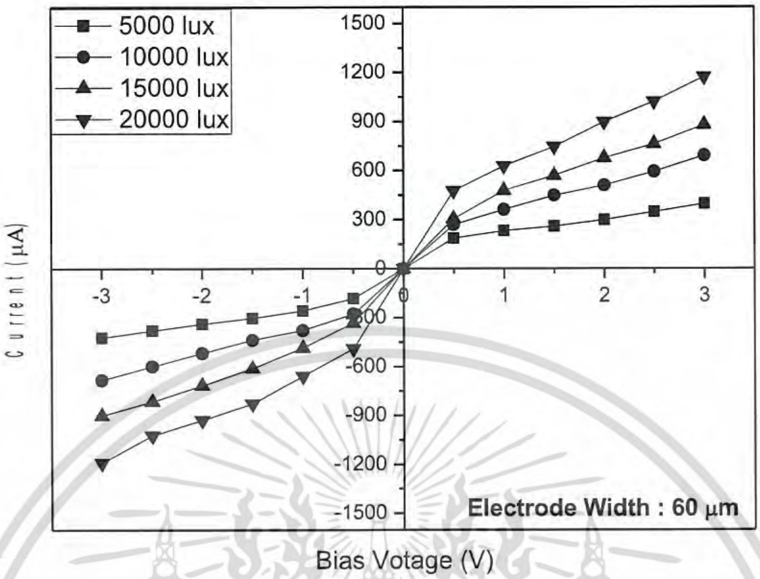
รูปที่ 4.13 ลักษณะสมบัติกระแส-ความเข้มแสงเมื่อผ่านการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 15 และ 30 นาที ขณะได้รับแสงตกกระทบ

การทดลองในหัวข้อที่ 4.2 นี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของเวลาในการซินเตอริงเพื่อเพิ่มขนาดความสูงของกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ ซึ่งความสูงของกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์นี้มีผลต่อกระแสรั่วไหลของตัวอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น เนื่องจากอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่สร้างขึ้นมีกระแสรั่วไหลที่ค่อนข้างสูง จึงใช้เทคนิคในการซินเตอริงเพื่อเพิ่มความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ขึ้น ซึ่งพบว่าสามารถลดระดับของกระแสรั่วไหลได้ถึง 2 เท่า แต่ก็ยังมีค่ากระแสรั่วไหลในระดับที่ยังสูงอยู่ ซึ่งทางผู้วิจัยจะทำการศึกษาหาวิธีการในการลดกระแสรั่วไหลต่อไป จากการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันขณะได้รับแสงตกกระทบ พบว่าตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นสามารถตอบสนองทางแสงได้ดี และเวลาที่ใช้ในการซินเตอริงไม่มีผลต่อกระแสแสงที่เกิดขึ้นมากนัก แต่มีผลในการลดกระแสรั่วไหลในตัวอุปกรณ์มากกว่า ในการศึกษาต่อไปจึงใช้เงื่อนไขการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในการศึกษาการทดลอง

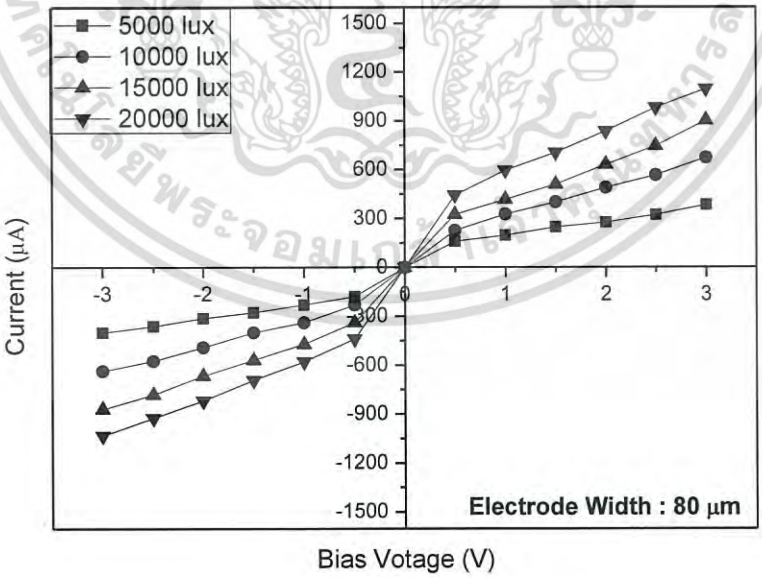
4.2.4 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เมื่อได้รับแสงตกกระทบที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่างกัน

จากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่วัดได้จากรูปที่ 4.11 นำมาทำการหาค่ากระแสแสงของอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูเมื่อได้รับแสงตกกระทบที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 40, 60, 80 และ 100 μm ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.11, 4.14-4.16 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

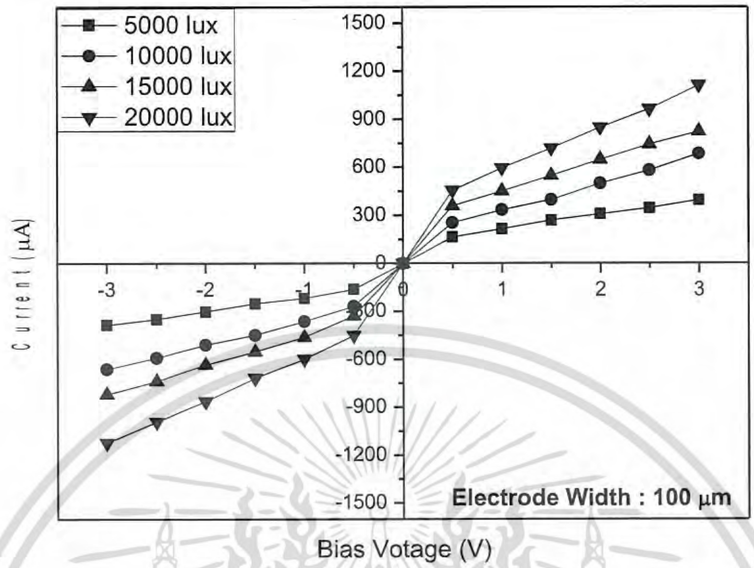


รูปที่ 4.14 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะได้รับแสงตกกระทบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 60 μm

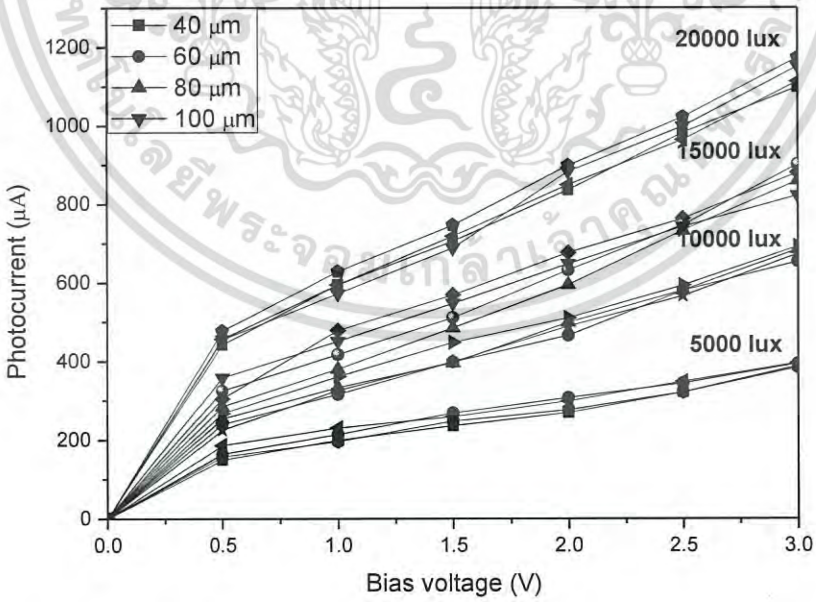


รูปที่ 4.15 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะได้รับแสงตกกระทบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 80 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะได้รับแสงตกกระทบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 100 μm

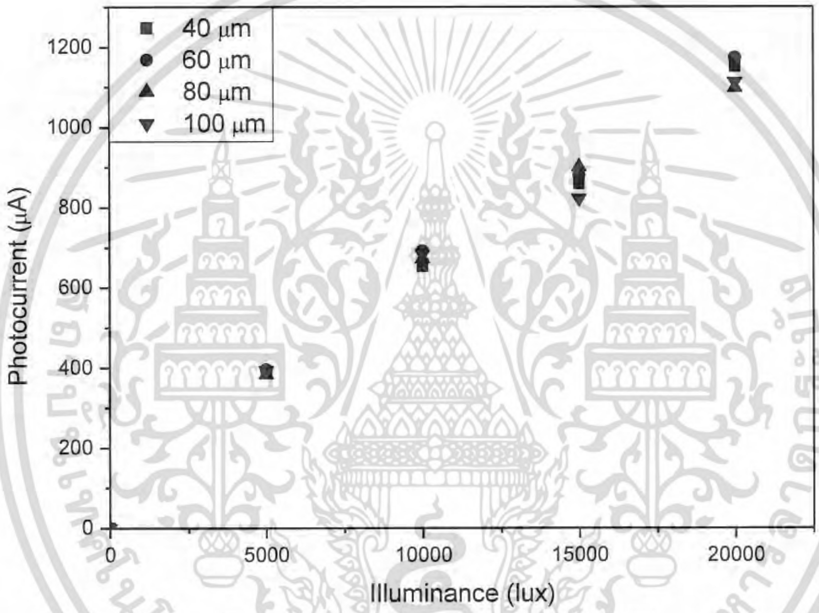


รูปที่ 4.17 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะได้รับแสงตกกระทบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 40-100 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของกระแสแสง (I_P) หาได้จากกระแสที่ได้จากการวัด (I_{Mea}) ลบด้วยกระแสมืด (I_{Dark}) หรือกระแสรั่วไหล ตามสมการที่ (4.5) จะได้กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งพบว่ากระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าเดียวกัน จะมีค่ากระแสแสงเกือบเท่ากันถึงแม้จะทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูแล้ว

ผลการทดลองในรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงต่อความเข้มแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่า 40-100 μm ที่แรงดันไบอัส 3 V มีลักษณะของความเป็นเชิงเส้นเป็นอย่างดี



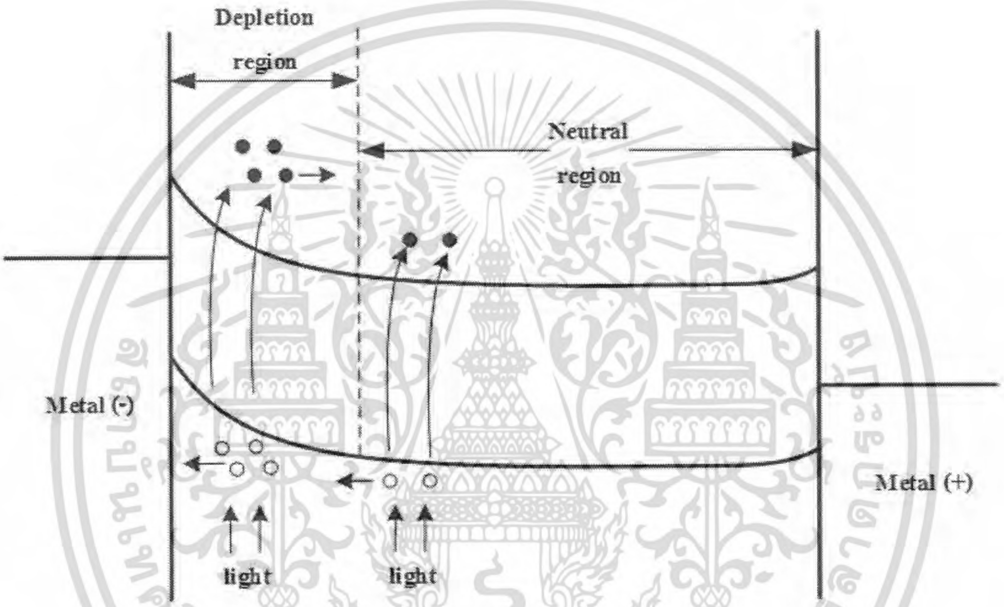
รูปที่ 4.18 ลักษณะสมบัติกระแส-ความเข้มแสง ขณะได้รับแสงตกกระทบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 40-100 μm

ซึ่งโดยทั่วไปแล้วลักษณะโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ที่มีพื้นที่บริเวณปลอดพาหะครอบคลุมระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งหมด กระแสแสงที่ได้จะเป็นกระแสแสงไดโอดแต่เพียงอย่างเดียวโดยที่กระแสแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดมากขึ้น ซึ่งพบในโครงสร้างที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแบบสั้น (Short Elecrode Gap) ส่วนโครงสร้างที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแบบกว้าง (Wide Elecrode Gap) กระแสแสง (I_P) ที่ได้จะเป็นผลรวมของกระแสแสงไดโอด (I_D) และกระแสแสงคอนดัคเตอร์ (I_C) ดังสมการที่ 4.6 ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาจากแถบพลังงานในบริเวณนิวทรัล ดังแสดงในรูปที่ 4.19 จะพบว่ามีลักษณะแบนราบ ดังนั้นส่วนประกอบกระแสแสงคอนดัคเตอร์จะขึ้นอยู่กับการแพร่ของพาหะที่อยู่ที่ใกล้ขอบของบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งกลไกการแพร่ของโฮลที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของแสงแล้วแพร่ไปที่ขอบบริเวณปลอดพาหะ โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 40-100 μm กระแสแสงที่เกิดจากการแพร่ของพาหะส่วนน้อยมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนกระแสแสงไดโอดที่ได้จากบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าเท่ากัน เนื่องจากได้รับแรงดันไบอัสค่าเดียวกัน ทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายเท่ากัน โดยที่ค่ากระแสแสงไม่ขึ้นกับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเป็นผลให้ค่ากระแสแสงรวมมีค่าใกล้เคียงกัน

$$I_P = I_C + I_D \tag{4.6}$$



รูปที่ 4.19 แผนภาพแถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าขนาดกว้างเมื่อได้รับแรงดันไบอัส

4.3 การสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูโดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 เป็นการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบกัดร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลายเตตระเมทธิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ในกระบวนการกัดเปียก ซึ่งสารละลายนี้มีคุณสมบัติในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก คือมีการกัดแบบเลือกทิศทางของระนาบในการกัด จากการทดลองในหัวข้อ 4.2.1 พบว่าภายหลังจากการกัดซิลิคอนแล้วพื้นผิวของซิลิคอนมีลักษณะขรุขระ ไม่สม่ำเสมอ มีลักษณะพื้นผิวเป็นพีระมิดแบบสุ่ม การทดลองในหัวข้อที่ 4.3 นี้จึงเป็นการศึกษาการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูโดยทำการลดขนาดของพีระมิดลงเพื่อดูผลกระทบที่จะเกิดขึ้น โดยการเติมสารละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Alcohol : IPA) จำนวน 17 Vol% [IPA] ลงไปในสารละลายที่ใช้ในการกัดแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์สามารถลดแรงตึงผิวให้กับบริเวณที่ถูกกัดได้ จึงทำให้พื้นผิวของซิลิคอนไม่ขรุขระมากนัก อีกทั้งตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นมีกระแสรั่วไหลค่อนข้างสูง จึงศึกษาวิธีในการลดกระแสรั่วไหลนี้ลง

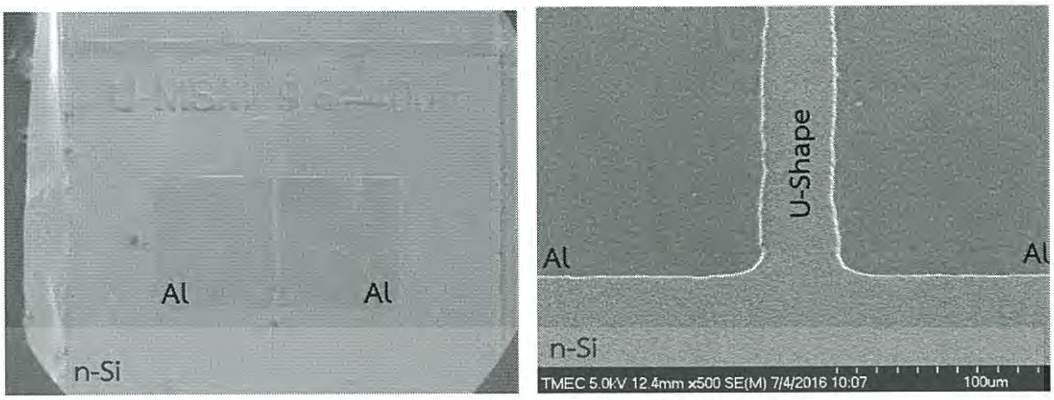
ในหัวข้อนี้ได้ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูขึ้น โดยมีความลึกแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 0.3, 2 และ 3.5 μm แล้วทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีย์โครงสร้าง Al/n-Si/ Al แบบร่องรูปตัวยูที่สร้างขึ้นนี้

4.3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูโดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย

ภาพถ่าย SEM ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบกัดร่องลึกโดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลายเตตระเมทธิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่อเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ จำนวน 17 Vol% ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.3 (ข) จะเห็นว่าเมื่อเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลายจะมีลักษณะสม่ำเสมอกว่าตอนที่ไม่เติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ แสดงให้เห็นว่าการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลายสามารถที่จะช่วยกำจัดฟองของก๊าซไฮโดรเจนบนผิวหน้าของซิลิคอนที่เกิดขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยาในการกัดได้ในระดับนึง จึงส่งผลให้สามารถช่วยลดความขรุขระของพื้นผิวซิลคอนได้ และอย่างไรก็ตาม การเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ถึงแม้จะทำให้ความขรุขระลดน้อยลง แต่ก็จะทำให้อัตราการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนลดลงด้วย โดยที่การเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลายนี้ไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติแอนไอโซทรอปิกของสารละลาย จึงทำให้มีการกัดที่ยังคงเลือกทิศทางของระนาบเหมือนเดิม

ลักษณะพื้นผิวของผลึกซิลิคอนเมื่อทำการเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบกัดร่องลึกโดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลายเตตระเมทธิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์แสดงดังรูปที่ 4.21 พบว่าที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ในภาพ 4.21 (ก) จะเป็นภาพพื้นผิวของผลึกซิลิคอนเมื่อไม่มีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ จะสังเกตุว่ามีลักษณะเป็นพีระมิดแบบสุ่มเกิดเป็นจุดๆ กระจัดกระจายอยู่ทั่วพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัด ในส่วนของรูปที่ 4.21 (ข) เป็นภาพถ่าย SEM ของผิวซิลิคอนที่มีความลึก 2 μm จะเห็นว่ามีความสม่ำเสมอมากกว่าแบบที่ไม่มีการเติมไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์และขนาดของพีระมิดจะมีขนาดเล็กกว่า โดยที่จะมีขนาดของพีระมิดมีขนาดน้อยกว่า 1 μm ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าแบบที่ไม่เติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ที่มีขนาดฐานของพีระมิดประมาณ 1-3 μm ถือว่ามีขนาดลดลงถึง 3 เท่าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

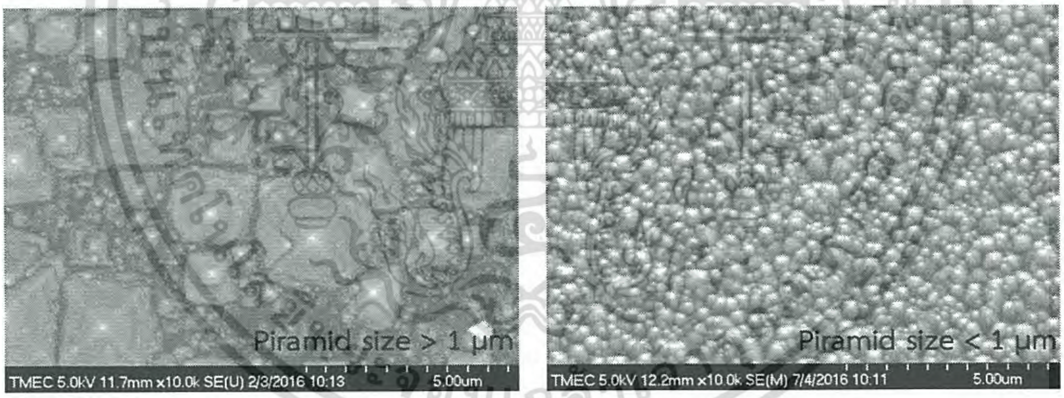


(ก) (ข)

รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูโดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย

(ก) ภาพถ่ายด้วยกล้องไมโครสโคปกำลังขยาย 30 เท่า

(ข) ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 500 เท่า



(ก) (ข)

รูปที่ 4.21 ภาพถ่าย SEM ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

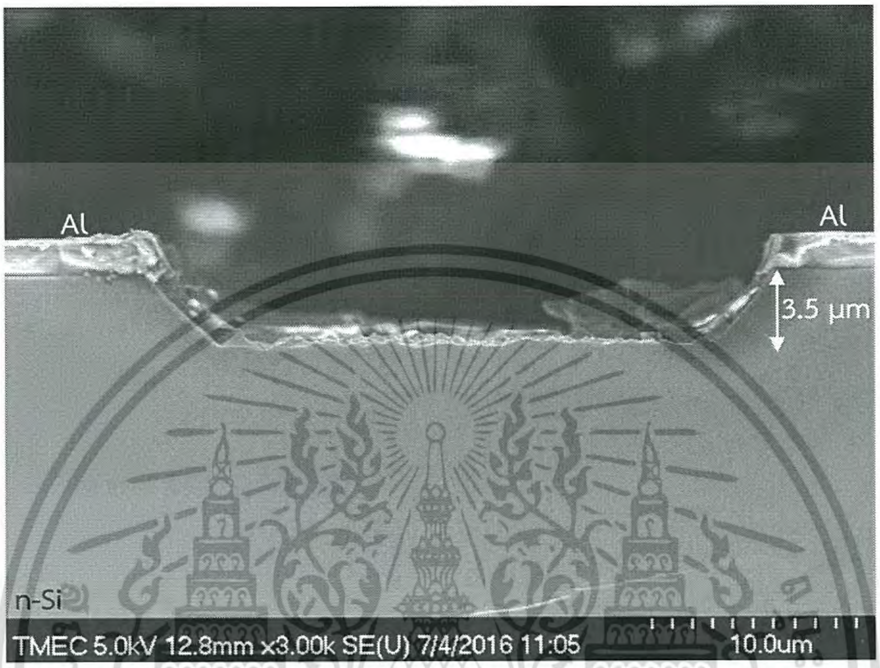
(ก) เมื่อไม่มีการเติม IPA ลงไปในสารละลาย

(ข) เมื่อมีการเติม IPA 17 Vol% ลงไปในสารละลาย

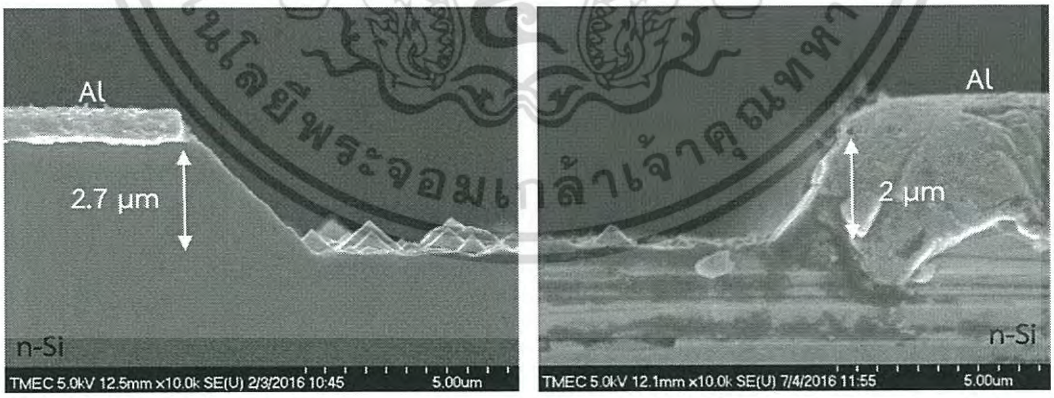
เนื่องจากการทดลองนี้ทำการเปลี่ยนแปลงความลึกของการกัดผลึกซิลิคอน ตัวอย่างภาพถ่ายผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงความลึก แสดงดังรูปที่ 4.22 พบว่ามีความลึก 3.5 μm ซึ่งเป็นความลึกมากสุดในงานวิจัยนี้ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูโดยมีการเติมไอโซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลายมีลักษณะเป็นล่องลึกตามที่ต้องการ ซึ่งถูกอธิบายไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2.1



รูปที่ 4.22 ภาพถ่าย SEM ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบกัดร่องลึกโดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย ที่กำลังขยาย 3000 เท่า



(ก) (ข)

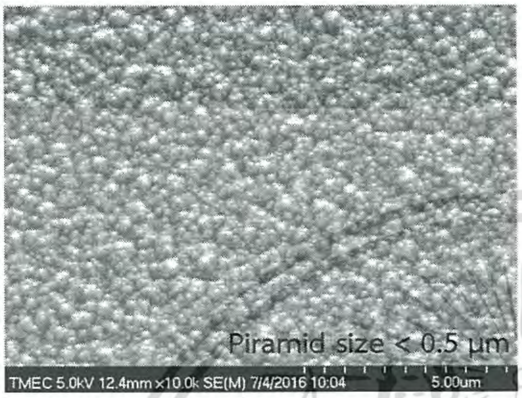
รูปที่ 4.23 ภาคตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

(ก) เมื่อไม่มีการเติม IPA ลงไปในสารละลาย

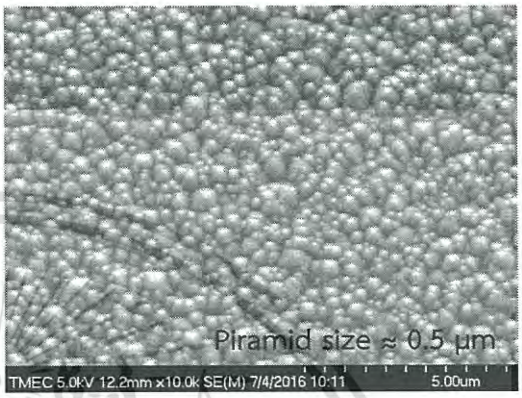
(ข) เมื่อมีการเติม IPA 17 Vol% ลงไปในสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

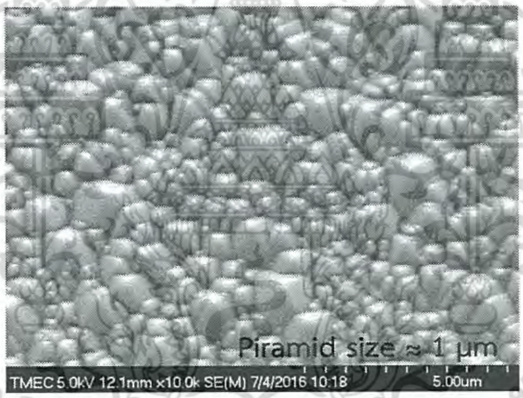
รูปที่ 4.23 เป็นภาพตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่กำลังขยาย 10,000 เท่าจะเห็นว่าเมื่อเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย ขนาดความสูงของพีระมิดจะมีขนาดเล็กลง



(ก) ใช้เวลาในการกัด 15 นาที



(ข) ใช้เวลาในการกัด 30 นาที



(ค) ใช้เวลาในการกัด 60 นาที

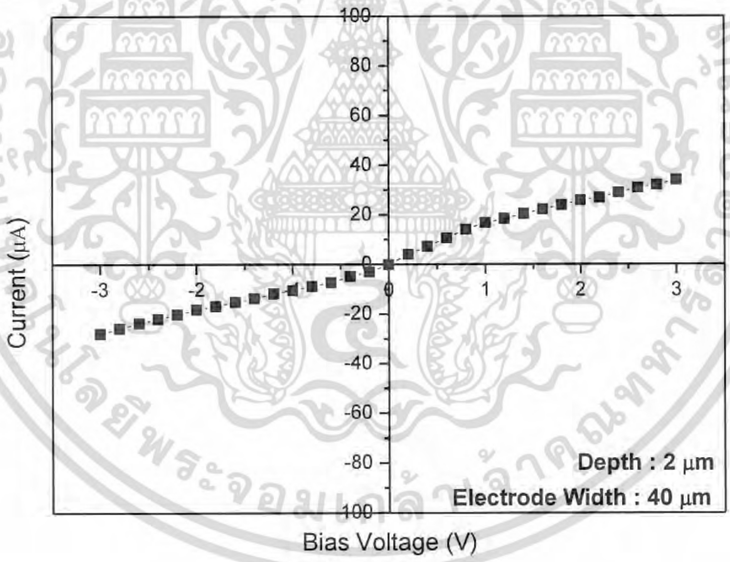
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายพื้นผิวบริเวณพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่ใช้เวลาในการกัดต่างกัน

ภาพถ่ายพื้นผิวของบริเวณพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่ใช้เวลาในการกัดแผ่นซิลิคอนต่างกัน ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ใช้เวลาในการกัด 15, 30 และ 60 นาที แสดงดังรูปที่ 4.24 พบว่าเมื่อใช้เวลาในการกัดแผ่นซิลิคอนนานขึ้นขนาดของพีระมิดจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากมีเวลาในการกัดหรือเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้น โดยที่เมื่อใช้เวลาในการกัด 15 นาที จะมีลักษณะขรุขระกระจายทั่วพื้นผิว มีขนาดน้อยกว่า 0.5 µm ที่เวลา 30 นาที ยังไม่มีความแตกต่างจากเมื่อใช้เวลาในการกัดที่ 15 นาทีมากนัก แต่มีขนาดที่ใหญ่กว่าเล็กน้อย ประมาณ 0.5 µm เมื่อทำการกัดเป็นเวลา 60 นาที พบว่ามีลักษณะเป็นพีระมิด ขนาดประมาณ 1 µm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย เมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบ

เมื่อได้อุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูโดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย แล้วทำการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งการทดลองที่ 4.2.2 กล่าวไว้ว่าเป็นอุณหภูมิซินเตอริง และเวลาที่เหมาะสมซึ่งได้กระแสรั่วไหลน้อยที่สุด แล้วทำการหาความสัมพันธ์ของกระแสเมื่อได้รับแรงดันไบอัสเพื่อทดสอบลักษณะสมบัติของตัวอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบโดยต่อชุดการทดลองดังรูปที่ 4.7 โดยป้อนแรงดันไออัสตั้งแต่ -3 ถึง 3 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่มีความลึกของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 2 μm มีค่ากระแสรั่วไหล 34 μA เมื่อให้แรงดันไบอัสเท่ากับ 3 V ซึ่งพบว่ากระแสรั่วไหลมีค่าลดลงจากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 ที่ไม่มีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย ประมาณ 5 เท่า



รูปที่ 4.25 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลายขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

4.3.3 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย

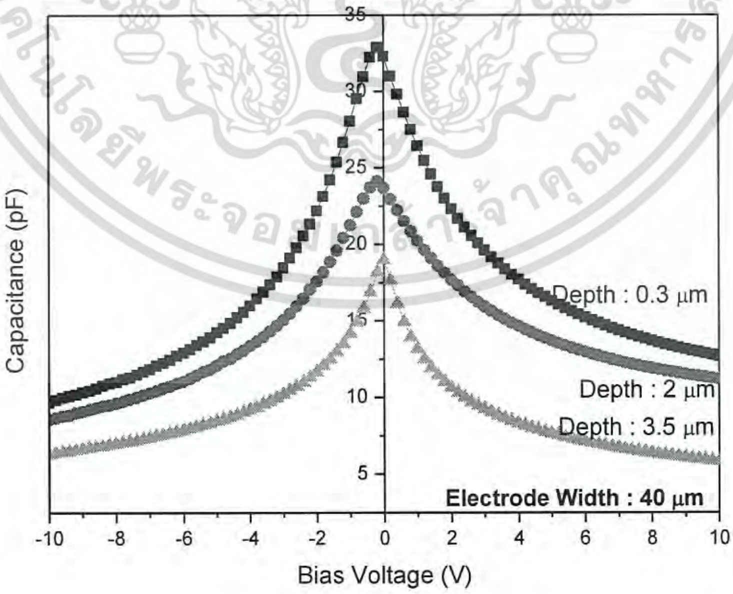
เมื่อทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพ-รพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลายแล้วทำการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งการทดลองที่ 4.2.2 ได้กล่าวไว้ว่าเป็นอุณหภูมิซินเตอริง และเป็นเวลาที่มีเหมาะสมซึ่งจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้กระแสรั่วไหลน้อยที่สุด แล้วทำการหาความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับแรงดันไบอัส ขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบกับตัวอุปกรณ์ ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย เมื่อได้รับแรงดันไบอัส -10 ถึง 10 V แสดงดังรูปที่ 4.26 พบว่าโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยตัวเก็บประจุที่บริเวณรอยสัมผัสทั้งสองต่อกันแบบอนุกรม ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ จะมีค่าใกล้เคียงกับความจุไฟฟ้าด้านที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

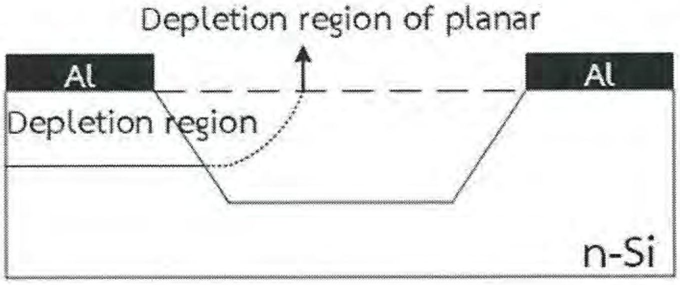
ซึ่งจากรูปที่ 4.26 พบว่าลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ มีความสมมาตรกันซึ่งจะมีค่าแปรผกผันกับแรงดันไบอัสดังความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.7) คือเมื่อแรงดันไบอัสมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยที่แรงดันไบอัส 10 V ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์มีค่าประมาณ 12, 11 และ 5 pF ที่ความลึกของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 0.3, 2 และ 3.5 μm ตามลำดับ สาเหตุที่ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลงเนื่องจากที่บริเวณรอยสัมผัสรอบข้างของขั้วไฟฟ้าถูกกัดออกไป จึงส่งผลให้มีความจุไฟฟ้าลดต่ำลงตามความลึกของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

$$C = \sqrt{\frac{q\varepsilon_S N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \qquad (4.7)$$



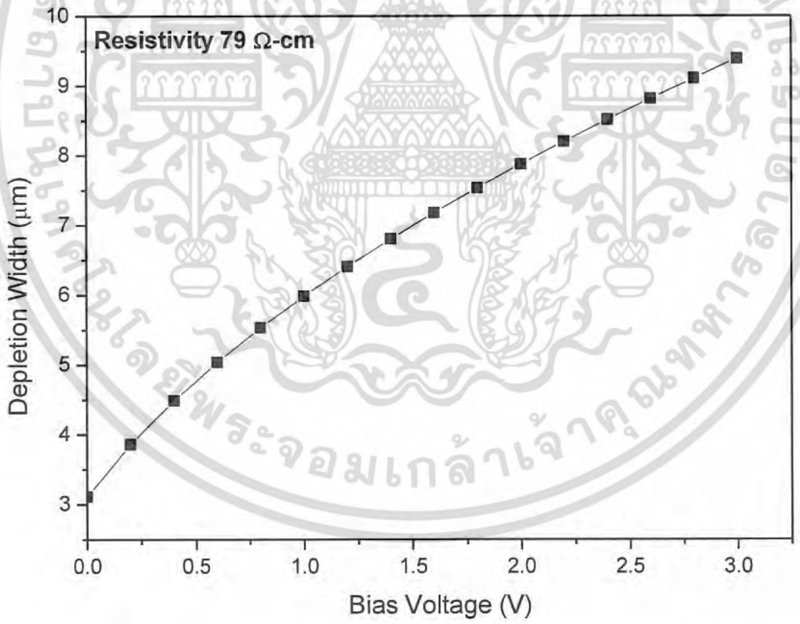
รูปที่ 4.26 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ภาพแสดงบริเวณปลอดพาหะ

ค่าความจุไฟฟ้าที่ลดลงนี้จากรูปที่ 4.27 จะเห็นว่ามีบริเวณปลอดพาหะหายไปบางส่วน จากลักษณะของโครงสร้างที่เราได้เปลี่ยนเป็นร่องรูปตัวยู ซึ่งการที่มีค่าความจุไฟฟ้าที่ต่ำลงนี้จะทำให้จะทำให้มีการตอบสนองที่รวดเร็ว (สวิตชิ่งสูง) ถือเป็นแนวทางในการพัฒนาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างร่องรูปตัวยูต่อไปในอนาคต



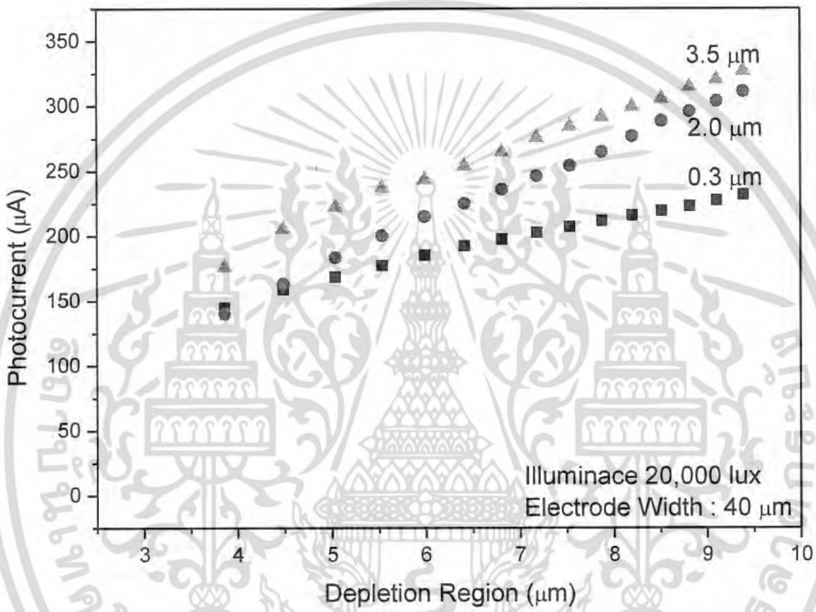
รูปที่ 4.28 ลักษณะความกว้างบริเวณปลอดพาหะ-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย

จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.4 ที่ผ่านมาพบว่ากระแสแสงที่ได้มีค่าไม่ขึ้นกับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า แต่กระแสแสงมีค่าเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัสที่ให้กับตัวอุปกรณ์ ซึ่งแรงดันไบอัสมีผลต่อความกว้างบริเวณปลอดพาหะ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.8) ซึ่งพบว่าค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว้างบริเวณปลอดพาหะมีค่ามากขึ้นเมื่อให้แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.28 ซึ่งเป็นบริเวณปลอดพาหะของแผ่นซิลิคอนที่มีสภาพต้านทานแผ่นประมาณ 79 โอห์ม-เซนติเมตร

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S\left(V_{bi} - V_A\right)}{qN_D}} \tag{4.8}$$



รูปที่ 4.29 ลักษณะกระแสแสง-ความกว้างบริเวณปลอดพาหะของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย

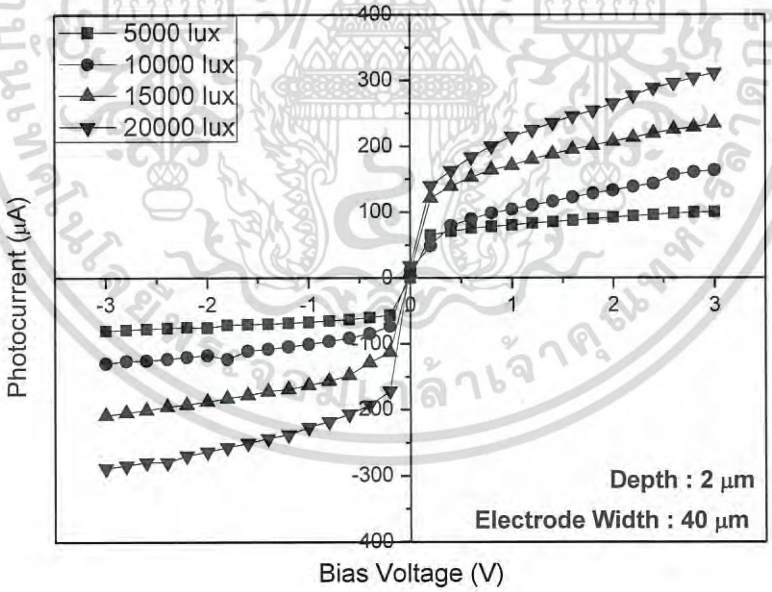
เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ในรูปที่ 4.28 แล้วมาทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.29 เมื่อให้แรงดันไบอัสเท่ากับ 3 V และให้แสงที่ความเข้มแสง 20,000 lux พบว่า กระแสแสงมีค่ามากขึ้นเมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น โดยที่เป็นผลมาจากความกว้างบริเวณปลอดพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไบอัส จึงกล่าวได้ว่ากระแสแสงมีค่ามากขึ้นเมื่อเมื่อให้แรงดันไบอัสมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สามารถควบคุมกระแสแสงได้จากการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัสกับตัวอุปกรณ์

4.3.4 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย เมื่อได้รับแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลายขณะได้รับแสงตกกระทบ จากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ โดยอุปกรณ์ที่ทำการวัดมีความลึกของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 μm ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.30 พบว่าอุปกรณ์จะมีกระแสเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น เป็นผลอันเนื่องมาจากการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเพิ่มมากขึ้นเมื่อได้รับความเข้มแสงเพิ่มขึ้นดังแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.2.3 โดยที่ความเข้มแสง 5,000, 10,000, 15,000 และ 20,000 lux ที่แรงดันไบอัส 3 V จะมีค่ากระแสแสง 113, 194, 267 และ 352 μA ตามลำดับ ซึ่งพบว่ามีกระแสแสงเพิ่มขึ้นเป็น 25 เท่า เมื่อเทียบกับแบบพลานาร์จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.1

สาเหตุที่ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูมีค่าเพิ่มขึ้นอาจเป็นไปได้จากการที่มีพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้นจากโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปจากแบบพลานาร์ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.1 ด้วยการกัดร่องรูปตัวยูบริเวณพื้นที่รับแสงหรือบริเวณระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า รวมทั้งมีลักษณะพื้นผิวที่ไม่เรียบหรือขรุขระ เพื่อช่วยดักแสงโดยการเพิ่มโอกาสให้แสงถูกสะท้อนกลับลงบนผิวหน้าบริเวณพื้นที่รับแสงมากขึ้น ทำให้บริเวณพื้นที่รับแสงสามารถดูดกลืนแสงได้มากขึ้น จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในวิทยานิพนธ์นี้ด้วยนั่นเอง



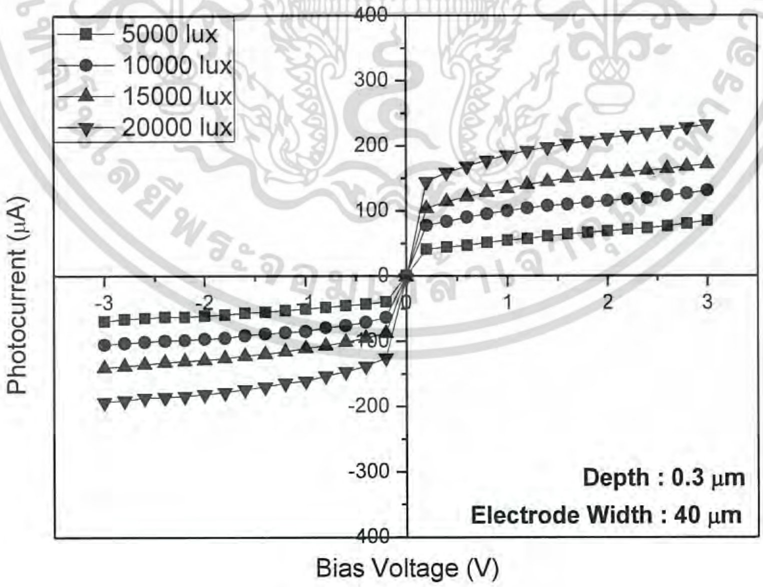
รูปที่ 4.30 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่มีความลึกของระยะห่างขั้วไฟฟ้า 2 μm ขณะได้รับแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย เมื่อได้รับแสงตกกระทบ ที่ความลึกของระยะห่างระหว่างขั้วฟ้าต่างกัน

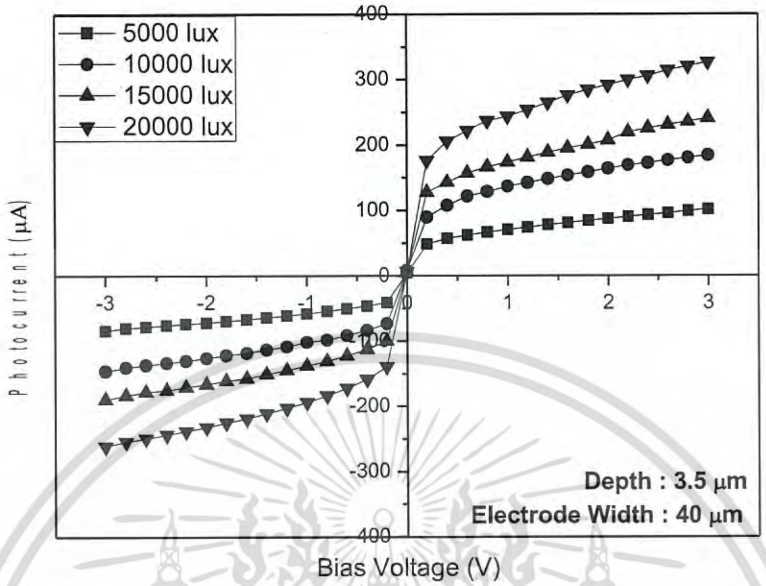
จากการทดลองที่ผ่านมาในหัวข้อที่ 4.3.4 จากนั้นทำการหาค่ากระแสแสงของอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูโดยมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงไปในสารละลาย เมื่อได้รับแสงตกกระทบ ที่ความลึกของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่างกัน โดยที่มีความลึกของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 0.3, 2 และ 3.5 µm ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.24, 4.31 และ 4.32 ตามลำดับ โดยที่ความเข้มแสง 5,000, 10,000, 15,000 และ 20,000 lux ตัวตรวจวัดแสงที่มีความลึกร่องรูปตัวยู 0.3 µm จะมีค่ากระแสแสง 84.62, 131.13, 171.36 และ 231.99 µA ตามลำดับ และตัวตรวจวัดแสงที่มีความลึกร่องรูปตัวยู 3.5 nm จะมีค่ากระแสแสง 90.11, 169.27, 220.08 และ 299.62 µA ตามลำดับ เมื่อให้แรงดันไบอัส 3 V ซึ่งค่ากระแสแสงที่ได้มีค่ามากขึ้นเมื่อให้แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น เกิดเนื่องจากการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงจากแบบพลานาร์ เป็นโครงสร้างร่องรูปตัวยู เพื่อเพิ่มพื้นที่รับแสงซึ่งคาดว่าจะมีกระแสแสงเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ลดลงจากโครงสร้างที่ได้เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในผลการทดลองข้างต้น ซึ่งเป็นแนวในการพัฒนาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างร่องรูปตัวยูต่อไปในอนาคต



รูปที่ 4.31 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่มีความลึกของระยะห่างขั้วไฟฟ้า 0.3 µm ขณะได้รับแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัว ยู ที่มีความลึกของระยะห่างขั้วไฟฟ้า 3.5 μm ขณะได้รับแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH ในการกัดซิลิคอนบริเวณระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้น เป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงจากแบบพลานาร์ เป็นแบบร่องรูปตัวยู ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่รับแสงให้กับตัวตรวจวัดแสงโดยที่ไม่จำเป็นต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยคุณสมบัติของสารละลายที่ใช้ในการกัดร่องรูปตัวยูนี้จะทำให้เกิดการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก จากนั้นจะทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพ และลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างร่องรูปตัวยู

กระบวนการสร้างเริ่มจากใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ที่มีระนาบ (100) และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า 75-95 โอห์ม-เซนติเมตร เพื่อใช้ในการสร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมโดยใช้กระบวนการสปัตเตอร์ จากนั้นทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลานาร์ ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าไว้ใช้ในการเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู หลังจากที่ได้ตัวตรวจวัดแสงแบบพลานาร์แล้ว จึงทำการกัดบริเวณพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบพลานาร์ด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 8.3 wt% อุณหภูมิที่ใช้ในการกัดซิลิคอน 80 องศาเซลเซียส

ในส่วนแรกเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบพลานาร์เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู พบว่าตัวตรวจวัดแสงแบบพลานาร์ที่สร้างขึ้นมีกระแสรั่วไหล ที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 3 V มีค่าเท่ากับ 0.8 μA มีกระแสแสงเมื่อให้แรงดันไบอัส เท่ากับ 3 V ที่ความเข้มแสง 5,000, 10,000, 15,000 และ 20,000 lux จะมีกระแสแสง 5.3, 7.8, 10.1 และ 14.2 μA ตามลำดับ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู

ส่วนที่สองเป็นการสร้างตัววัดแสงแบบร่องรูปตัวยู แล้วทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงจากโครงสร้างร่องรูปตัวยูมีพื้นที่ในการรับแสงเพิ่มขึ้น โดยบริเวณพื้นที่รับแสงด้านพื้นที่ราบเอียง (f/g) จะมีค่าเพิ่มขึ้น 1.7 เท่า จากแบบพลานาร์ แต่พบว่าพื้นผิวมีลักษณะขรุขระ ไม่ราบเรียบ จึงมีการศึกษาวิธีในการเพิ่มความเรียบให้กับพื้นผิวด้วยการเติม IPA ลงไปในสารละลายที่ใช้ในการกัด ซึ่งจะอธิบายในส่วนถัดไป จากศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ในกรณีที่ไม่มีแสงตกกระทบและมีแสงตกกระทบ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน พบว่ากระแสมืดของตัวอุปกรณ์ของตัวอุปกรณ์มีค่าค่อนข้างสูง จึงมีการศึกษาการลดกระแสมืดหรือกระแสรั่วไหลขึ้น โดยทำการศึกษาผลกระทบของเวลาในการซินเตอริงเพื่อเพิ่มขนาดความสูงของกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ ซึ่งความสูงของกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์นี้มีผลต่อกระแสรั่วไหลของตัวอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น เนื่องจากอุปกรณ์ UMSM โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้นมีกระแสรั่วไหลที่ค่อนข้างสูง จึงใช้เทคนิคในการซินเตอริงเพื่อเพิ่มความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ขึ้น ซึ่งพบว่าสามารถลดระดับของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสรั่วไหลได้ถึง 2 เท่า แต่ก็ยังมีค่ากระแสรั่วไหลในระดับที่ยังสูงอยู่ ซึ่งทางผู้วิจัยจะทำการศึกษาหาวิธีการในการลดกระแสรั่วไหลต่อไป จากการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะได้รับแสงตกกระทบ พบว่าตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นสามารถตอบสนองทางแสงได้ และเวลาที่ใช้ในการซินเตอริงไม่มีผลต่อกระแสแสงที่เกิดขึ้นมากนัก แต่มีผลในการลดกระแสรั่วไหลในตัวอุปกรณ์มากกว่า

ส่วนสุดท้าย จากการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูพบว่า พื้นที่รับแสงที่กัดร่องรูปตัวยูนั้นมีความขรุขระ ไม่ราบเรียบ พื้นที่ผิวมีลักษณะเป็นพีระมิดแบบสุ่ม จึงได้ศึกษาเพิ่มเติมถึงวิธีในการลดขนาดพีระมิด เพื่อให้มีความราบเรียบขึ้น โดยการเติม IPA ลงไปในสารละลาย TMAH ซึ่งจากลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวบริเวณพื้นที่รับแสง พบว่าการเติม IPA ลงไปในสารละลายสามารถช่วยลดความขรุขระของพื้นผิวได้ แต่ก็ทำให้อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนลดลงด้วย ซึ่งการเติม IPA ลงไปในสารละลาย ช่วยลดแรงตึงผิวในระหว่างขณะทำการกัดแผ่นซิลิคอน โดยช่วยให้ฟองของไฮโดรเจนหลุดจากผิวหน้าของซิลิคอนที่โดนกัดได้ดีขึ้น พื้นผิวจึงมีความเรียบขึ้น ในส่วนของลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า มีค่ากระแสรั่วไหล 34 μA เมื่อให้แรงดันไบอัสเท่ากับ 3 V ซึ่งพบว่ากระแสรั่วไหลมีค่าลดลงจากที่ไม่มีการเติม IPA ลงไปในสารละลายประมาณ 5 เท่า ส่วนกระแสแสง โดยที่ความเข้มแสง 5,000, 10,000, 15,000 และ 20,000 lux ที่แรงดันไบอัส 3 V จะมีค่ากระแสแสง 113, 194, 267 และ 352 μA ตามลำดับ ซึ่งพบว่ามีกระแสแสงเพิ่มขึ้นเป็น 25 เท่า เมื่อเทียบกับแบบพลานาร์ที่สร้างขึ้น

ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบบกัดร่องรูปตัวยู มีความสมมาตรกันดี ซึ่งจะมีค่าแปรผกผันกับแรงดันไบอัส คือเมื่อแรงดันไบอัสมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยที่แรงดันไบอัส 10 V ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์มีค่าประมาณ 12, 11 และ 5 pF ที่ความลึกของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 0.3, 2 และ 3.5 μm ตามลำดับ สาเหตุที่ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลงเนื่องจากพื้นที่บริเวณรอยสัมผัสรอบข้างของขั้วไฟฟ้าถูกกัดออกไป จึงส่งผลให้มีความจุไฟฟ้าลดต่ำลงตามความลึกของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

จากการสร้างตัวตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบกัดร่องรูปตัวยู หรือ UMSM โดยใช้เทคนิคการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก สามารถสร้างตัวตรวจวัดแสงให้มีพื้นที่รับแสงเพิ่มมากขึ้นและมีการตอบสนองทางแสงได้ คาดว่าจะเป็นตัวตรวจวัดแสงที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Apple Support. 2015. **"Change the brightness setting in iOS"**. [Online]. Available : https://support.apple.com/en-us/HT202613

[2] Cristian Raiber. 2012. **"The principles of operation of a bar code barcode scanner"**. [Online]. Available : http://ezinearticles.com/?The-Working-Principles-Behind-a-Barcode-Scanner&id=3637376

[3] Eric J. Lerner, 2000. **" Introduction to photodetectors and applications"** [Online]. Available : http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-36/issue-12 /buyers-guide-2001/photodetectors/introduction-to-photodetectors-and-applications.html

[4] Nikon Corporation. 2008. **"Predictive Focus Tracking System"**. [Online]. Available : http://www.nikon.com/about/technology/rd/core/software /caf/index.htm

[5] บุศรา นรารักษ์, **"การศึกษากระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม"**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556

[6] Bo Cui. 2007. **"Microfabrication and thin film technology"** [Online]. Available : https://ece.uwaterloo.ca/~bcui/?page_id=20

[7] Apple Support. 2015. **"Change the brightness setting in iOS"**. [Online]. Available : https://support.apple.com/en-us/HT202613

[8] สมเกียรติ ศุภเดช., **"เซมิคอนดัคเตอร์ฟิสิกส์"**, พิมพ์ครั้งที่ 4 แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2549.

[9] สมเกียรติ ศุภเดช., **"เซมิคอนดัคเตอร์ดีไวซ์"**, พิมพ์ครั้งที่ 3 แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2549.

[10] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, **"รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ"**, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ : มีนเซอร์วิสซัพพลาย, พ.ศ. 2558.

[11] Werasak Sonphao, **"Silicon Anisotropic Etching of TMAH Solution"**, ISIE 2001, Pusan, KOREA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[12] Kejia (Albert) Wang., **"Wire textured, multi-crystalline Si solar cells created using self-assembled masks"**, OPTICS EXPRESS A568. Vol. 18, No. S4

[13] ธัญญะ ศักดิ์โสภิษฐ์, **"ทรานดิวส์เซอร์ความดันชนิดซิลิกอนแบบเปียโซรีซิสทีปบนไดอะแฟรมบาง"**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2534

[14] D. Xuefeng, **"Microfabrication Using Bulk Wet Etching with TMAH".** Master Degree Thesis of McGill University. 2005

[15] Xiaoge Gregory Zhang **"Electrochemistry of Silicon and Its Oxide".** Cominco Ltd. Mississauga, Ontario, Canada and McMaster University Hamilton, Ontario, Canada. 2001

[16] Avinash P. Nayak, Logeeswaran VJ and M. Saif Islam **"Wet and Dry Etching".** University of California, Davis. California. 2011

[17] ศรีเมษ รัตนชัย, **"เทคนิคการกัดคานเดี่ยวซิลิกอนเพื่อเป็นตัวตรวจจับอัตราเร่ง"**, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542

[18] K. Biswas, S. Das, **"Bulk micromachining of silicon in TMAH-based etchants for aluminum passivation and smooth surface"**. Microelectronics Journal 37 (2006) 321–327

[19] J.LACONTE, **"Micromachined Thin-Film Sensors for SOI-CMOS Co-Integration"**. Intersema Sensoric SA, Bevaix, Switzerland . 2006

[20] งามจิต มงคลธนานนท์, **"การศึกษาการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบร่องรูปตัวยูโดยสารละลาย TMAH สาหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM"**, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2559

[21] U.Schnakennerg, W.Benecke, P.Lange., **"TMAH ETCHANTS FOR SILICON MICROMACHINING"**, Fraunhofer-Institut für Mikrostrukturtechnik Dillenburger Str. 53,D-100 Berlin 33, FRG. 1991

[22] มานิตา ด้วงแสง, **"การศึกษาและการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท"**, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[23] ธเนศ โชะเหม, “**การออกแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลานาร์**”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548

[24] Darling R.B., 2015. “**Wet Etching**” [Online]. Available:http://www.virlab.virginia.edu/nanoscience_class/lecture_notes/Microfabrication_Supporting_materials_files/R_B_Darling%20%20Washington%20U%20-%20WetEtching.pdf

[25] W.K. Choi, J.T.L. Thong, P. Luo, C.M. Tan and T.H. Chua, Y. Bai., “**Characterisation of pyramid formation arising from the TMAH etching of silicon**”. Sensors and Actuator, Vol. A71, pp. 238-243, 1998

[26] กิตติศักดิ์ อมรสุรินทวงศ์ และทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์, “**ผลของการสะท้อนแสงของผิวเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีลวดลายพีระมิด**”, การประชุมเชิงวิชาการเครือขายพลังงานแหงประเทศไทย ครั้งที่ 6, หน้า 1-5, 5-7 พฤษภาคม 2553

[27] Gwiy-Sang Chung, “**Anisotropic etching characteristics of Si in tetramethyl-ammonium hydroxide: Isopropyl alcohol: Pyrazine solutions**”, Korean Physical Society, Vol. 46, pp. 1152-1156, 2005

[28] Osamu Tabata, “**pH-controlled TMAH etchants for silicon micromachining**”, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 53, pp. 335-339, 1996

[29] ศนิ กลิ่นสนิท, “**การศึกษากระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติของซิลิคอนซ็อตกีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม**”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556

[30] สรายุทธ์ วิศวแสวงสุข, “**การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al**”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา ไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

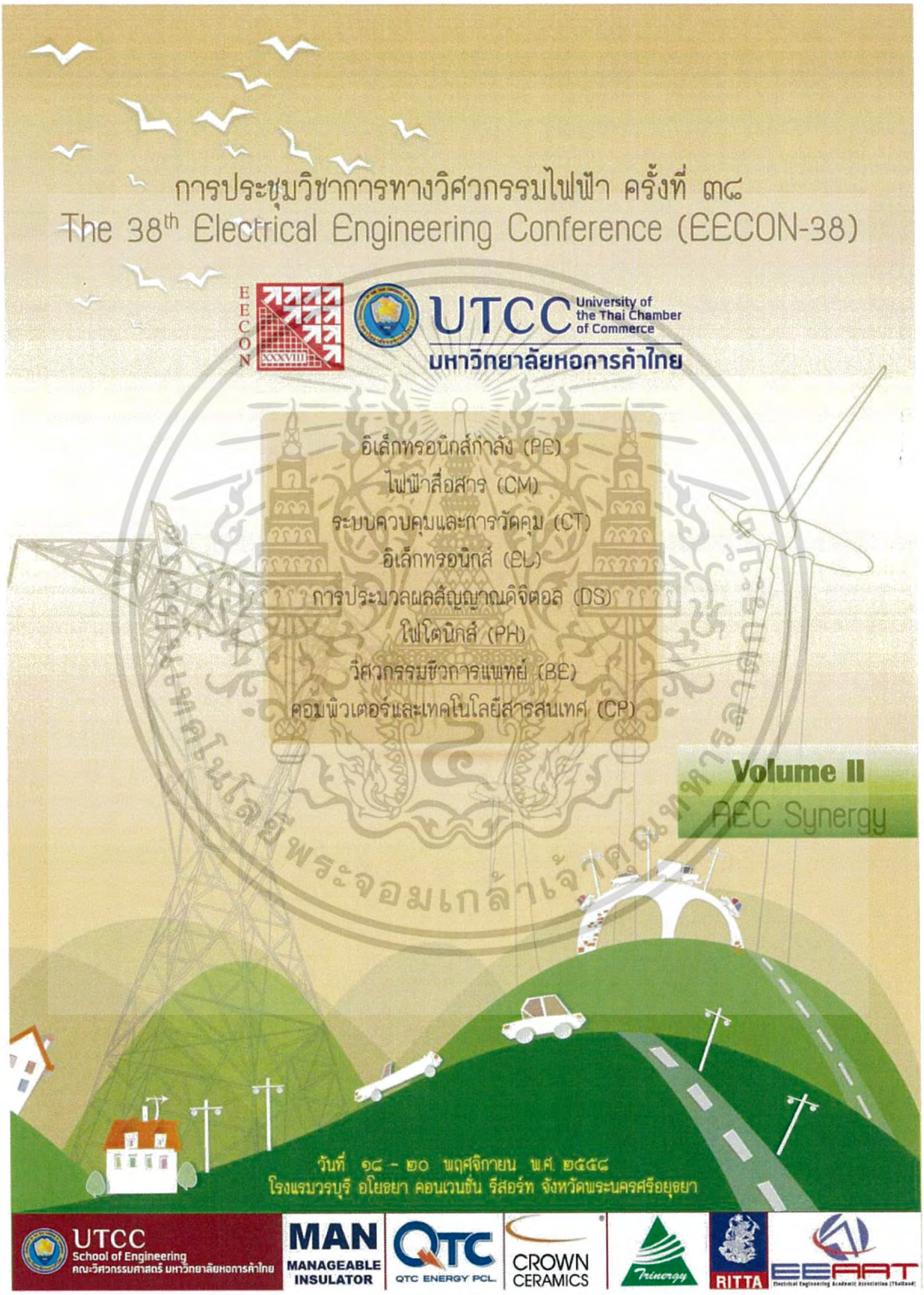
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

[1] **ธนกฤต แสงโฮง**, ยุทธนา แจ้งอรุณ, วุฒิไกร คำอ่อน, งามจิต มงคลธนานนท์, วรเทพ น้อยปรีชา และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ, **“การศึกษาสภาพการตอบทางแสงและประสิทธิภาพควอนตัม ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al”**, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38, Volume II หน้า 769-772, 18-20 พ.ย. 2558

[2] **ธนกฤต แสงโฮง**, จิรวัฒน์ ปราบเขต และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ, **“การลดกระแสรั่วไหลของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ U-Shape”**, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8, หน้า 169-172, 25-27 พ.ค. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON-38) 18 - 20 พฤศจิกายน 2558 มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

การศึกษาสภาพการตอบทางแสงและประสิทธิภาพควอนตัม ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al

Study on Responsivity and Quantum Efficiency of Al/n-Si/Al Photodetecter

ธนกฤต แสงโฮง, ยุทธนา แย้งอรุณ, วุฒิไกร คำอ่อน, งามจิต มงคลธนานนท์, วรเทพ น้อยปรีชา และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 E-mail: Sanghong.T@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาสภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง MSM โครงสร้าง Al/n-Si/Al ซึ่งสร้างโดยใช้ซิลิคอนเทคโนโลยี โดยออกแบบโครงสร้างของ MSM เป็นแบบอินเตอร์ดิจิเตท กำหนดให้ระยะห่างขั้วไฟฟ้า (electrode spacing:S) ขนาดสั้น มีขนาด 2 และ 3 µm ส่วนความกว้างฟิงเกอร์ (electrode width:W) มีขนาด 20 ηm ความยาวฟิงเกอร์ (electrode length:L) มีความยาว 1 mm และมีจำนวนฟิงเกอร์ electrode 4 ฟิงเกอร์ ทำการศึกษาสมบัติทางแสง พบว่าที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 2 µm มีสภาพการตอบสนองทางแสง ($\Re$) และประสิทธิภาพควอนตัม (η) ที่ λ = 830 nm ประสิทธิภาพควอนตัมมีค่าเป็น 23.27 % สภาพการตอบสนองทางแสงเท่ากับ 0.155 A/W และที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 3 µm ประสิทธิภาพควอนตัมมีค่าเป็น 23.74 % สภาพการตอบสนองทางแสงเท่ากับ 0.159 A/W ซึ่งในบทความนี้ได้ทำการเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสง MSM โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดกว้างอีกด้วย ซึ่งเป็นประโยชน์ในการพัฒนาตัวอุปกรณ์ต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: ตัวตรวจวัดแสง, ประสิทธิภาพควอนตัม, สภาพการตอบสนองทางแสง

Abstract

This paper proposed the responsivity and the quantum efficiency of the MSM photodetector Al/n-Si/Al structure. The was fabricate by using silicon technology. The structural design of the MSM in type interdigitate a short electrode gap (S) size 2 and 3 µm. Width of fingers (W) is 20 ηm length of electrode (L) is 1 mm and number finger electrode is 4. To study the optical properties, the electrode gap is 2 µm the responsivity ($\Re$) and quantum efficiency (η) at λ = 830 nm. The responsivity is 0.155 A/W, the quantum efficiency is 23.27 % the electrode spacing is 3 µm, the responsivity is 0.159 A/W and the quantum efficiency values 23.74 %. Moreover, the Al/n-Si/Al short electrode gap MSM photodetector were compared with the Al/n-Si/Al wide electrode gap. This paper may useful for further study.

Keywords: Photodetector, Quantum Efficiency, Responsivity

1. บทนำ

เทคโนโลยีในปัจจุบันมีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ มากมาย เช่น ตัวตรวจวัดก๊าซ ตัวตรวจวัดแสง เป็นต้น โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือโครงสร้าง MSM เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้งานในตัวตรวจวัดแสง ซึ่งสามารถวัดสเปคตรัมได้ตั้งแต่ช่วงของรังสีอุลตราไวโอเลท (ultraviolet)[1], ช่วงสเปคตรัมที่ตามองเห็น (visible light) [2], ช่วงใกล้อินฟราเรด (near infrared) [3] และช่วงอินฟราเรด (infrared) [4] ซึ่งสามารถแก้ปัญหาเรื่องขีดจำกัดการมองเห็นของดวงตามนุษย์ลงได้ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่จัดอยู่ในกลุ่มโฟโตไดโอดแบบช็อตต์กีย์ (schottky photodiode) ที่มีสมบัติเด่นหลายประการ ดังเช่น มีกระแสมืดต่ำ [5], สภาพการตอบสนองที่ดี [6], การทำงานด้วยความเร็วสูง [7], สัญญาณรบกวนต่ำ, มีเสถียรภาพที่ดี [9] และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย เป็นต้น

ตัวตรวจวัดแสง (photodetector) จะทำหน้าที่ตรวจจับแสงหรือพลังงานโฟตอนของแสงที่ตกกระทบ เพื่อเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ตัวตรวจวัดแสงที่ใช้งานในปัจจุบันนี้มีหลายชนิด เช่น โฟโตคอนดักเตอร์ (photoconductor) พี-เอ็นโฟโตไดโอด (p-n photodiode) พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode) โลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด (metal-semiconductor photodiode) [8 - 9] และอะวาลานช์โฟโตไดโอด (avalanche photodiode) เป็นต้น การเลือกใช้ตัวตรวจวัดแสงให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นลำดับต้นๆ

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาเฉพาะตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ซึ่งเป็นโฟโตไดโอดที่จัดอยู่ในกลุ่มของโฟโตไดโอดแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ หรือช็อตต์กีย์โฟโตไดโอด เนื่องจากสร้างได้ง่าย เพราะว่ามีชั้นโลหะเพียงชั้นเดียวเท่านั้น แล้วทำการศึกษาสภาพการตอบสนองทางแสง ($\Re$) ซึ่งตัวตรวจวัดแสงที่ดีนั้นควรมีสภาพการตอบสนองทางแสงที่สูง เพื่อที่จะให้ตัวตรวจวัดแสงมีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดีนั่นเอง

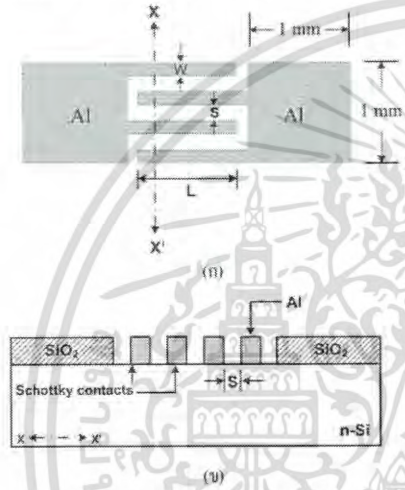
2. การทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือ MSM ชนิด Al/n-Si/Al บนแผ่นซิลิคอนชนิด

PH102

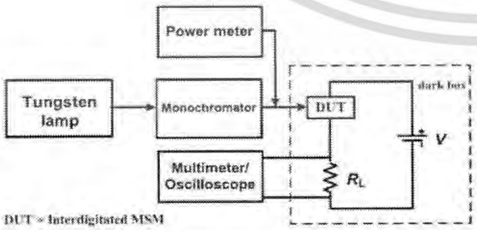
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอ็น ระนาบ (100) ความหนาของแผ่นซิลิกอน 400 μm และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า 20 Ω.cm ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงนี้จะสร้างลักษณะของขั้วไฟฟ้าขนาด 1x1 mm^2 มีความหนาของชั้นอลูมิเนียม 1 μm และกำหนดให้ระยะห่างขั้วไฟฟ้า (electrode spacing:S) มีขนาด 2, 3, 5, 10 และ 20 μm ส่วนความกว้างฟิงเกอร์ (electrode width:W) มีขนาด 20 μm ความยาวฟิงเกอร์ (electrode length:L) มีความยาว 1 mm และมีจำนวนฟิงเกอร์ electrode 4 ฟิงเกอร์



รูปที่ 1 ลักษณะลวดลายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบอินเตอร์ดิจิเตท (ก) ภาพลวดลายด้านบน และ (ข)ภาพภาคตัดขวางตามแนวแกน X-X'

จากนั้นนำตัวตรวจวัดแสงแบบอินเตอร์ดิจิเตทที่เชื่อมต่อขาเสร็จแล้วมาทำการทดลอง เพื่อหาสภาพการตอบสนองทางแสง ($\Re$) และค่าประสิทธิภาพควอนตัม (η) แบบสัญญาณกระแสตรง (dc optical signal) โดยต่อชุดทดลองดังรูปที่ 2 ซึ่งใช้แหล่งจ่ายแสงจากหลอดทังสเตน (tungsten lamp) แล้วส่งผ่านไปยังเครื่องโมโนโครมาเตอร์ (monochromator) ของบริษัท Nikon รุ่น G-250 เพื่อให้แสงผ่านไปได้เฉพาะความยาวคลื่นแสงที่กำหนด (λ = 650 – 950 nm)



รูปที่ 2 แผนภาพการทดลอง เพื่อหาประสิทธิภาพควอนตัมทางแสง และสภาพการตอบสนองทางแสงของสัญญาณแบบกระแสตรง

3. ผลการทดลอง

ในการวัดหาค่า $\Re$ แบบสัญญาณกระแสตรง ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงในเชิงพาณิชย์ของบริษัท Hamamatsu เบอร์ S1226-8BQ ซึ่งตัวตรวจวัดแสงชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดที่มีพื้นที่ขนาดรับแสง 33 mm^2 ข้อมูลจากคู่มือแสดงค่า $\Re$ = 0.34 A/W ที่ความยาวคลื่น 633 nm และ η = 75% ที่ความยาวคลื่น 200 nm [10] จากการทดลองด้วยชุดทดลองที่แสดงในรูปที่ 2 ได้ $\Re$ = 0.35 A/W และ η = 69 % ที่ความยาวคลื่น 633 nm ในขณะที่ความยาวคลื่นที่มีค่า $\Re$ สูงสุด (λ_p) = 770 nm แต่ในคู่มือแสดงค่า λ_p = 720 nm ซึ่งมีค่าแตกต่างกันอยู่บ้าง อย่างไรก็ตามในการทดลองเพื่อหาค่า $\Re$ พบว่าค่า $\Re$ ที่วัดได้ใกล้เคียงกับคู่มือ ซึ่งเป็นการยืนยันให้เห็นว่าชุดทดลอง ให้ผลการทดลองที่ยอมรับได้ในระดับที่ดี จากนั้นจึงนำตัวตรวจวัดแสงที่สร้างเสร็จแล้วมาทำการทดสอบต่อไป

3.1 สภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสง

จากแผนภาพการทดลองในรูปที่ 2 ทดลองหาค่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงที่มีระยะ S ค่าต่างๆ โดยกำหนดความยาวคลื่นแสงหลังจากผ่านเครื่องโมโนโครมาเตอร์ให้อยู่ในช่วง 650 – 950 nm. ความต้านทานโหลด (R_L) = 500 Ω และให้แรงดันไบอัสแก่ตัวตรวจวัดแสงคงที่ที่ 5 V แล้วหาค่ากระแสแสง จากนั้นนำไปคำนวณหาสภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัม ตามสมการที่ (1) และ (2) ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 3

$$\Re = \frac{I_P}{P_{inc}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q \lambda}{hc} \qquad (1)$$

และ

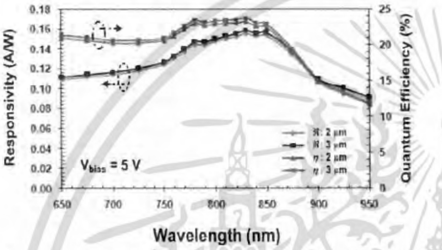
$$\eta = \frac{I_p/q}{P_{inc}/h\nu} = \frac{I_p}{q}.\frac{h\nu}{P_{inc}} \qquad (2)$$

โดยที่ I_p คือ กระแสแสง (A)
P_{inc} คือ กำลังงานของแสงที่ตกกระทบ (W)
h คือ ค่าคงที่ของแพลงค์ (J.s)
c คือ ความเร็วคลื่นแสง (m)
q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน (C)

ในรูปที่ 3 เป็นกราฟแบบสามแกน โดยแกนด้านซ้ายมือเป็นแกนสภาพการตอบสนองทางแสง ส่วนแกนด้านขวามือเป็นแกนประสิทธิภาพควอนตัมกับความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วง 650 – 950 nm ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพควอนตัมและการตอบสนองทางแสงจะขึ้นกับความยาวคลื่นแสง และมีค่าสูงสุดเมื่อความยาวคลื่น (λ_p) มีค่าเป็น 830 nm สำหรับสาเหตุที่ $\Re$ และ η ที่ความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

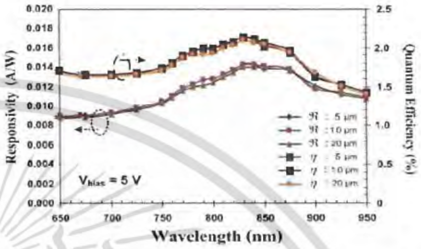
แสงน้อยกว่า 830 nm มีค่าลดลง เนื่องจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนคลื่นมีค่าลดลง เมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่าต่ำลง จึงทำให้ปริมาณกระแสแสงที่ได้มีค่าลดลง และเมื่อความยาวคลื่นแสงมีความยาวคลื่นมากกว่า 830 nm พลังงานของแสงมีค่าลดลงตามความสัมพันธ์ของ $E = h\nu$ ทำให้การดูดกลืนแสงมีค่าน้อยลง ซึ่งส่งผลให้จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นมีจำนวนลดลง เป็นผลให้กระแสแสงที่ได้มีค่าลดต่ำลง จากสาเหตุทั้งสองนี้จึงส่งผลกระทบทำให้ $\Re$ และ η มีค่าลดลงตามไปด้วย



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัม แบบกระแสตรงกับความยาวคลื่นในช่วง 650 - 950 nm ของโครงสร้าง MSM ที่มีขนาด S = 2 และ 3 µm

จากรูปที่ 3 พบว่า การตอบสนองทางแสงและประสิทธิภาพควอนตัม ที่ λ = 830 nm และให้แรงดันไบอัสแก่ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM เท่ากับ 5 V และมีระยะ S = 2 และ 3 µm จะมีค่า $\Re$ เท่ากับ 0.155 และ 0.159 A/W ตามลำดับ ส่วน η จะมีค่าเป็น 23.27 และ 23.74 % ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงสุด ที่ความยาวคลื่นนี้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจะมีค่าประมาณ 12.7 µm [11] เมื่อสังเกตุค่า $\Re$ และ η ที่ได้ จะเห็นว่าค่าทั้งสองที่ได้มีค่าต่ำ เนื่องมาจากโครงสร้าง MSM ที่สร้างขึ้นนี้ไม่มีส่วนป้องกันการสะท้อนแสงที่ผิวซิลิกอน จึงทำให้แสงส่วนหนึ่งสะท้อนจากผิวซิลิคอนออกไป (30 – 40 %) นอกจากนี้ส่วนฟิงเกอร์ที่เป็นโลหะทึบแสงยังทำให้ตัวแปรทั้งสองมีค่าลดลงด้วย จากผลการทดลองของ H. C. Lee ได้ $\Re$ = 0.24 A/W และ η = 35.9 % ที่ λ = 830 nm (ระยะ S และ W = 2.5 µm) [11] ในกรณีของเรามีค่าต่ำกว่าอาจเป็นไปได้จากส่วน W ในโครงสร้างที่สร้างขึ้นมีขนาดใหญ่กว่ามาก (W = 20 µm) สำหรับค่า $\Re$ และ η จากรูปที่ 3 ยังพบอีกว่าที่ระยะ S = 3 µm จะได้ค่าประสิทธิภาพควอนตัมที่สูงกว่าที่ระยะ S = 2 µm เล็กน้อย นั่นหมายความว่าตัวตรวจวัดแสงที่ศึกษานี้ ระยะห่างขั้วไฟฟ้า S = 3 µm ควรจะเป็นระยะห่างที่ดีที่สุด ซึ่งจะได้รับประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแสงเป็นกระแสไฟฟ้าสูงสุด

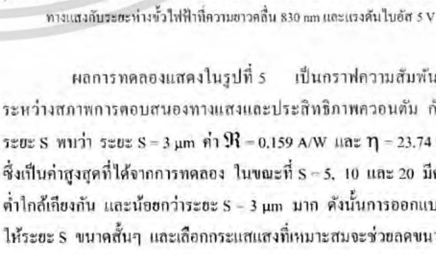
ในขณะที่ผลการทดลองของตัวตรวจวัดแสงที่มีขนาด S = 5, 10 และ 20 µm พบว่า สภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัม มีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่น (λ_p) = 830 nm (เมื่อให้แรงดันไบอัสแก่ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM เท่ากับ 5 V) มีค่าต่ำมาก ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยที่ $\Re$ = 0.014 A/W และ η = 2.14 %



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัม แบบกระแสตรงกับความยาวคลื่นในช่วง 650 – 950 nm ของโครงสร้าง MSM ที่มีขนาด S = 5, 10 และ 20 µm

3.2 สภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างขั้วไฟฟ้า

จากแผนภาพการทดลองในรูปที่ 1 ทำการทดลองหาค่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงที่มีระยะ S ค่าต่างๆ โดยปรับค่าความยาวคลื่นแสงของเครื่องโมโนโครมาเตอร์เป็น 830 nm. ความต้านทานโหลด (R_L) 500 Ω และให้แรงดันไบอัส 5 V จากนั้นนำไปคำนวณหาสภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัม ตามสมการที่ (1) และ (2) ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพควอนตัม และสภาพการตอบสนองทางแสงกับระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่ความยาวคลื่น 830 nm และแรงดันไบอัส 5 V

ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการตอบสนองทางแสงและประสิทธิภาพควอนตัม กับระยะ S พบว่า ระยะ S = 3 µm ค่า $\Re$ = 0.159 A/W และ η = 23.74 % ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ได้จากการทดลอง ในขณะที่ S = 5, 10 และ 20 มีค่าต่ำใกล้เคียงกัน และน้อยกว่าระยะ S = 3 µm มาก ดังนั้นการออกแบบให้ระยะ S ขนาดสั้นๆ และเลือกกระแสแสงที่เหมาะสมจะช่วยลดขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของตัวตรวจวัดแสงลงได้อย่างมาก ซึ่งจะส่งผลให้ความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ลดลง

ตารางที่ 1 แสดงประสิทธิภาพควอนตัม และสภาพการตอบสนองทางแสงที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน

Type No.	Spectral λ (nm)	Peak λ_p (nm)	$\Re$ (A/W)	η %
2 µm	650 to 950	830	0.155	23.27
3 µm			0.159	23.74
5 µm			0.014	2.14
10 µm			0.014	2.14
20 µm			0.014	2.14

จากข้อมูลสภาพการตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัม ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 1

4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการหาสภาพการตอบสนองทางแสงและประสิทธิภาพควอนตัม ที่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงพบว่าในตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือ MSM แบบสั้น สภาพการตอบสนองทางแสง ($\Re$) และประสิทธิภาพควอนตัม (η) ที่ความยาวคลื่น (λ) เท่ากับ 830 nm ที่ให้แรงดันไบอัสแก่ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM เท่ากับ 5 V และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) เท่ากับ 2 และ 3 µm จะมีสภาพการตอบสนองทางแสง ($\Re$) มีค่าเป็น 0.155 และ 0.159 A/W ตามลำดับ ค่าประสิทธิภาพควอนตัม (η) เป็น 23.27 และ 23.74 % ตามลำดับ ส่วนในตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ระยะห่างขั้วไฟฟ้าแบบกว้าง พบว่า สภาพการตอบสนองทางแสงและประสิทธิภาพควอนตัม ที่ให้แรงดันไบอัสแก่ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM เท่ากับ 5 V และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) เท่ากับ 10 และ 20 µm มีค่าต่ำมากโดยที่มีค่าการตอบสนองทางแสง ($\Re$) เท่ากับ 2.14 % และประสิทธิภาพควอนตัม (η) เท่ากับ 0.014 A/W ซึ่งในตัวตรวจวัดแสงที่ดีนั้นควรจะมีสภาพการตอบสนองทางแสงที่สูงเพื่อที่จะให้สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้มาก

5. กิตติกรรมประกาศ

ในบทความวิจัยนี้ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ช่วยเหลือในด้านเทคโนโลยีการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] R. J. Seymour and B. K. Garside, "Ultrafast Silicon Interdigital Photodiodes for Ultraviolet Applications", Canadian Journal of Physics, Vol. 63, No. 6, 1985, pp. 707-711.

[2] S. J. Schablitsky, E. Chen and S. Y. Chou, "A wavelength and Polarization Detector Using Monolithically Integrated Subwavelength MSM Photodetector", Device Research Conference Digest, 55th, 1997, pp.168-169.

[3] W. C. Koscielniak, R. M. Kolbas and M. A. Littlejohn, "Performance of Near-Infrared GaAs Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Photodetector with Islands", IEEE Electron Device Letters, Vol. 9, No. 9, 1988, pp. 485-487.

[4] S. Winnerl, D. Buca, S. Lenk, Ch. Buchal, S. Mantl and D.-X. Xu, " Fast IR Si/SiGe Superlattice MSM Photodetectors with Buried CoSi$_2$ Contacts", Microelectronic Engineering, Vol. 64, 2002, pp. 205-209.

[5] J.-I. Chyi, T.-S. Wei, J.-W. Hong, W. Lin and Y.-K. Tu, "Low Dark Current and High Linearity InGaAs MSM Photodetectors", Electronics Letters, Vol. 30, No. 4, 1994, pp. 355-356.

[6] R.-H. Yuang, J.-I. Chyi, Y.-J. Chan, W. Lin and Y.-K. Tu, "High-Responsivity MSM photodetectors with Semi-Transparent Schottky Contacts", Photonics Technology Letters, Vol. 7, No. 11, 1995, pp. 1333-1335.

[7] S. Khunkhao, T. Aoki, T. Masui and K. Sato, "Low-Noise Behavior of Planar Mo/n-Si/Mo Optical Sensor Structures" Solid-State Electronics, 2004, pp. 149-154.

[8] วรเทพ น้อยปรีชา, การออกแบบและสร้างโฟโตไดโอด Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดสั้น, บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2552.

[9] สมเกียรติ ศุภเดช, เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์, พิมพ์ครั้งที่ 2, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2547.

[10] Hamamatsu Corporation (online), "Silicon Photodiode : S1226-18BK",http://sales.hamamatsu.com/de/produkte/solid-statedivision/ si-photodiode-series/si photodiode/part-s1226-18bk.php.

[11] H. C. Lee and B. V. Zeghbroeck, "A Novel High-Speed Silicon MSM Photodetector Operating at 830 nm Wavelength", IEEE Electron Device Letters, Vol. 16, No. 5, 1995, pp. 175-177.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

การลดกระแสรั่วไหลของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ U-Shape

The Leakage Current Decrease of U-Shape Al/n-Si/Al Photodetector

ธนกฤต แสงโฮง[1], จิรวัฒน์ ปรายเขต[2] และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ[1]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 E-mail: Sanghong.T@gmail.com

[2]ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษาการลดกระแสรั่วไหลของตัวตรวจวัดแสง MSM โครงสร้าง Al/n-Si/Al โดยออกแบบโครงสร้างเป็นแบบกัดร่องลึก (U-Shape) หรือ U-MSM ที่บริเวณระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้มีบริเวณพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้น น่าจะทำให้มีกระแสแสงเพิ่มขึ้น แต่พบว่าตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นนี้ มีกระแสรั่วไหลที่ค่อนข้างสูง จึงมีการศึกษาการใช้เทคนิคในการเพิ่มความสูงของกำแพงศักย์ ซึ่งค่าความสูงของกำแพงศักย์นี้มีผลในการลดกระแสรั่วไหลในตัวอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นได้ โดยจะทำหน้าที่ต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนจากด้านโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งถือเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการลดกระแสรั่วไหล การเพิ่มความสูงของกำแพงศักย์นี้ทำได้โดยการใช้เวลาในการซินเตอริงนานขึ้น ซึ่งพบว่าสามารถลดกระแสรั่วไหลได้ถึง 2 เท่า แม้ว่าการเพิ่มเวลาในการซินเตอริงจะมีผลในการลดกระแสรั่วไหลแต่ก็ยังมีค่าที่สูงอยู่ ซึ่งทางผู้วิจัยจะทำการศึกษาหาวิธีการอื่นในการลดกระแสรั่วไหลต่อไป ในขณะที่เวลาในการซินเตอริงมีผลน้อยมากกับกระแสแสงที่เกิดขึ้น

คำสำคัญ: ตัวตรวจวัดแสง, ความสูงกำแพงศักย์, กระแสรั่วไหล

Abstract

This article studies the leakage current reducing of the MSM photodetector Al / n-Si / Al structure designed by etching trenches (U-Shape) or U-MSM at the distance between the electrodes. It has an area of increased exposure. It will increase the flow of light. However, the photodetector built which has a relatively high leakage current. The study used the techniques to increase the barrier height. The height of the barrier height is effective in reducing leakage current in the created device. It acts as a resistance to the flow of electrons from the metal to the semiconductor. This is the important parameter in reducing leakage current, increasing the height of the potential barrier is achieved by the longer time of the sintering which was found to reduce the leakage current of up to 2-fold. Even increase the time in the sintering will reduce leakage current, but it also has a high value on. The researchers will conduct a study to find the other ways to reduce the leakage current at the time of sintering has little effect on the flow of light occurs.

Keywords: Photodetector, Barrier height, Leakage current

1. บทนำ

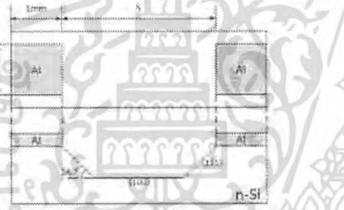
โครงสร้าง MSM หรือโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ เป็นอุปกรณ์ที่จัดอยู่ในประเภทกลุ่มของช็อตต์กี้ไดโอด มีวัตถุประสงค์เพื่อนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดแสง โดยมีโครงสร้างเป็นรอยสัมผัสช็อตต์-กี้ 2 รอยสัมผัสต่อแบบหันหลังชนกัน มีคุณสมบัติเด่นคือ ความจุไฟฟ้าต่ำ ทำงานด้วยความเร็วสูง มีเสถียรภาพที่ดี มีสภาพการตอบสนองที่ดี มีโครงสร้างที่ง่ายต่อกระบวนการสร้างและที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM อย่างหลากหลาย ซึ่งงานวิจัยที่เคยทำมาแล้วส่วนใหญ่จะเป็นโครงสร้างแบบพลานาร์

ในงานวิจัยนี้จะทำการวิจัยโดยเปลี่ยนจากโครงสร้างแบบพลานาร์เป็นแบบกัดร่องลึกลงไป หรือเรียกว่า U-Shape ซึ่งโครงสร้างนี้ยังไม่ค่อยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมากนัก ถือเป็นเทคนิคใหม่ในการสร้างตัวตรวจวัดแสง เทคนิคการกัดร่องลึกจะใช้สารละลายเตตระเมทธิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ในกระบวนการกัดแบบเปียก (wet etching) การกัดซิลิกอนโดยใช้สารละลายนี้จะทำให้เกิดสมบัติการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) [1] คือเป็นการเลือกระนาบและทิศทางในการกัดซิลิคอน ซึ่งอัตราการกัดของ TMAH ในผลึกซิลิคอนระนาบต่างๆ เรียงเป็นลำดับดังนี้ (100) > (110) > (111) [2] จะทำให้เราได้โครงสร้างที่เราต้องการ ซึ่งโครงสร้างแบบ U-Shape นี้จะช่วยให้มีพื้นที่รับแสงเพิ่มมากขึ้น จึงน่าจะทำให้มีกระแสแสงเพิ่มขึ้นด้วย แต่ยังพบว่าหลังจากสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ U-Shape เสร็จแล้วนั้น มีกระแสรั่วไหลค่อนข้างสูง ในงานวิจัยนี้จึงมีการศึกษาวิธีในการลดกระแสรั่วไหลขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือ MSM ชนิด Al/n-Si/Al บนแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ระนาบ (100) ความหนาของแผ่นซิลิคอน 625 µm และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า 75-95 Ω.cm ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงนี้จะสร้างลักษณะของขั้วไฟฟ้าขนาด 1×1 mm^2 มีความหนาของชั้นอลูมิเนียม 2 µm และกำหนดให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (electrode spacing ; S) มีขนาด 40 µm ดังแสดงในรูปที่ 1 ตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นจะเป็นแบบพลานาร์ จากนั้นจะนำตัวตรวจวัดแสงแบบพลานาร์ไปกัดร่องลึกด้วยกระบวนการกัดแบบเปียก โดยใช้สารละลาย TMAH มีอัตราส่วนระหว่าง TMAH:H_2O เท่ากับ 1:2 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 11 นาที แล้วนำชิ้นงานไปซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 ลิตร/นาที ก็จะได้ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ U-Shape หรือ U-MSM



รูปที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงแบบ U-Shape

3. ผลการทดลอง

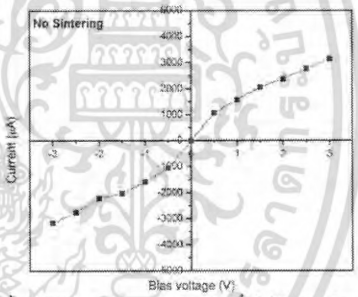
3.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

หลังจากสร้างชิ้นงานเสร็จเรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำไปซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 และ 30 นาที แล้วนำชิ้นงานมาวัดหาความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ U-MSM โครงสร้าง Al/n-Si/Al ขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบ โดยต่อชุดการทดลองดังรูปที่ 2 โดยป้อนแรงดันไบอัสตั้งแต่ -3 ถึง 3 V

รูปที่ 2 การวัดกระแส-แรงดัน

ตัวตรวจวัดแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีขั้วโลหะที่สร้างจากโลหะชนิดเดียวกัน คือ อลูมิเนียม (Al) ดังนั้นตัวตรวจวัดแสงในขณะสมดุล ตัวตรวจวัดแสงนี้จึงมีความสูงกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ของขั้วแคโทด (ϕ_{bn1}) และขั้วแอโนด (ϕ_{bn2}) มีขนาดเท่ากันหรือ $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$ แรงดันภายในของขั้วแคโทด (V_{bi1}) และขั้วแอโนด (V_{bi2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$ และความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_{d1}) และด้านแอโนด (W_{d2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $W_{d1} = W_{d2} = W_d$ ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3

ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสงไม่ได้รับแสงตกกระทบแต่มีการจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่ตัวตรวจวัดแสง โดยให้ขั้วโลหะด้านหนึ่งได้รับไบอัสตรง และขั้วโลหะอีกด้านได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ โดยขั้วโลหะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับนี้ จะส่งผลให้เกิดการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะ และมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากทางด้านโลหะ ข้ามกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ผลจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังกล่าวทำให้เกิดกระแสรั่ว หรือเรียกว่ากระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง มีทิศทางจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{sm}) ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่สามารถลดการเกิดกระแสมืดในตัวตรวจวัดแสงได้ คือ กำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนจากด้านโลหะไหลข้ามไปยังสารกึ่งตัวนำได้โดยง่าย



รูปที่ 3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อไม่ผ่านการซินเตอริง ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

ค่าความสูงของกำแพงศักย์นี้มีผลในการลดกระแสรั่วไหลในตัวอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นได้ โดยจะทำหน้าที่ต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนจากด้านโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ถือเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการบอกระดับกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นในช็อตต์กีย์ไดโอดได้จากสมการที่ (3) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลต่อขนาดของกำแพงศักย์ กระแสที่เกิดขึ้นในช็อตต์กีย์ไดโอดเท่ากับ

$$I = I_0\left\{\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right)-1\right\} \quad (1)$$

เมื่อให้แรงดัน $V_A = 0$ V ทำให้กระแส I มีค่าเท่ากับ I_0
โดย I_0 คือ กระแสอิ่มตัว มีค่าเท่ากับ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

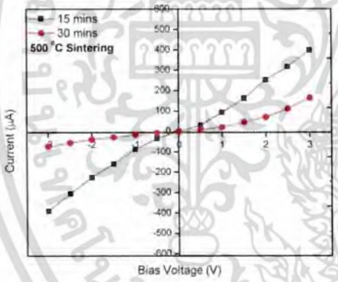
ดังนั้นความสูงกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์จึงสามารถหาได้จาก

$$\phi_{bn} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{ART^2}{I_0}\right) \quad (3)$$

โดยที่

k คือ ค่าคงที่ของโบลต์มันน์ มีค่าประมาณ 8.617×10^{-5} eV /K
T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่าประมาณ 110 $A.cm^{-2}.K^{-2}$ (n-Si)
q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าประมาณ 1.609×10^{-19} C
A คือ พื้นที่รอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ (cm^2)

เนื่องจากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าเมื่อทำการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จะทำให้มีค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ของรอยสัมผัส Al/n-Si มีค่าประมาณ 0.72 eV [3] และเมื่อทำการซินเตอริงเป็นเวลา 30 นาที ค่ากำแพงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.86 eV [4] จะเห็นได้จากรูปที่ 4 ซึ่งพบว่ามีกระแสรั่วไหลลดลงเนื่องจากมีค่าความสูงของกำแพงศักย์เพิ่มขึ้นจากเวลาที่ใช้ในการซินเตอริงเพิ่มขึ้น



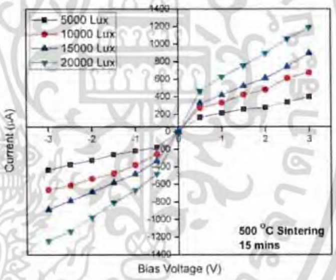
รูปที่ 4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อผ่านการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 °C ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

จากรูปที่ 3 และรูปที่ 4 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ U-MSM โครงสร้าง Al/n-Si/Al ขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบ พบว่า กระแสรั่วไหลของอุปกรณ์ U-MSM โดยอุปกรณ์ที่ไม่ผ่านการซินเตอริงจะมีค่ากระแสรั่วไหลประมาณ 3138 μA และจะมีค่าลดลงเมื่อทำการซินเตอริงเป็นเวลานานขึ้น อุปกรณ์ที่ผ่านการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 และ 30 นาที จะมีค่ากระแสรั่วไหลประมาณ 398 และ 164 μA ตามลำดับ เนื่องจากในช่วงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นช่วงที่ค่าความสูงของกำแพงศักย์มีค่าสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงของค่าความสูงกำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นนี้ มาจากอลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ โดยมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 660 องศาเซลเซียส ดังนั้นในช่วงที่อุณหภูมิอยู่ใกล้กับจุดหลอมเหลว จะทำให้อลูมิเนียมแพร่ลงไปในซิลิคอนชนิดเอ็น [5] แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสเปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการซินเตอริงเป็นเวลานานขึ้น ทำให้เป็นอัลลอย ซึ่งจะทำให้เป็นรอยสัมผัสที่ดียิ่งขึ้น

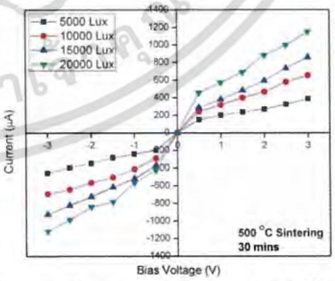
3.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันขณะได้รับแสงตกกระทบ

ความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ U-MSM โครงสร้าง Al/n-Si/Al ขณะที่มีแสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้มค่าต่างๆ โดยต่อชุดการทดลองดังรูปที่ 2 โดยป้อนแรงดันไบอัสตั้งแต่ -3 ถึง 3 V กระแสแสงหาได้จากสมการ (4)

พบว่าอุปกรณ์จะมีกระแสเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่มากขึ้นจากความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 พบว่าที่เวลาซินเตอริงที่ 15 และ 30 นาที โดยที่ความเข้มแสง 5000, 10000, 15000 และ 20000 Lux จะมีกระแสแสงประมาณ 400, 676.2, 897.2 และ 1190.7 μA ตามลำดับ และที่เวลาซินเตอริง 30 นาที จะมีกระแสแสงประมาณ 388, 653.2, 859.2 และ 1150.4 μA ตามลำดับ และมีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 7 ลักษณะกระแส-แรงดันที่ได้มีความสมมาตรดี



รูปที่ 5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อผ่านการซินเตอริงที่ อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 15 นาที ขณะได้รับแสงตกกระทบ



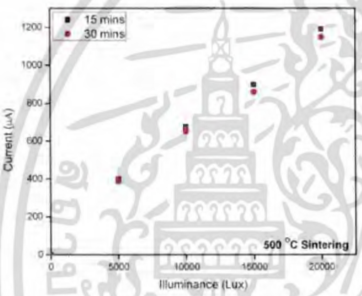
รูปที่ 6 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อผ่านการซินเตอริงที่ อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 30 นาที ขณะได้รับแสงตกกระทบ

$$I_P = I_{Mea} - I_{Dark} \quad (4)$$

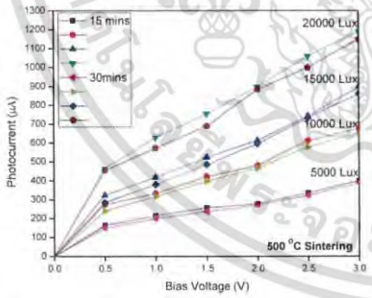
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8
Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

สำหรับกระแสแสง (I_p) หาได้จากกระแสที่ได้จากการวัด (I_{Mea}) ลบด้วยกระแสมืด (I_{Dark}) หรือกระแสรั่วไหล ตามสมการที่ (4) จะได้กราฟลักษณะกระแส-แรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งพบว่ากระแสงที่ความเข้มค่าเดียวกัน เมื่อเพิ่มเวลาในการซินเตอริงจะมีค่าเกือบเท่ากัน และกระแสแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มแสง ดังนั้นอาจพิจารณาได้ว่าเวลาในการซินเตอริงมีผลต่อกระแสแสงที่เกิดขึ้นน้อย แต่จะมีผลในการลดกระแสรั่วไหลของตัวอุปกรณ์มากกว่า อย่างไรก็ตามถึงแม้การเพิ่มเวลาในการซินเตอริงจะมีผลต่อการลดกระแสรั่วไหลในตัวอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นได้ แต่ก็ยังมีค่ากระแสรั่วไหลที่สูงอยู่



รูปที่ 7 ลักษณะสมบัติกระแส-ความเข้มแสงเมื่อผ่านการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 15 และ 30 นาที ขณะได้รับแสงตกกระทบ



รูปที่ 8 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อผ่านการซินเตอริงที่ อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 15 และ 30 นาที

4. สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของเวลาในการซินเตอริงเพื่อเพิ่มขนาดความสูงของกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์ ซึ่งความสูงของกำแพงศักย์ช็อตต์กีย์นี้มีผลต่อกระแสรั่วไหลของตัวอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเนื่องจากอุปกรณ์ U-MSM โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้นมีกระแสรั่วไหลที่ค่อนข้างสูง จึงใช้เทคนิคในการซินเตอริงเพื่อเพิ่มความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ขึ้น ซึ่งพบว่าสามารถลดระดับของกระแสรั่วไหลได้ถึง 2 เท่า แต่ก็ยังมีค่ากระแสรั่วไหลในระดับที่ยังสูงอยู่ ซึ่งทางผู้วิจัยจะทำการศึกษาหาวิธีการในการลดกระแสรั่วไหลต่อไป จากการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะได้รับแสงตกกระทบพบว่าตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นสามารถตอบสนองทางแสงได้ และเวลาที่ใช้ในการซินเตอริงไม่มีผลต่อกระแสแสงที่เกิดขึ้นมากนัก แต่มีผลในการลดกระแสรั่วไหลในตัวอุปกรณ์มากกว่า

5. กิตติกรรมประกาศ

ในบทความวิจัยนี้ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็คทรอนิกส์ (TMEC) ที่ช่วยเหลือในด้านเทคโนโลยีการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (STL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็คทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัย และขอขอบคุณศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ธัญญะ ศักดิ์โสภิษฐ์. "ทรานดิวส์เซอร์ความดันชนิดซิลิกอนแบบเปียโซรีซิสทีปบนไดอะแฟรมบาง". วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2534

[2] Darling R.B. "Wet Etching" [Online]. Available :http://www.virlab.virginia.edu/nanoscience_class/lecture_notes/Microfabrication_Supporting_materials_files/R_B_Darling%20%20Washington%20U%20-%20WetEtching.pdf. 2015

[3] ธเนศ โชะเหม. "การออกแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลานาร์".วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548

[4] ศนิ กลิ่นสนิท. "การศึกษากระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติของซิลิกอนช็อตกีย์ไดโอดที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลตทินัม". วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา ไมโครอิเล็กทรอนิกส์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556

[5] สรายุทธ์ วิศวแสวงสุข, การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al. บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ. 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายธนกฤต แสงโฮง
วัน เดือน ปีเกิด	28 กันยายน 2534
ที่อยู่	109/10 หมู่ 3 ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2556 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ โซลิดสเตทอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	กระบวนการสปัตเตอร์ริง

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] **ธนกฤต แสงโฮง**, ไอลดา สุวรรณชาตรี, งามจิต มงคลธนานนท์, นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ, **"การศึกษาเสถียรภาพทางอุณหภูมิของช็อตต์กีย์ไดโอดที่ผ่านการฉายรังสีเอกซ์หลังจากแพร่อะตอมสารเจือแพลทินัม"**, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7, หน้า 287-290, 27-29 พฤษภาคม 2558

[2] งามจิต มงคลธนานนท์, วุฒิไกร คำอ่อน, **ธนกฤต แสงโฮง**, ยุทธนา แจ้งอรุณ, วรเทพ น้อยปรีชา และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ, **"การศึกษาสมบัติของกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตจที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดสั้น"**, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38, Volume II หน้า 663-666, 18-20 พฤศจิกายน 2558

[3] ยุทธนา แจ้งอรุณ, **ธนกฤต แสงโฮง,** วุฒิไกร คำอ่อน, งามจิต มงคลธนานนท์, วรเทพ น้อยปรีชา, รังสรรค์ เมืองเหลือ และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ, **"การศึกษาการหาค่าตัวแปรของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si ด้วยเทคนิคต่างๆ"**, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38, Volume II หน้า 683-686, 18-20 พฤศจิกายน 2558

[4] **ธนกฤต แสงโฮง**, ยุทธนา แจ้งอรุณ, วุฒิไกร คำอ่อน, งามจิต มงคลธนานนท์, วรเทพ น้อยปรีชา และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ, **"การศึกษาสภาพการตอบทางแสงและประสิทธิภาพควอนตัม ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al"**, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38, Volume II หน้า 769-772, 18-20 พฤศจิกายน 2558

[5] **ธนกฤต แสงโฮง**, จิรวัฒน์ ปราบเขต และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ, **"การลดกระแสรั่วไหลของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ U-Shape"**, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8, หน้า 169-172, 25-27 พฤษภาคม 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้