

การสร้างนาโนพอร์ซิลิกอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี

FORMATION OF NANOPOROUS SILICON BY ELECTROCHEMICAL ETCHING



กาจปัญญา สุวรรณสุข  
KAJPANYA SUWANSUKHO

พ.ศ.  
๒๕๔๙  
๑๕๔๙

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 60538  
วัน,เดือน,ปี - ๓ ก.ค. 2549

.b. 11๕๙๐๐๐2  
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1778-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# FORMATION OF NANOPOROUS SILICON BY ELECTROCHEMICAL ETCHING



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE  
OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2005

ISBN 974-15-1778-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างนาโนพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี
นักศึกษา	นายกาจปัญญา สุวรรณสุขโข
รหัสประจำตัว	45064003
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว

### บทคัดย่อ

นาโนพอร์สซิลิกอน ถูกเตรียมด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมีบนแผ่นซิลิกอนชนิดพี ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยใช้แหล่งกำเนิดกระแสและแหล่งกำเนิดแรงดัน สมบัติพื้นผิวตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าจากการใช้แหล่งกำเนิดกระแสมีค่าสูงกว่าแหล่งกำเนิดแรงดัน ขณะที่แหล่งกำเนิดแรงดันจะให้ลักษณะของรูพรุนและเส้นผ่านศูนย์กลางที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ และโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิกอนจากทั้งสองแหล่งกำเนิด สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสและเวลาที่ใช้ในการกัด สมบัติทางแสงตรวจสอบด้วยระบบวัดโฟโตเคอร์เรนต์สเปกโตรสโคปี ผลจากการวัด แสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ควอนตัมคอนไฟน์เมนต์ ของนาโนพอร์สซิลิกอน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงได้

Thesis Title	Formation of Nanoporous Silicon by Electrochemical Etching
Student	Mr. Kajpanya Suwansukho
Student ID.	45064003
Degree	Master of Science
Programme	Applied Physics
Year	2005
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jiti Nukeaw

## ABSTRACT

Nanoporous silicon samples were prepared by electrochemical etching of p- type silicon wafer in HF solution by using current source and voltage source. The surface was observed by scanning electron microscope(SEM). The electrochemical reaction rate using current source is relatively higher than voltage source. Meanwhile pore shape and pore diameter using voltage source show higher uniformity than the other. The crystalline structure of nano-scale porous structure can be varied by changing current density and etching time. Optical properties was investigated by photocurrent spectroscopy(PC). PC spectrum showed the quantum confinement effect of nanoporous silicon. This porous silicon can be used as photodetector device application.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ ก็ด้วยบุคคลและการให้กำลังใจจากหลายฝ่าย ดังนี้

1. ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้โอกาสในการเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท

2. ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีไทยไมโครอิเล็กทรอนิกส์แห่งชาติ ที่เชื้อเพื่อแผ่นซิลิกอนและเครื่องมือในการการวิเคราะห์

3. ความสำเร็จหลักของงานวิทยานิพนธ์นี้ ต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง ต่ออาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. จิติ หนูแก้ว ที่คอยกำกับดูแล ให้คำปรึกษา และแก้ปัญหา มาอย่างดียิ่งตลอดการทำวิจัย

4. ขอกราบขอบพระคุณ พ.ท. สามารถ สุวรรณสุข นางจุไร สุวรรณสุข ผู้ซึ่งเป็นบิดามารดาของผู้จัดทำ ที่คอยเป็นห่วงเป็นใย และคอยสนับสนุนช่วยเหลือในด้านต่างๆ มาตลอดชีวิตของผู้จัดทำ

5. ขอขอบคุณ นายสิงหนาท สุวรรณสุข นางสาวจุฬาลักษณ์ สุวรรณสุข และนางสาววิศรา ละอองศรี ที่คอยให้กำลังใจ และเฝ้าถามถึงความก้าวหน้า อยู่อย่างเสมอ

6. ขอขอบคุณเป็นพิเศษ ในความเป็นกัลยาณมิตร ของสมาชิกทั้งเก่าและใหม่ของห้องปฏิบัติการวิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสง ที่จะต้องขอเอ่ยชื่อไว้ด้วย ดังนี้ ผศ. วิษณุ เพชรภา ฟิสิกส์ ศาพร ภรธีรภัทร ฟิสิกส์ชาติ กมลดิลก ฟิสิกส์ ค่ายทับทิม ฟิสิกส์ชาติ สังข์ทอง เพื่อนโม(ทุติยภรณ์ ทิวาวงศ์ ) น้องวิน บรรจงปรุ น้องสากล ระหงษ์ น้องเบญจพล ต้นฐี่ น้องวิฑูรย์ ยินดีสุข น้องอรรณพ คล้าชื่น น้องนพพันธ์ ชัยนภิก น้องอนุศิษย์ แก้วประจักษ์และน้องอรรณพ จันท์หอม

คุณค่าและประโยชน์อันได้ ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขออุทิศให้กับ ผู้ที่กล่าวถึงข้างต้น ด้วยจิตคารวะ

กาญจน์ญา สุวรรณสุข

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำวิจัย.....	1
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 พอร์สซิลิกอน.....	3
2.1.1 การเกิดพอร์สซิลิกอน.....	3
2.1.2 กลไกในการเกิดพอร์สซิลิกอน.....	4
2.1.3 ความพรุนของพอร์สซิลิกอน.....	8
2.2 ลักษณะของแถบพลังงาน.....	9
2.3 ปฏิกิริยาการควอนตัมคอนไฟน์เมนต์.....	10
2.4 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์.....	14
2.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	14
2.4.2 โฟโตเคอร์เรนท์สเปกโตรสโคปี.....	16
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	19
3.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน.....	19
3.2 ขั้นตอนการปลูกชั้นซิลิโคน.....	20
3.3 ขั้นตอนการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน.....	21
3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.4.1 การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	23
3.4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยระบบวัดโฟโตเคอร์เรนท์.....	23
บทที่ 4 ผลงานวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....	25
4.1 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบเลือนกราดของพอร์สซิลิกอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดกระแส.....	25
4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยโฟโตเคอร์เรนท์ของพอร์ส ซิลิกอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดกระแส.....	29
4.3 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบเลือนกราดของพอร์สซิลิกอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดแรงดัน.....	30
4.4 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยโฟโตเคอร์เรนท์ของพอร์ส ซิลิกอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดกระแส.....	33
บทที่ 5 การประยุกต์ใช้งาน.....	35
5.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของตัวตรวจรับแสงนาโนพอร์สซิลิกอน.....	35
5.2 ขั้นตอนการประดิษฐ์ตัวตรวจรับแสงนาโนพอร์สซิลิกอน.....	37
5.3 ผลการทดสอบและการวัดการตอบสนองต่อแสง.....	37
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	41
เอกสารอ้างอิง.....	44
ประวัติผู้เขียน.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน.....	22
5.1 ตัวตรวจรับแสงนาโนพอร์สซิลิกอน.....	37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพแสดงกระบวนการกักทางไฟฟ้าเคมี.....	3
2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ พอร์สซิลิกอนจะเกิดขึ้นได้ ก็ต่อเมื่อ $j_{PS} < j_{ep}$ .....	4
2.3 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกักเนื้อของผลึกซิลิกอน.....	5
2.4 การเกิดพอร์สซิลิกอน (รูปบน) สถานะเริ่มต้น การเกิดพอร์สเป็นไปอย่างสุ่มบนพื้นผิวของ ซิลิกอน (รูปกลาง) กระบวนการปรับตัวตนเอง(Self – regulating process)เมื่อพื้นที่ว่าง เกิดการซ้อนทับกัน การเกิดรูพรุนจะเปลี่ยนจากแบบไอโซโทรปิก(Isotropic growth) เป็น แบบไดเรกชันนอล(Directional growth) (รูปล่าง) เฉพาะปลายยอดของรูพรุนเท่านั้นที่ เกิดปฏิกิริยา.....	7
2.5 แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์สซิลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ.....	9
2.6 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอน.....	9
2.7 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างพอร์สซิลิกอนกับซิลิกอนที่ซึ่งโครงสร้างของผลึก ซิลิกอนขนาดเล็กลงจนเพียงพอที่จะแสดงพฤติกรรมควอนตัมคอนไฟน์เมนต์.....	10
2.8 แสดงบ่อศักย์สี่เหลี่ยมสูงอนันต์ (Infinite Square well potential).....	12
2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของขนาดเม็ดผลึกระดับนาโนเมตร กับค่าแถบพลังงานต้องห้าม.....	14
2.10 องค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	14
2.11 โฟโตเคอร์เรนท์ ในสารกึ่งตัวนำ.....	17
3.1 สารเคมีและเครื่องอัลตราโซนิกที่ใช้ในการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน.....	19
3.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน.....	20
3.3 แสดงลักษณะของระบบ อาร์เอฟ แมกนีตรอนสเป็คเตอริง.....	20
3.4 แสดงการจัดอุปกรณ์และเครื่องมือ.....	21
3.5 ระบบการกักทางไฟฟ้าเคมี.....	22
3.6 แสดงลักษณะกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	23
3.7 การจัดอุปกรณ์ ในการวัดโฟโตเคอร์เรนท์.....	24
3.8 แผนภาพแสดงไดอะแกรมระบบวัดโฟโตเคอร์เรนท์.....	24
4.1 ภาพถ่ายด้านบน และภาคตัดขวาง ของ ตัวอย่างที่ 1.....	26
4.2 ภาพถ่ายด้านบน ภาคตัดขวาง และความลึกของตัวอย่างที่ 2.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ภาพถ่ายด้านบน ภาคตัดขวาง และความลึกของตัวอย่างที่ 3.....	27
4.4 ภาพถ่ายด้านบน ภาคตัดขวาง และความลึกของตัวอย่างที่ 4.....	27
4.5 ภาพถ่ายด้านบน ภาคตัดขวาง และความลึกของตัวอย่างที่ 5.....	28
4.6 ภาพถ่ายจาก FESEM ของพอร์ซซีลิกอนที่สร้างโดยใช้แหล่งกำเนิดกระแส ก) เส้นใยระดับนาโน ที่มีขนาดอยู่ในระดับต่ำกว่า 1 นาโนเมตร ข) กลุ่มของผลึกระดับนาโนเมตร (nano-crystallite) ที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 5 -20 นาโนเมตร.....	28
4.7 กราฟโฟโตเคอร์เรนซ์ ของตัวอย่างที่ 1 2 และ 3 ของแหล่งกำเนิดกระแส ที่ใช้ความหนาแน่นกระแส 16 mA/cm <sup>2</sup> และเวลาในการกัด 10 20 และ 30 นาที ตามลำดับ.....	29
4.8 กราฟโฟโตเคอร์เรนซ์ ของตัวอย่างที่ 3 4 และ 5 ของแหล่งกำเนิดกระแส ที่ใช้เวลาในการกัด 30 นาที และความหนาแน่นกระแส 16 32 และ 64 mA/cm <sup>2</sup> ตามลำดับ.....	30
4.9 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างที่ 6.....	31
4.10 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างที่ 7.....	31
4.11 ภาพถ่ายด้านบน และภาคตัดขวาง ของ ตัวอย่างที่ 8.....	31
4.12 ภาพถ่ายด้านบน และภาคตัดขวาง ของ ตัวอย่างที่ 9.....	32
4.13 ภาพถ่ายด้านบน ภาคตัดขวาง และความลึกของตัวอย่างที่ 10.....	32
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความลึกของพอร์ซซีลิกอน.....	33
4.15 กราฟโฟโตเคอร์เรนซ์ ของตัวอย่างที่ 8 9 และ 10 ของแหล่งกำเนิดแรงดัน ที่ใช้เวลาในการกัด 30 นาที ความหนาแน่นกระแส 16 32 และ 64 mA/cm <sup>2</sup> ตามลำดับ.....	33
5.1 ข้อดีที่แบเรียซึ่งเกิดจากการที่พอร์ซซีลิกอนสัมผัสกับอินเดียมฯ ซึ่งมีค่าฟังก์ชันงานสูงกว่า ก.) แผนภาพพลังงานขิงอินเดียมและพอร์ซซีลิกอนก่อนการต่อกัน ข.) แผนภาพพลังงานของหัวต่อที่สภาวะสมดุล.....	36
5.2 แสดงผลการทดสอบการตอบสนองต่อแสงชนิดพี.....	37
5.3 ก) ผลการทดสอบการตอบสนองต่อแสง ข) ความยาวคลื่นตอบสนอง ของอุปกรณ์ตัวที่ 1... 38	
5.4 ก) ผลการทดสอบการตอบสนองต่อแสง ข) ความยาวคลื่นตอบสนอง ของอุปกรณ์ตัวที่ 2...39	
5.5 ก) ผลการทดสอบการตอบสนองต่อแสง ข) ความยาวคลื่นตอบสนอง ของอุปกรณ์ตัวที่ 3...40	

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำวิจัย

เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ ได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องมากกว่า 40 ปี และหลังจากที่ได้มีการประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์ขึ้นในปี พ.ศ. 2490 ซิลิกอนจึงได้เริ่มเข้ามามีบทบาท ในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำเป็นอย่างมาก ซิลิกอนถูกนำมาใช้เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ ในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์(Microelectronics)เป็นเวลานานแล้ว แต่เนื่องจากว่า ซิลิกอนมีโครงสร้างแถบพลังงานแบบไม่ตรง(Indirect bandgap) ทำให้สารกึ่งตัวนำชนิดนี้ ไม่เหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้ ในงานทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์(Optoelectronics) แต่หลังจากการค้นพบคุณสมบัติในการเปล่งแสง(Luminescent) ที่อุณหภูมิห้อง[1] ของผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ จำนวนมาก และเรียกผลึกซิลิกอนที่มีโครงสร้างในลักษณะเช่นนี้ว่า พอร์สซิลิกอน(Porous Silicon) ซึ่งเกิดขึ้นจากขบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมี(Electrochemical etching) จึงทำให้เกิดแนวทางที่สามารถจะนำเอาผลึกซิลิกอนมาใช้เป็นวัสดุพื้นฐานในการสร้างอุปกรณ์ทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ได้ พอร์สซิลิกอน ไม่เหมือนกับ บัลค์ซิลิกอน(Bulk Silicon) เนื่องจากว่าพอร์สซิลิกอนสามารถเปล่งแสงได้ จากงานศึกษาและวิจัยหลายๆปีที่ผ่านมา พบว่าการเปล่งแสง ไม่ได้เกิดขึ้นจากพื้นผิวส่วนที่เหลือหลังจากผ่านขบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมี แต่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ทางควอนตัม ที่เกี่ยวข้องกับขนาดที่เล็กลงของโครงสร้างซิลิกอน พอร์สซิลิกอนประกอบด้วยรูพรุนในระดับแมโครเมตร(macrometer) ไมโครเมตร(micrometer) และ นาโนเมตร(nanometer) โดยที่รูพรุนในระดับนาโนเมตรเป็นที่สนใจมาก ซึ่งรูพรุนในระดับนี้ จะถูกเรียกว่า นาโนพอร์สซิลิกอน(Nanoporous Silicon) นาโนพอร์สซิลิกอนมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้งาน เช่น ไดโอดเปล่งแสง(Light-Emitting Diodes) ท่อนำคลื่น(Waveguides) ตัวตรวจจับแสง(Photodetector) และ เซ็นเซอร์แก๊ส(Gas sensor) เป็นต้น แต่ว่าประสิทธิภาพทางควอนตัม(Quantum efficiency) ของนาโนพอร์สซิลิกอน ยังค่อนข้างต่ำและไม่เสถียร เมื่อเปรียบเทียบกับ สารประกอบกึ่งตัวนำในหมู่ 3-5(III - V compound semiconductor) ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นอย่างมาก ในการทำความเข้าใจ ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างในระดับนาโนเมตร(Nanostructure) ลักษณะทางแสง(Optical features) และลักษณะทางไฟฟ้า(Electrical features)ที่เป็นฟังก์ชันของตัวแปรในการสร้างนาโนพอร์สซิลิกอน

จากที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้เราพบเทคนิคที่ประหยัดและง่ายในการลดมิติของระบบอิเล็กทรอนิกส์ในซิลิกอน ซึ่งจะมีผลทำให้สามารถ ทำการพัฒนาสร้างอุปกรณ์เปล่งแสงและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์รับแสง ให้รวมอยู่กับอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นๆ บนฐานรองซิลิกอนเดียวกันได้ ทำให้ภายในอนาคตอันใกล้นี้การติดต่อรับส่งข้อมูลต่างๆ ภายในวงจรรวมหรือระหว่างวงจรรวมด้วยกัน จะมีการเปลี่ยนแปลงมาใช้สัญญาณแสงแทนการใช้สัญญาณไฟฟ้า ทั้งนี้เนื่องจากการติดต่อรับส่งข้อมูลโดยใช้สัญญาณแสงนั้นสามารถที่จะติดต่อรับส่งข้อมูลได้คราวละมากๆ ในเวลาเดียวกัน โดยไม่มีการรบกวนกันของสัญญาณเหมือนกับที่เกิดขึ้นกับสัญญาณไฟฟ้า

## 1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการสร้างนาโนพอร์ซิลิกอน ด้วยกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมี
- 1.2.2 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ทางควอนตัม เนื่องจากขนาดที่ลดลงอยู่ในระดับนาโนเมตรของผลึกซิลิกอน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาถึงศักยภาพในการประยุกต์ใช้งานเป็น ตัวตรวจวัดแสง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในการศึกษานี้ จะศึกษาถึงกระบวนการสร้างนาโนพอร์ซิลิกอนด้วยกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมี โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขต่างๆ ในการที่จะทำให้เกิดนาโนพอร์ซิลิกอน เช่น ความหนาแน่นกระแส อัตราส่วนสารละลาย และเวลาที่ใช้ในการกัด(Etching time) หลังจากนั้นนำตัวอย่าง(Sample)ที่ได้ ไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(Scanning Electron Microscope) เพื่อศึกษาถึงสัณฐานวิทยาของชั้นนาโนพอร์ซิลิกอน และ ศึกษาการตอบสนองต่อแสงด้วยชุดวัดโฟโตเคอร์เรนต์(Photocurrent) ผลลัพธ์ที่ได้จะนำไปวิเคราะห์ เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ ตรวจวัดแสง ตามลำดับ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถสร้างนาโนพอร์ซิลิกอนด้วยกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีได้
- 1.4.2 สามารถอธิบายปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นได้
- 1.4.3 สามารถใช้เครื่องมือวิจัย ในการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของนาโนพอร์ซิลิกอนได้
- 1.4.4 สามารถสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสง ที่สามารถใช้งานได้จริง

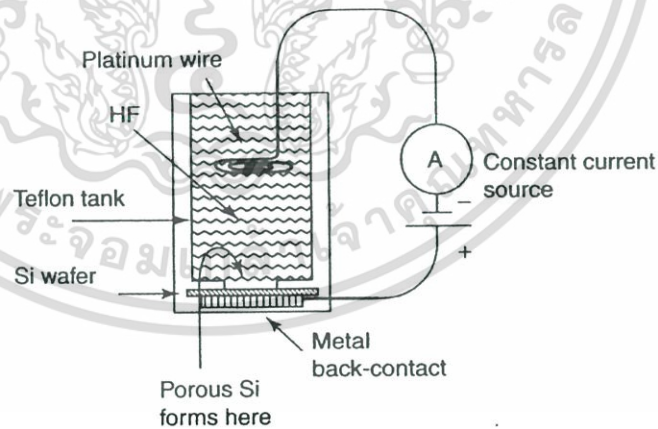
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พอร์สซิลิกอน

#### 2.1.1 การเกิดพอร์สซิลิกอน

พอร์สซิลิกอน เป็นที่ทราบกันดีว่าเกิดขึ้นเนื่องจาก ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีของซิลิกอนกับ สารละลายที่มีส่วนประกอบของไฮโดรฟลูออริก ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นเนื่องจากการจ่ายกระแส คงที่เข้าไปในระบบ รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพ ระบบการกัดทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งประกอบด้วย แผ่น ซิลิกอนที่ต่ออยู่กับขั้วบวกด้านหลัง ส่วนขั้วลบสามารถใช้ ขดแพลทินัม(Platinum spiral) หรือ เป็นแบบแผ่นตาข่ายกลม(Circular grid) หรือไม้ก็เป็นวัสดุที่ทนต่อไฮโดรเจนฟลูออไรด์และเป็น วัสดุนำไฟฟ้า วัสดุที่ใช้บรรจุสารละลาย ทำจากโพลีเมอร์(Polymer)ที่ทนกรดได้สูง เช่น เทฟลอน (Teflon) สำหรับสารละลายอิเล็กโทรไลต์(Electrolyte) จะประกอบด้วย ไฮโดรฟลูออริก(HF) ความบริสุทธิ์สูง เจือจางด้วย เอทานอล( $C_2H_5OH$ ) ซึ่งจะทำให้ได้กรดไฮโดรโฟบิก(Hydrophobic) และคุณลักษณะของกรดไฮโดรโฟบิกนี้ มีความสามารถในการแทรกซึมเข้าไปในรูพรุนได้ มีผลทำ ให้มีมิติความพรุนในทางลึกมากขึ้น ซึ่งไฮโดรฟลูออริกไม่สามารถทำได้ ด้วยวิธีการนี้ เราสามารถ ควบคุมทั้งความพรุน ความหนา และความต่อเนื่อง(uniformity) ของชั้นพอร์สซิลิกอนได้

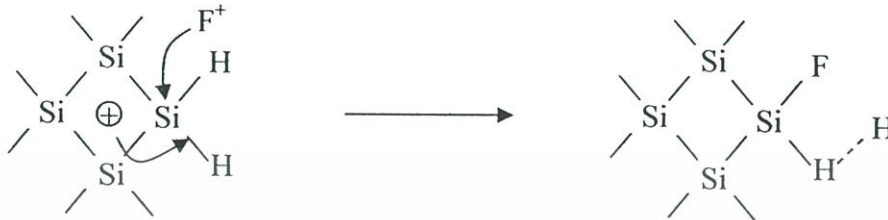


รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมี

จากการศึกษาที่ผ่านมา[2] พอร์สซิลิกอนสร้างได้จากการกัดทางไฟฟ้าเคมีในสารละลาย ไฮโดรฟลูออริกเจือจาง หรือ สารละลายเอทานอิกไฮโดรฟลูออริก(Ethanoic HF solution) รูปที่ 2.2 เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ ของสารละลายไฮโดร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไม่สามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนได้(Si-H)แต่เมื่อไรก็ตามที่มีการไบอัลคัยไฟฟ้าให้กับซิลิโคน จันพหะโฮล

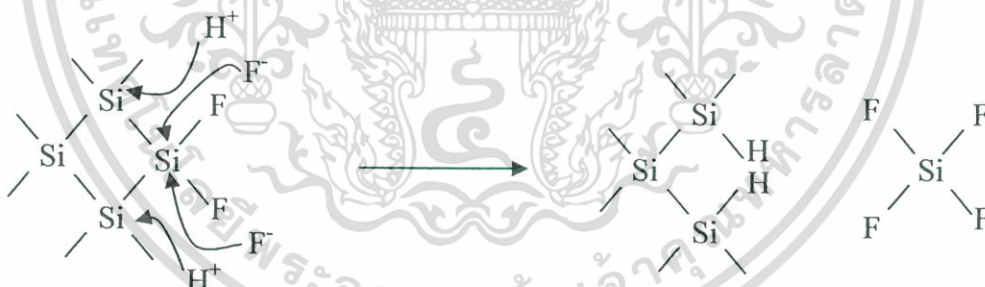
ขั้นตอนที่ 1



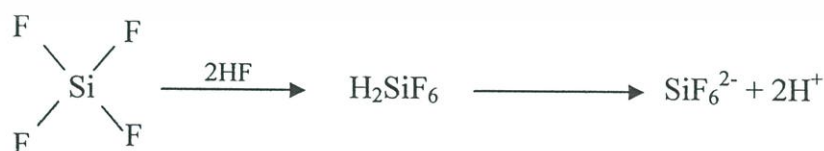
ขั้นตอนที่ 2



ขั้นตอนที่ 3



ขั้นตอนที่ 4



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเคลื่อนที่มาถึงบริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่ผิวสามารถถูกทำลายได้โดยไอออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรด เกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับฟลูออรีน(Si-F) ขึ้นมาแทน ดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 1 นอกจากนั้นไอออนของฟลูออรีน อีกตัวที่อยู่ในสารละลายสามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอม ที่ยังคงเหลืออยู่อีกข้างหนึ่งได้ พร้อมกับมีการปลดปล่อยพาหะอิเล็กตรอน 1 ตัว ไปยังขั้วแอโนด และเกิดโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน(H<sub>2</sub>) ขึ้น ดังแสดงในขั้นตอนที่ 2 ต่อจากนั้นก็เกิดการเหนี่ยวนำว่าเลนทืออิเล็กตรอน โดยกลุ่มของพันธะเคมีซิลิกอนกับฟลูออรีนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 มีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับซิลิกอนที่อยู่ถัดเข้ามามีความแข็งแรงลดลง ทำให้พันธะเคมีดังกล่าวสามารถที่จะถูกทำลายได้โดยไอออนของฟลูออรีน เกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับฟลูออรีนขึ้นมาแทนที่ ดังแสดงในขั้นตอนที่ 3 จากขั้นตอนนี้เองจะเห็นได้ว่าอะตอมของซิลิกอนจะถูกดึงให้หลุดออกมาจากผิวหน้าของผลึกซิลิกอน พร้อมกับเกิดพันธะเคมีระหว่างไฮโดรเจนกับซิลิกอนอะตอมที่อยู่ถัดเข้ามา และในขั้นตอนที่ 4 อะตอมซิลิกอนและฟลูออไรด์ที่หลุดออกมา จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรฟลูออริก ได้เป็นไดไฮโดรเจนซิลิกอนเฮกซะฟลูออไรด์(H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>)

ส่วนปฏิกิริยาเคมีในการกัดที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้



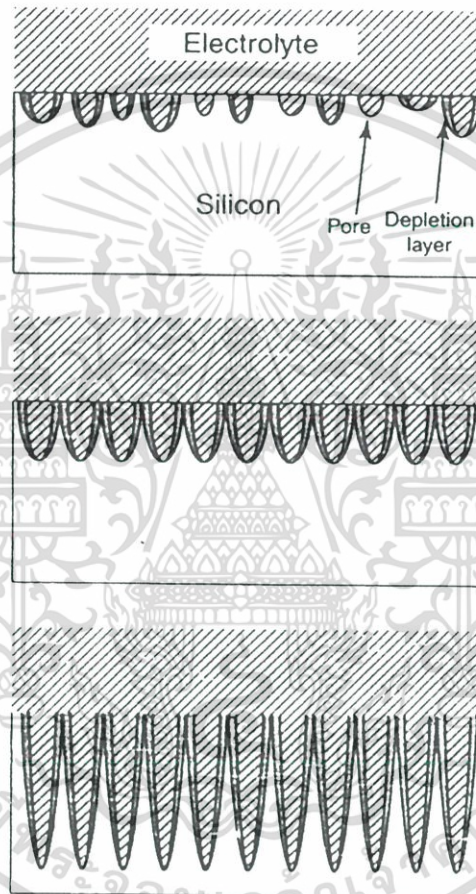
จากสมการที่ (2.2) และ (2.3) สามารถเขียนสมการปฏิกิริยาเคมีรวม ได้เป็น



จากสมการเคมีที่แสดงข้างต้น เริ่มต้นจากปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ (2.1) ที่มีผลึกซิลิกอน เป็นสารเริ่มต้น อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยในปฏิกิริยาเคมีนี้จำเป็นต้องอาศัยไฮล ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจะทำให้เกิด ซิลิกอนไดฟลูออไรด์(SiF<sub>2</sub>) กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ดังแสดงในสมการที่(2.2) ได้ผลลัพธ์เป็น ซิลิกอนเตตระฟลูออไรด์(SiF<sub>4</sub>) ในระหว่างกระบวนการกัดขั้นตอนนี้เอง สามารถสังเกตได้ว่าจะเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนขึ้นที่ผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่ถูกกัด สุดท้ายก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง ซิลิกอนเตตระฟลูออไรด์ กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ เป็นสารละลาย H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ดังแสดงในสมการที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2.3) กลไกนี้ อธิบายอยู่บนพื้นฐานของปฏิกิริยาออกซิเดชันของพันธะพื้นผิว(Surface bound oxidation) ที่มีการจับโฮล(Hole capture) และตามด้วยการฉีดอิเล็กตรอน(Electron injection) ซึ่งนำไปสู่สถานะออกซิเดชันซิลิกอนไดวาเลนต์(Divalent Si oxidation state) พอร์ซิลิกอนที่เกิดขึ้น พื้นที่ระหว่างรูพรุนจะเป็นพื้นที่ปลอดโฮล ยิ่งไปกว่านั้นการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ปลายยอดของรูพรุนเท่านั้น ตามรูปที่ 2.4 ด้วยวิธีนี้ กระบวนการกัดจะเกิดขึ้นในแนวลึกตามทิศทางของกระแสที่ไบอัสภายในซิลิกอน



รูปที่ 2.4 การเกิดพอร์ซิลิกอน (รูปบน) สถานะเริ่มต้น การเกิดพอร์เป็นไปอย่างสุ่มบนพื้นผิวของซิลิกอน (รูปกลาง) กระบวนการปรับด้วยตนเอง(Self – regulating process) เมื่อพื้นที่ว่างเกิดการซ้อนทับกัน การเกิดรูพรุนจะเปลี่ยนจากแบบไอโซโทรปิก(Isotropic growth) เป็นแบบไดเรกชันนอล(Directional growth) (รูปล่าง) เฉพาะปลายยอดของรูพรุนเท่านั้นที่เกิดปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะทำให้เกิดพอร์สซิลิกอน ประกอบด้วย

2.1.2.1 แผ่นซิลิกอนจะต้องไบอัสด้วยกระแส(Current anodic bias) โดยที่ ซิลิกอนชนิดพี จะใช้การไบอัสไปข้างหน้า(Forward bias) และ ไบอัสย้อนกลับ(Reverse bias)สำหรับซิลิกอนชนิดเอ็น

2.1.2.2 สำหรับซิลิกอนชนิดเอ็นและซิลิกอนชนิดพีแบบกึ่งตัวนำ – ฉนวน(semi – insulating p-type) จำเป็นต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงด้วย

2.1.2.3 ความหนาแน่นกระแสต้องต่ำกว่าค่าวิกฤติ  $j_{ep}$

เงื่อนไขข้อที่ 1 และ 2 เกิดจากความจริงที่จำเป็นต้องใช้โพล ในระหว่างกระบวนการกัดซิลิกอน ขณะที่เงื่อนไขข้อที่ 3 เป็นข้อที่ต้องหลีกเลี่ยง เนื่องจากปฏิกิริยาจะถูกจำกัดด้วยการถ่ายเทมวล (Mass transfer) ระหว่างสารละลาย โพลจำนวนมากจะอยู่ที่รอยต่อระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะทำให้เกิดกระบวนการกัดผิวหน้าขึ้น

### 2.1.3 ความพรุนของพอร์สซิลิกอน

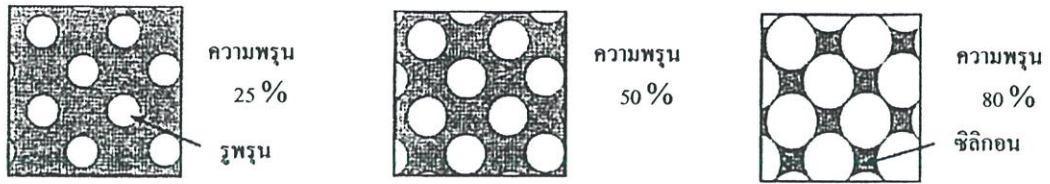
เป็นที่ทราบกันแล้วว่า พอร์สซิลิกอนนั้น ก็คือ ผลึกที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยขนาดของเนื้อผลึกที่เหลือนั้น และขนาดของรูพรุน จะมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร เนื้อของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตรนี้จะแสดงคุณสมบัติทางควอนตัม ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อของผลึกในระดับนาโนเมตร กับขนาดของรูพรุน จะมีผลต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยที่ ความพรุน มีนิยามก็คือ จำนวนของอากาศในวัสดุหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการตัวอย่างเช่น ความพรุน 45% หมายความว่า ในวัสดุนี้ประกอบด้วย 45% ของอากาศ และ 55% ของเนื้อวัสดุ เทคนิคที่ถูกนำมาใช้ในการวัดหาค่าความพรุนของวัสดุ จะใช้เทคนิคที่เรียกว่า การวิเคราะห์โดยน้ำหนัก(Gravimetric method) โดยอาศัยหลักการ การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุก่อนและหลังการเกิดรูพรุน ซึ่งค่าความพรุนของวัสดุใดๆ จะพิจารณาได้ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความพรุน} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \times 100 \quad (2.5)$$

โดยที่  $m_1$  คือ น้ำหนักของวัสดุเริ่มต้นก่อนเกิดรูพรุน

$m_2$  คือ น้ำหนักของวัสดุหลังเกิดรูพรุน

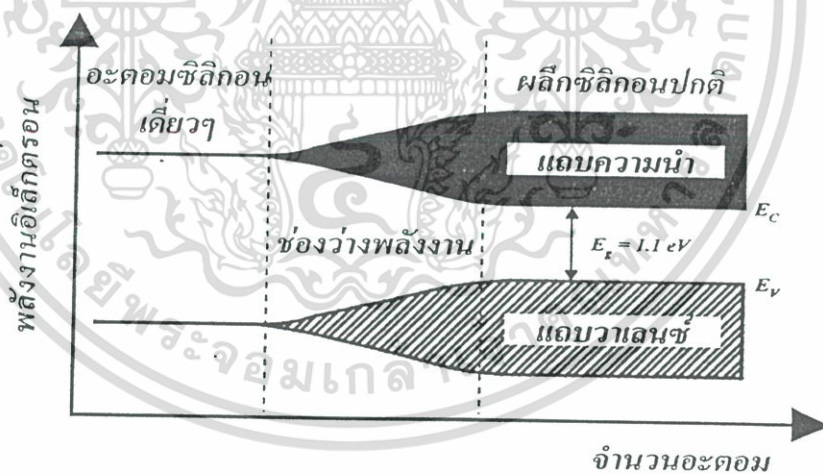
$m_3$  คือ น้ำหนักของวัสดุส่วนที่เหลือหลังจากลอกชั้นความพรุนออก



รูปที่ 2.5 แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์ซซิลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ

## 2.2 ลักษณะของแถบพลังงาน

จากหลักการแถบพลังงาน เมื่ออะตอมของผลึกซิลิกอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จะเกิดการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงานภายในอะตอม ทำให้เกิดการแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แตกแยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนของอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 จากหลักการนี้เองถ้าเราสามารถทำการลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ ก็จะทำให้ปฏิกริยาระหว่างอะตอมที่มีต่อกันนั้นมีจำนวนลดลงด้วย ซึ่งจะมีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนช่องว่างแถบพลังงาน (band gap energy) ที่จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิลิกอนเดิม (ซึ่งมีจำนวนอะตอมซิลิกอนอยู่ภายในประมาณ  $10^{22}$  อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)

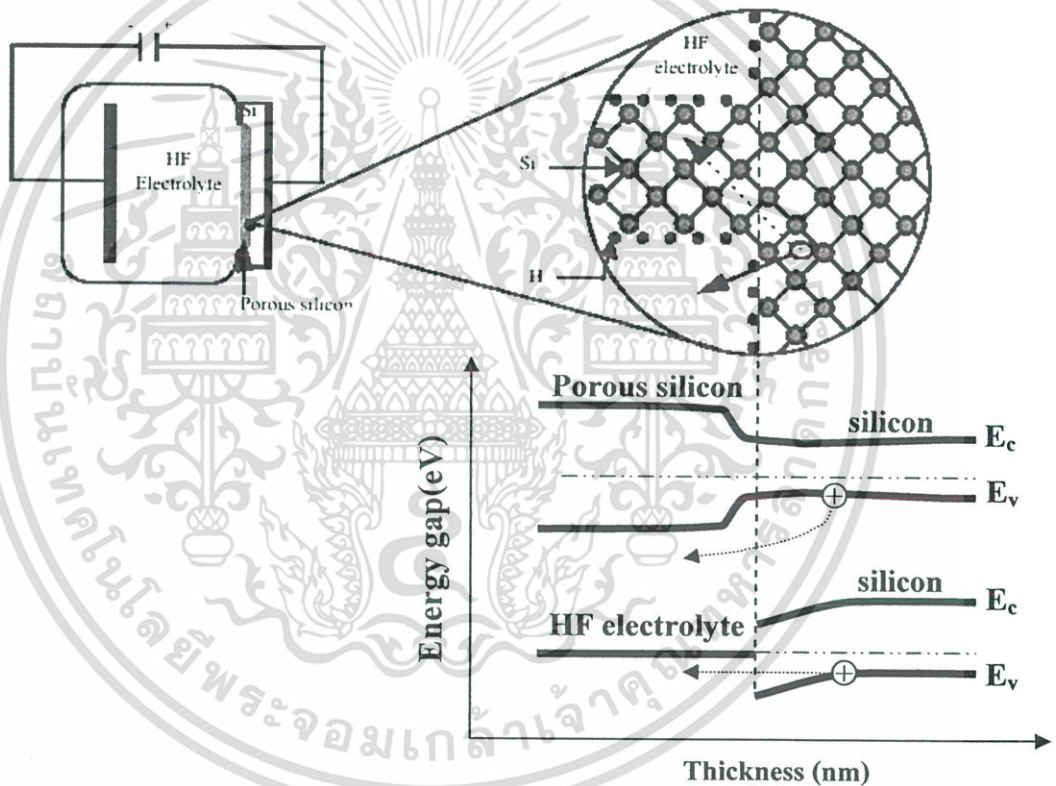


รูปที่ 2.6 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอน

จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนมีค่าลดลง จะมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนลงนั้นสามารถทำได้โดยการลดหรือบีบขนาดของโครงสร้างของผลึกซิลิกอนให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับนาโนเมตร ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม อันจะมีผลทำให้ลักษณะโครงสร้างของช่องว่างพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกเดิม เรียกปรากฏการณ์ลักษณะนี้ว่า ปรากฏการณ์ขนาดทางควอนตัม(Quantum size effect) ซึ่งทำให้มีค่าพลังงานเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงนี้ โดยลักษณะของแถบพลังงานดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 ซึ่งความกว้างของช่องว่างพลังงาน( $E_{PS}$ ) มีค่าขึ้นอยู่กับขนาดโครงสร้างระดับนาโนเมตรของพอร์สซิลิกอน จากรูปที่ 2.7 (บนขวา) แสดงโครงสร้างอะตอมของผลึกซิลิกอนที่ถูกแยกด้วยรูพรุน 2 รู และความเป็นไปได้ 2 วิธี ในการที่โฮลจะข้ามรอยต่อระหว่างซิลิกอนกับพอร์สซิลิกอน รูปที่ 2.7 (ล่าง) แสดงแผนภาพของแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างพอร์สซิลิกอนกับซิลิกอน และความแตกต่างกันของ 2 กำแพงศักย์ ในการที่โฮลจะข้ามกำแพงศักย์ทั้งจากซิลิกอนไปยังพอร์สซิลิกอนและจากซิลิกอนไปยังสารละลายอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 2.7 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างพอร์สซิลิกอนกับซิลิกอน ที่ซึ่งโครงสร้างของผลึกซิลิกอนขนาดเล็กลงจนเพียงพอที่จะแสดงพฤติกรรมควอนตัมคอนไฟน์เมนต์[5]

### 2.3 ปรากฏการณ์ควอนตัมคอนไฟน์เมนต์

จากการค้นพบการเปล่งแสงที่อุณหภูมิห้องของพอร์สซิลิกอน ทำให้มีการอธิบายถึงปรากฏการณ์ควอนตัมคอนไฟน์เมนต์ พอร์สซิลิกอน ก็เหมือนกันกับ โครงสร้างในระดับนาโนเมตรแบบอื่นๆ ซึ่งพาหะ(carrier) จะถูกขังอยู่ในขอบเขตของโครงสร้าง ระดับนาโนเมตรที่อยู่ในบริเวณที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีแถบพลังงานกว้าง พาหะที่ถูกขังจะมีพลังงานสูง และด้วยเหตุนี้ โครงสร้างแถบพลังงานของนาโนพอร์ซิลิกอน จึงมีความแตกต่างกับบัลค์ซิลิกอน(bulk silicon) โดยอาศัยแบบจำลองมวลประสิทธิผล ซึ่งสร้างขึ้นเพื่อ ศึกษาพฤติกรรมของอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในสนามพลังงานศักย์ของผลึก เมื่อได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายนอก (E) อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\hbar^2} \left( \frac{d^2 E}{dk^2} \right) qE \quad (2.6)$$

ในกรณีที่ไม่มีสนามพลังงานศักย์ ความเร่งของอิเล็กตรอนมวล  $m$  พิจารณาได้จาก

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{m} qE \quad (2.7)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่(2.6) กับ (2.7) จะได้ว่าอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในสนามพลังงานศักย์แบบเป็นคาบในผลึก จะมีพฤติกรรมที่แสดงให้เห็นว่ามวลของอิเล็กตรอนมีค่าเป็น

$$m^* = \hbar^2 / \left( \frac{d^2 E}{dk^2} \right) \quad (2.8)$$

เมื่อ  $m^*$  คือมวลประสิทธิผล

โดยอาศัยแบบจำลองนี้ เราสามารถประมาณค่าโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำได้ พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของอิเล็กตรอนอิสระกับ เวกเตอร์คลื่น

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \quad (2.9)$$

สมมติให้สารกึ่งตัวนำมีแถบพลังงานแบบตรง ซึ่งแถบพลังงานต้องห้าม อยู่ที่  $k=0$  เขียนสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E \approx E_0 + \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{\partial^2 E}{\partial k_i \partial k_j} \Big|_{k=0} k_i k_j \quad (2.10)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.10) ด้วยมวลประสิทธิผลจากสมการที่ (2.8) เราสามารถหาพลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่เหนือขอบต่ำสุดของแถบความนำ ที่  $k$  ใด ๆ ได้ดังนี้

$$E_c(k) = E_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \quad (2.11)$$

$E_c$  คือ ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำ

$m_e^*$  คือ มวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอน

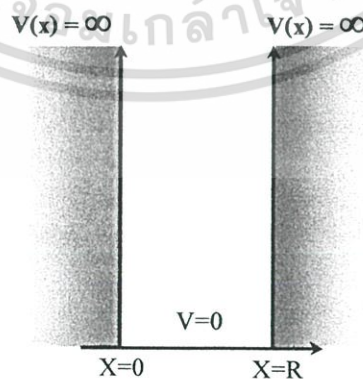
เช่นเดียวกัน เราสามารถหาพลังงานของโฮล ที่อยู่ต่ำกว่าขอบสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ที่  $k$  ใด ๆ ได้ดังนี้

$$E_v(k) = E_v - \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} \quad (2.12)$$

$E_v$  คือ ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำ

$m_h^*$  คือ มวลประสิทธิผลของโฮล

เมื่อพิจารณาที่พื้นผิวของนาโนพอร์ซซิลิกอน จะประกอบด้วยโครงสร้างที่ลดขนาดลงของผลึกซิลิกอนจนอยู่ในระดับนาโนเมตร โดยอาศัยทฤษฎีบ่อควอนตัม ในกรณีที่เป็นบ่อศักย์สูงอนันต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงบ่อศักย์สี่เหลี่ยมสูงอนันต์ (Infinite Square well potential)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของบ่อควอนตัมกว้าง  $R$  มีความสูงอนันต์จะได้ว่า

$$k = \frac{n\pi}{R}; \quad n = 1, 2, 3 \quad (2.13)$$

พิจารณาที่  $n = 1$  จะได้ว่า

$$k = \frac{\pi}{R} \quad (2.14)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.11) ลงด้วยสมการที่ (2.12) จะได้

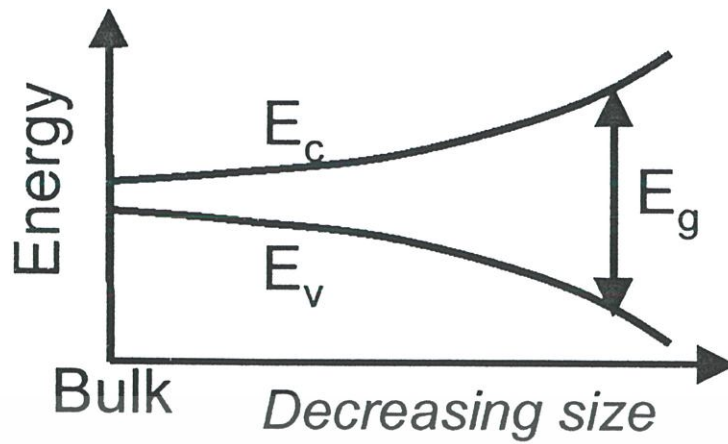
$$E_{g,ps} = E_{g,bulk} + \frac{\hbar^2 k^2}{2} \left( \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (2.15)$$

ยกกำลังสองสมการที่(2.14) แล้วแทนลงในสมการที่(2.15) เราจะได้

$$E_{g,ps} = E_{g,bulk} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2R^2 \mu} \quad (2.16)$$

$$\text{เมื่อ } \frac{1}{\mu} = \left( \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right)$$

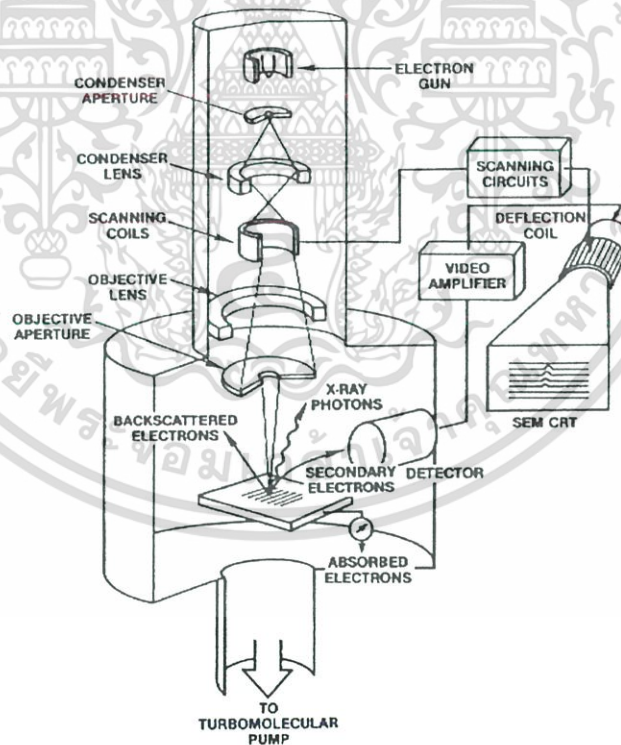
จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.16) สามารถนำมาเขียนกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.9 จาก รูปแสดงให้เห็นว่า เมื่อขนาดของโครงสร้างผลึกลดลงจนอยู่ในระดับนาโนเมตร ค่าแถบพลังงาน ต้องห้าม มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งเมื่อขนาดของโครงสร้างผลึกลดลงจนถึงค่า ๆ หนึ่งจะ เกิดการเปลี่ยนเฟส (Phase transition) จากโครงสร้างผลึก (Crystal) เป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งไม่สามารถหาค่าความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามได้



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของขนาดเม็ดผลึกระดับนาโนเมตร กับค่าแถบพลังงาน ต้องห้าม

## 2.4 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์

### 2.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด



รูปที่ 2.10 องค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่าง โดยตรวจสอบได้จาก การบังคับลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแล้วแสดงผลบนจอหลอดรังสีแคโทด (cathode ray tube;CRT) มีลักษณะของภาพเป็นภาพขาวดำ มีกำลังขยาย 10 – 300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง หลักการทำงาน คือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสารตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron : SE) และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector) นำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอ CRT การทำงานของกล้อง SEM เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเรียกว่า แคโทด (Cathode) เนื่องจากเป็นขั้วลบ ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูงในช่วง 1 – 40 keV พร้อมทั้งบีบกลุ่มอิเล็กตรอนให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยระบบของเลนส์อิเล็กตรอน (Electron lens) ซึ่งมี 2 ชนิด คือ เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) และเลนส์วัตถุ (Objective lens) ทำหน้าที่โฟกัสภาพ ขณะเดียวกันลำอิเล็กตรอนจะกวาดไปบนผิวสารตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (Scanning coils) บนระนาบ x – y สิ่งสำคัญของการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด คือการเลือกสัญญาณจากอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับอะตอมของสารตัวอย่างมาสร้างเป็นภาพ ความต่างจากผลของอันตรกิริยาต่อชนิดของสารตัวอย่างขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของธาตุในเนื้อสารตัวอย่างและกระบวนการวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจจับสัญญาณ แบบต่างๆ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ มีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่าง เนื่องจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกมาส่วนมากจะมาจากบริเวณผิวของสารตัวอย่าง สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron : PE) ถ่ายโอนพลังงานให้แก่อะตอมของสารตัวอย่าง บริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของสารตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอมอิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อีกทั้งสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิมองไปกระตุ้นอะตอมของสารตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวสารตัวอย่าง โอกาสที่สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ จะหลุดออกมาจากชั้นความลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกดึงเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของสารตัวอย่างจะมีสัญญาณหลายชนิด ดังนั้นต้องเลือกสัญญาณเฉพาะที่ต้องการ ในกรณีของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าจากตัวตรวจจับสัญญาณ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งมีพลังงานต่ำจะเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณผิวของสารตัวอย่างหลังจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าที่ถูกไบแอสไว้ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะเคลื่อนเข้าสู่บริเวณ scintillator ซึ่งทำมาจาก  $\text{CaF}_2$  และฉาบผิวด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อลูมิเนียมบางทำหน้าที่เป็น collector โบแอสต์กึ่งไฟฟ้าที่ 12 kV ซึ่งสนามโบแอสต์นี้จะเร่งให้สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเคลื่อนเข้าชน scintillator ทำให้เกิดสัญญาณแสง และจะถูกส่งไปตาม light guide เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วจึงทำการขยายสัญญาณ เพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอ CRT กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนถูกบีบเป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของสารตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุด scanning coils ซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กควบคุมการกราดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งการกราดบนผิวของสารตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่างๆ สัญญาณควบคุมการกราดบนพื้นผิวนี้อาจทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้น ในขณะเดียวกันสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืดสว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกราดของลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์แบบ SEM เนื่องจากพื้นที่แสดงจอภาพ CRT โตกว่าพื้นที่การกราดบนผิวของสารตัวอย่างโดยลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์ ดังนั้นจึงเกิดความสัมพันธ์ของกำลังขยายของภาพขึ้นดังนี้

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{พื้นที่บน CRT}}{\text{พื้นที่ของการกราดบนสารตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน}} \quad (2.17)$$

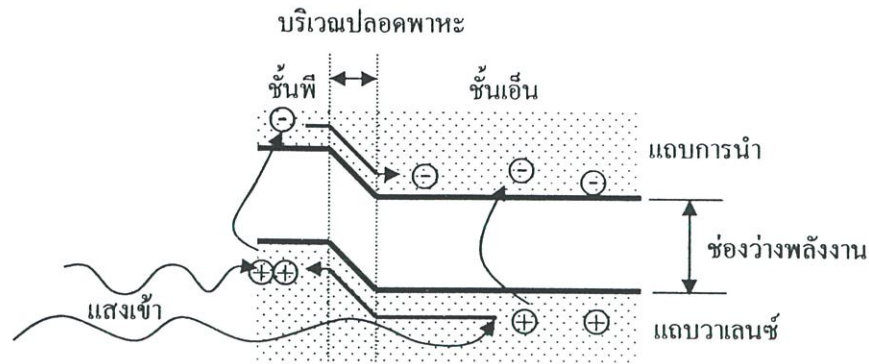
ชุดของ scanning coils นี้เป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน และนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย ซึ่งลักษณะความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพที่ออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกราดมีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าการใช้ความเร็วต่ำในการกราด

#### 2.4.2 โฟโตเคอร์เรนต์สเปกโตรสโคปี

โฟโตเคอร์เรนต์สเปกโตรสโคปี(Photocurrent spectroscopy; PC) เป็นวิธีการหนึ่ง ที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติทางแสงและไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นการวัดกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ รูปที่ 2.11 แสดงกลไกของขบวนการโฟโตเคอร์เรนต์ จากรูปที่ 2.11 เมื่อแสงตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำ คู่อิเล็กตรอน-โฮล จะเกิดขึ้น เป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้า และเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไปจะส่งผลทำให้อิเล็กตรอน และโฮล ต่างเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้าม เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าขึ้น ในการวิเคราะห์กระแสโฟโตเคอร์เรนต์ที่เกิดขึ้น จะเริ่มต้นจากอัตราการ recombination ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$R = \frac{\Delta n}{t} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 โฟโตเคอร์เรนท์ ในสารกึ่งตัวนำ

เมื่อ  $\Delta n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น และ  $\tau$  คือ เวลาชีวิต(lifetime) ของพาหะส่วนเกิน ในกรณีที่ไม่ได้รับแสง การนำไฟฟ้าพิจารณาได้จาก

$$\sigma_0 = q(\mu_n n_0 + \mu_p p_0) \quad (2.19)$$

เมื่อ  $n_0$  และ  $p_0$  คือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนและโฮลขณะที่ยังไม่ได้รับแสง และ  $\mu_n$  และ  $\mu_p$  คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับและถ้ามีแสงตกกระทบ ความหนาแน่นของพาหะส่วนเกินจะเท่ากันนั่นคือ  $\Delta n = \Delta p$  และสมการที่ 2.19 จะเปลี่ยนเป็น

$$\sigma = q[\mu_n (n_0 + \Delta n) + \mu_p (p_0 + \Delta p)] \quad (2.20)$$

ความหนาแน่นพาหะส่วนเกินจะมีค่าคือ  $\Delta n = \Delta p = G\tau$  เมื่อ  $G$  คือ อัตราการก่อกำเนิด (Generation rate) และการเปลี่ยนแปลงการนำไฟฟ้าเนื่องจากการที่สารกึ่งตัวนำได้รับสัญญาณแสง จะถูกเรียกว่า โฟโตคอนดักติวิตี(Photoconductivity) มีนิยามดังนี้

$$\Delta\sigma = q\Delta p(\mu_n + \mu_p) \quad (2.21)$$

ความหนาแน่นกระแสจะถูกกำหนดโดย

$$J = J_d + J_L = (\sigma_0 + \Delta\sigma)F_{el} \quad (2.22)$$

เมื่อ  $J_d$  คือ ความหนาแน่นกระแสขณะที่ไม่ได้รับแสง (dark current density)  $J_L$  คือ ความหนาแน่นกระแสขณะที่มีแสงตกกระทบ และ  $F_{el}$  คือ สนามไฟฟ้า ดังนั้นกระแสโฟโตเคอร์เรนต์ คือ

$$\begin{aligned} I_{ph} &= J_L A \\ &= q \Delta p (\mu_n + \mu_p) A F_{el} \\ &= q G_L \tau (\mu_n + \mu_p) A F_{el} \end{aligned} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $A$  คือ พื้นที่ที่แสงตกกระทบ และ  $\mu_n F_{el}$  และ  $\mu_p F_{el}$  คือ ความเร็วของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลา (transit time) ของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ เราสามารถนิยาม การเปลี่ยนแปลงตามเวลาดังกล่าวได้ดังนี้

$$t_{tr} = \frac{L}{\mu_n F_{el}} \quad (2.24)$$

เมื่อ  $L$  คือ ความหนาของชั้น แทนสมการที่ 2.24 ลงในสมการที่ 2.23 กระแสโฟโตเคอร์เรนต์จะเปลี่ยนเป็น

$$I_{ph} = q G \left( \frac{\tau}{t_{tr}} \right) \left( 1 + \frac{\mu_p}{\mu_n} \right) A L \quad (2.25)$$

สมการนี้คือ กระแสโฟโตเคอร์เรนต์ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำที่ต่อเป็นอุปรกรณ์แล้ว

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

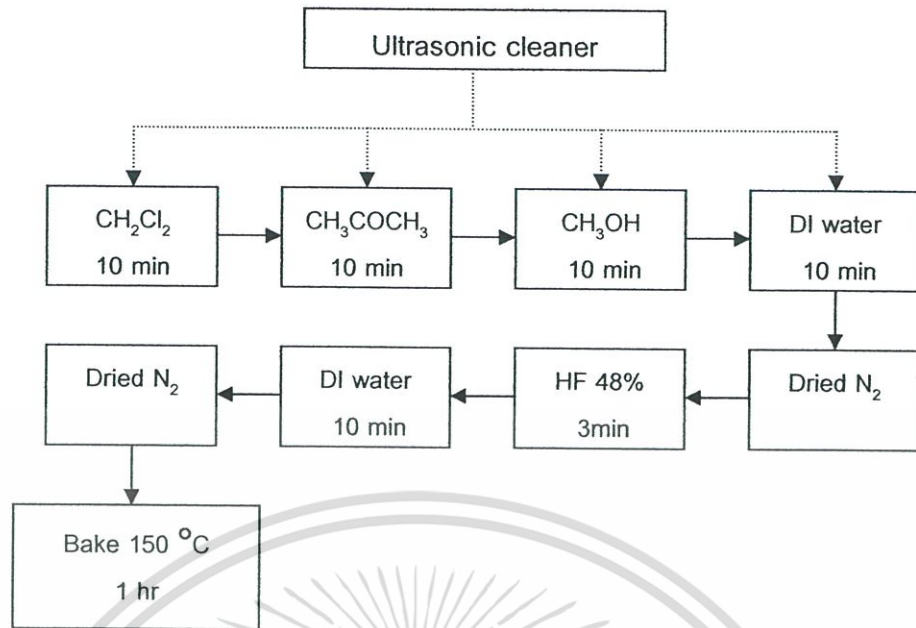
#### 3.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

รูปที่ 3.1 แสดงสารเคมีและเครื่องอัลตราโซนิก ที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน สำหรับแผ่นซิลิกอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะเป็นชนิดพี และมีขั้นตอนในการทำ ความสะอาด ตาม ขบวนการดังรูปที่ 3.2 โดยก่อนการทำ ความสะอาด เราจะทำการขัดผิวด้านหลัง ด้วยกระดาษทรายอย่างละเอียด เพื่อกำจัดชั้นออกไซด์ที่อาจจะเป็นฉนวน หลังจากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการทำความสะอาด โดยเริ่มจากการล้างไขมันบนแผ่นซิลิกอนด้วยไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane;  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ) เป็นเวลา 10 นาที ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone;  $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ ) 10 นาที จากนั้นล้างด้วยเมทานอล (Methanol;  $\text{CH}_3\text{OH}$ ) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดไขมันที่เหลือ ในขั้นตอนทั้งสามจะทำในเครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic cleaner) จากนั้นล้างด้วยน้ำไร้ประจุ (deionized water; DI water) และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ขั้นตอนต่อไป จะทำการกัดชั้นออกไซด์ที่ผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF 48%) เป็นเวลา 3 นาที แล้วล้างด้วยน้ำไร้ประจุและเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้ง จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 3.1 สารเคมีและเครื่องอัลตราโซนิกที่ใช้ในการทำ ความสะอาดแผ่นซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

### 3.2 ขั้นตอนการปลูกชั้นอลูมิเนียม

ซิลิกอนที่ผ่านขั้นตอนการทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว จะถูกนำไปปลูกชั้นอลูมิเนียม ด้านหลัง ความหนา 200 นาโนเมตร ด้วยระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง(RF magnetron sputtering) ดังรูปที่ 3.3 เพื่อช่วยให้การฉุดกระแสในระหว่างขบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีดีขึ้น หลังจากนั้น จะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 200 องศา เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ชั้นอลูมิเนียมยึดเกาะดียิ่งขึ้น

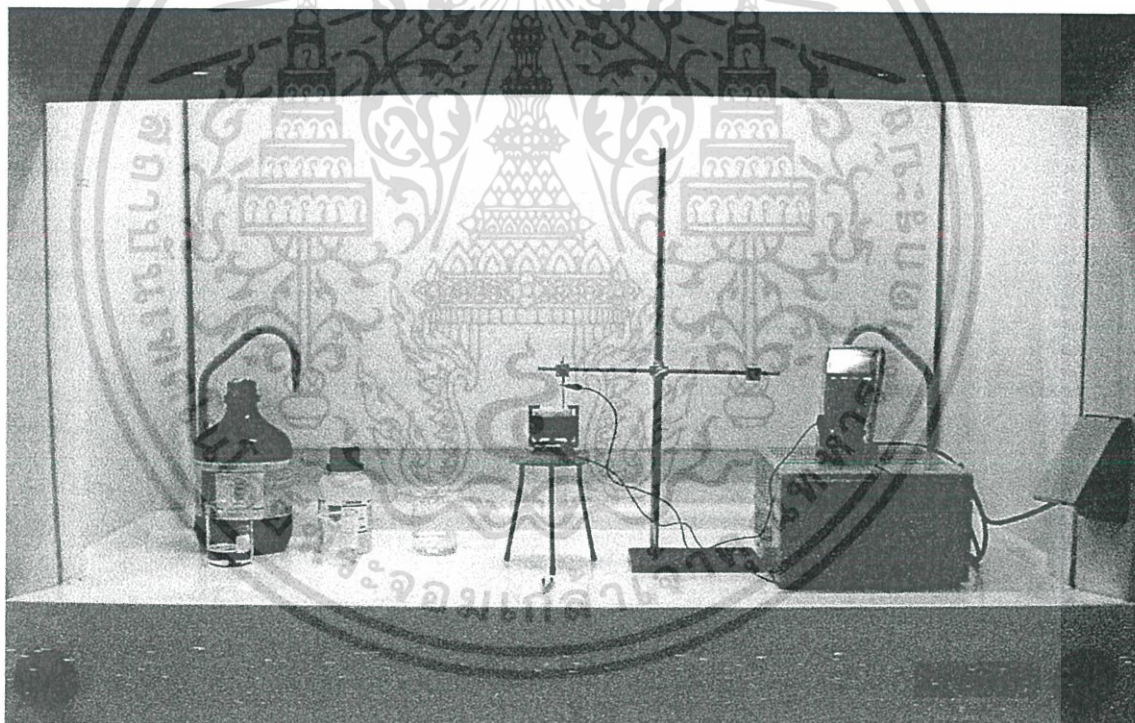


รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของระบบ อาร์เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น มิใช่ผู้จัดทำเห็นประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ขั้นตอนการสร้างชั้นพอร์ซซีลิกอน

รูปที่ 3.4 แสดงภาพการจัดอุปกรณ์ เพื่อทำการทดลองการสร้างชั้นพอร์ซซีลิกอนด้วยการกัดทางไฟฟ้าเคมี โดยวิธีการทดลองจะเริ่มจาก แผ่นซิลิกอนที่ผ่านการปลูกชั้นออลูมิเนียมแล้ว จะถูกตัดออกเป็นชิ้นมีพื้นที่ประมาณ  $1.5 \times 1.5$  ตารางเซนติเมตร ซิลิกอนที่ถูกตัดเป็นชิ้นแล้ว จะถูกนำไปใส่ในภาชนะดังรูปที่ 3.5 เติมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเป็นสารผสมระหว่าง กรดไฮโดรฟลูออริก(HF 48%):เอทานอล:น้ำ ในอัตราส่วนผสม 1:2:1 โดยปริมาตร ขั้วลบจะใช้ลวดทองแดงขดเป็นแบบก้นห้อย เพื่อให้ฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการลอยออกมาได้ และมีออลูมิเนียมเป็นขั้วบวก ภาชนะบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเป็นเทฟลอน(Taflon) ซึ่งสามารถทนกรดได้ เจือไนท์ที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์ซซีลิกอนจะเป็นดังตารางที่ 1 หลังจากเสร็จสิ้นการสร้างชั้นพอร์ซซีลิกอนแล้ว พอร์ซซีลิกอนจะถูกนำไปล้างด้วยน้ำไร้ประจุ ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจะนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศา เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

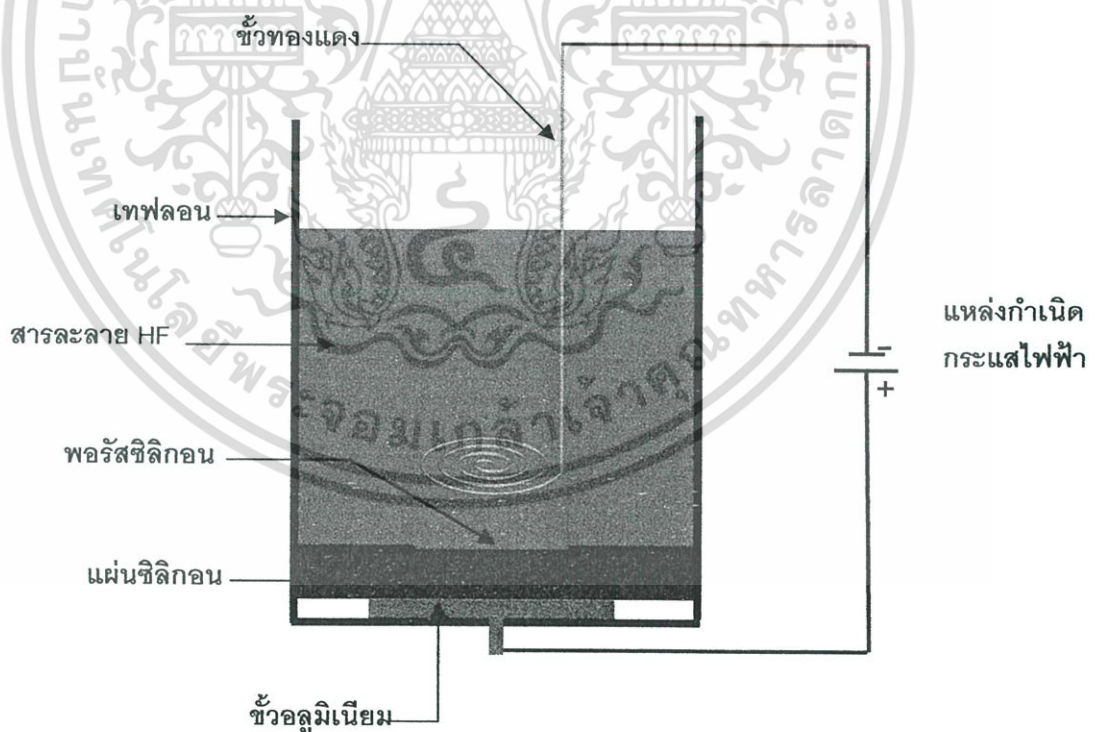


รูปที่ 3.4 แสดงการจัดอุปกรณ์และเครื่องมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน

ตัวอย่าง	ความหนาแน่นกระแส (mA/cm <sup>2</sup> )	เวลาที่ใช้ในการกัด (min)	แหล่งกำเนิดไฟฟ้า
1	16	10	กระแส
2	16	20	
3	16	30	
4	32	30	
5	64	30	
6	16	10	แรงดัน
7	16	20	
8	16	30	
9	32	30	
10	64	30	



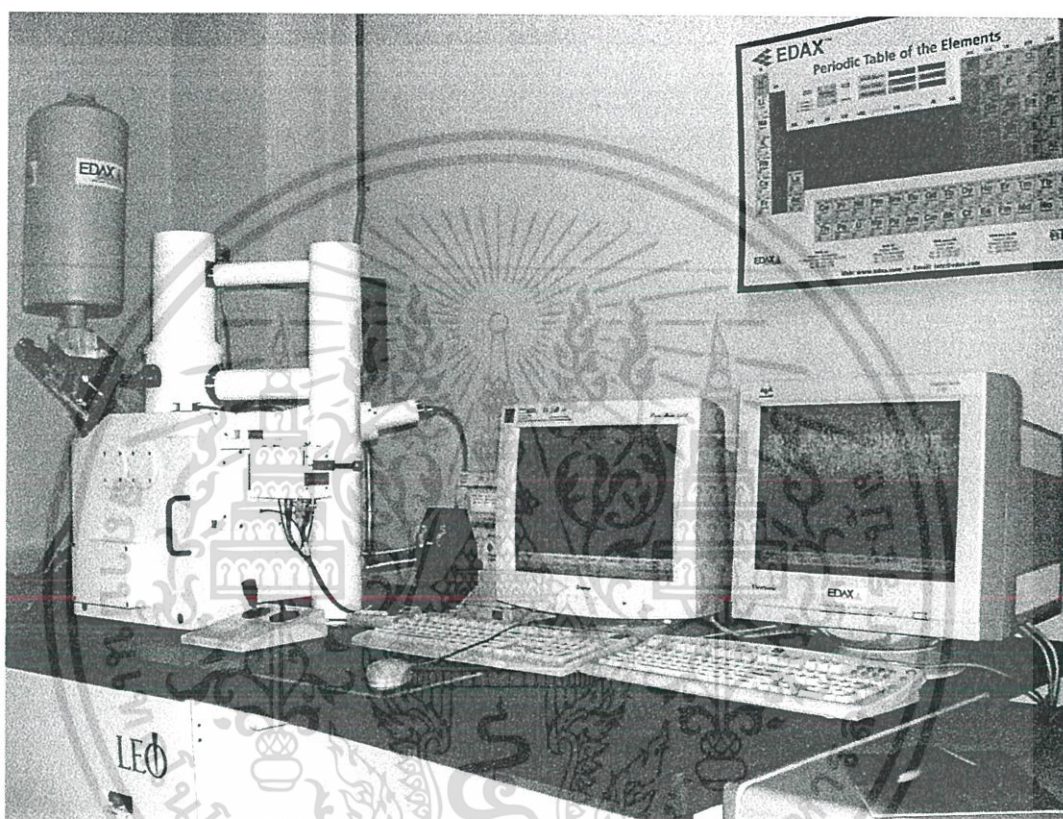
รูปที่ 3.5 ระบบการกัดทางไฟฟ้าเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์

#### 3.4.1 การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

ในการวิเคราะห์พื้นผิว จะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ของบริษัท LEO รุ่น 1455 VP เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบชั้นพอร์ซิติกลิกอน โดยจะทำการตรวจสอบผิวด้านหน้าและภาคตัดขวางของตัวอย่าง

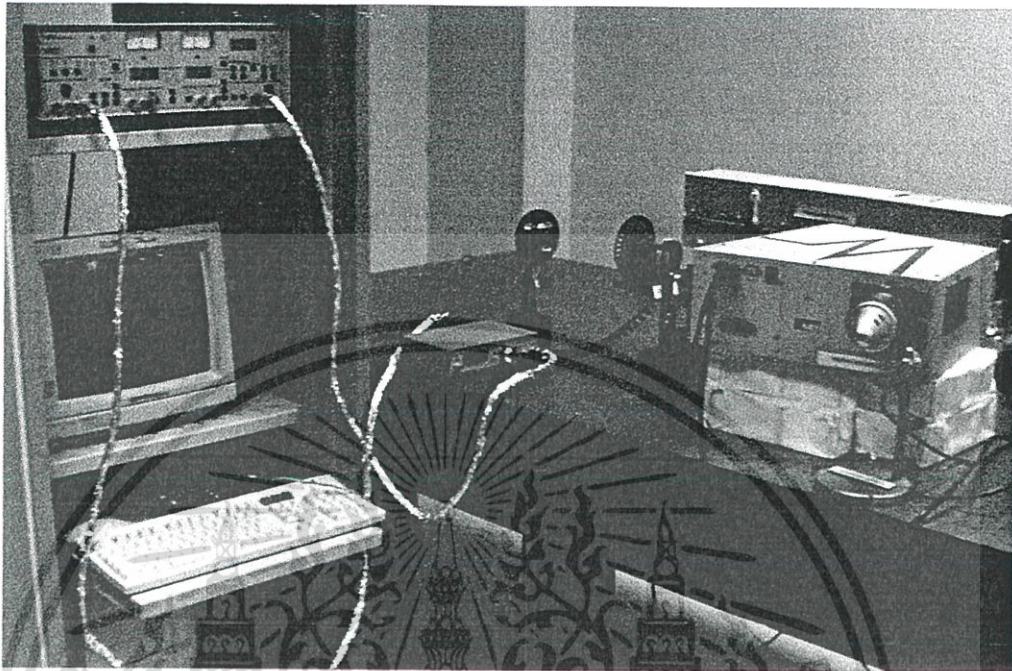


รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

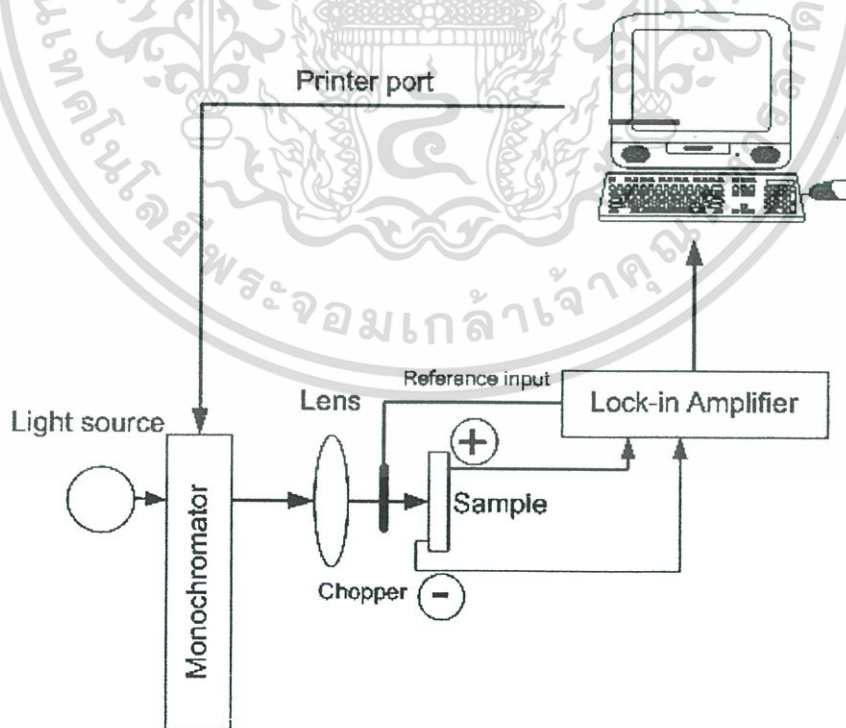
#### 3.4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยระบบวัดโฟโตเคอร์เรนซ์

ก่อนที่จะทำการวัดคุณสมบัติทางแสงของพอร์ซิติกลิกอน เราจะทำการปลูกชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (Indium Tin Oxide; ITO) ความหนา 200 นาโนเมตร ลงบนผิวหน้าของพอร์ซิติกลิกอน ด้วยระบบ อาร์เอฟแมกนีตรอน สเปคเตอริง รูปที่ 3.7 แสดงการจัดอุปกรณ์และเครื่องมือ ของระบบโฟโตเคอร์เรนซ์ โดยจะใช้แสงจากหลอดทังสเตน สองไปยังโมโนโครมาเตอร์ (monochromator) ความยาวคลื่นจะถูกเลือก โดยการควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ แสงที่ผ่านโมโนโครมาเตอร์ จะผ่านชอปเปอร์ (chopper) ซึ่งแสงจะถูกตัดเป็นสัญญาณพัลส์ (pulse) หลังจากนั้น จะตกกระทบอุปกรณ์ที่ต้องการวัด กระแสโฟโต้เคอร์เรนซ์ที่เกิดขึ้น จากภายในอุปกรณ์ จะถูกวัด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และขยายสัญญาณโดย ล็อคอินแอมพลิฟาย (Lock - in Amplifier) ก่อนถูกบันทึกค่าลงในคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ผลต่อไป รายละเอียดแสดงไว้ในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 การจัดอุปกรณ์ ในการวัดโฟโตเคอร์เรนท์



รูปที่ 3.8 แผนภาพแสดงไดอะแกรมระบบวัดโฟโตเคอร์เรนท์

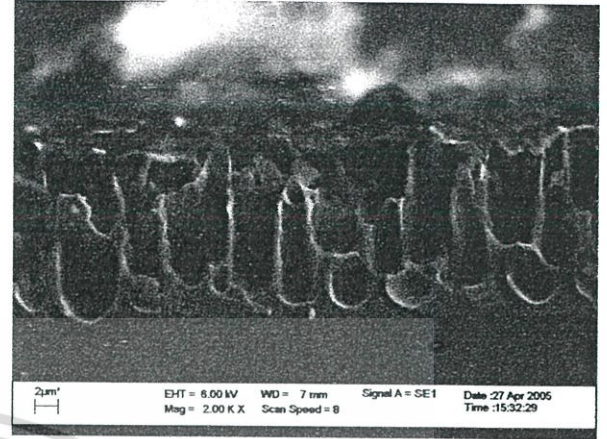
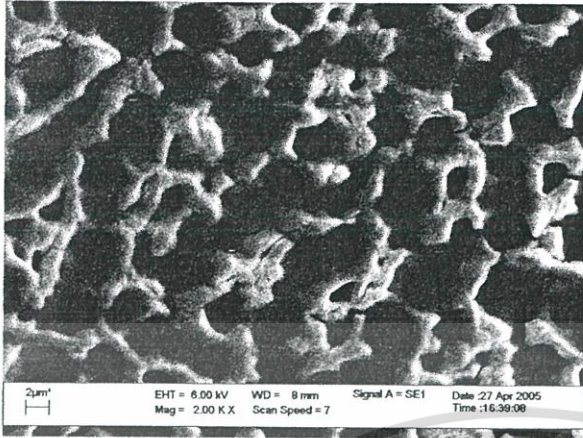
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

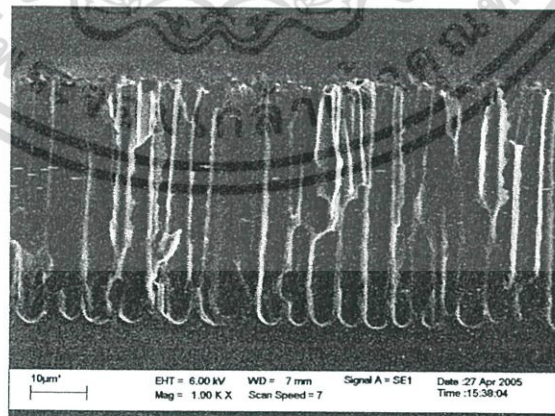
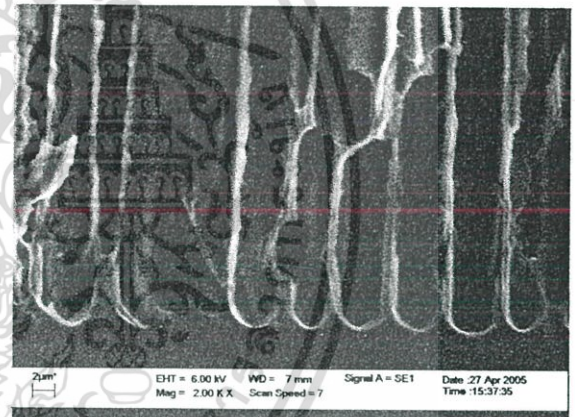
### ผลงานวิจัยและการวิเคราะห์ผล

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดของพอร์สซิลิกอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดกระแส

รูปที่ 4.1 – 4.5 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ของพอร์สซิลิกอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดกระแส จากรูปทั้งหมดจะเห็นว่า ลักษณะของรูพรุนและเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมีความไม่สม่ำเสมออย่างมาก ลักษณะของรูพรุนที่ไม่ดี(bad pore)เช่นนี้สามารถที่จะพบได้ในระบบสารละลายที่ใช้ ระบบ ไฮโดรฟลูออริก-น้ำ(HF – H<sub>2</sub>O system) สาเหตุเกิดขึ้นเนื่องจาก ในระบบมีออกซิเจนมากเกินไป ซึ่งส่งผลให้เกิดการฟอร์มตัวของออกไซด์ชั้น ที่บริเวณพื้นผิวของซิลิกอน ออกไซด์ที่เกิดขึ้น ส่งผลให้สนามไฟฟ้าตรงบริเวณนั้นขาดหายไป ทำให้ไม่มีไฮล และไฮโดรเจนไม่สามารถจับพันธะกับอะตอมของซิลิกอนได้เป็นผลให้ที่ตำแหน่งซึ่งเกิดออกไซด์ไม่เกิดพอร์สขึ้น(หัวข้อ 2.1.2 กลไกการเกิดพอร์สซิลิกอน) ขณะที่ตำแหน่งอื่นๆ เริ่มมีการฟอร์มตัวของพอร์สซิลิกอน ออกไซด์ที่เกิดขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปก็จะถูกทำลายด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออริก และบริเวณนั้นก็จะเริ่มมีการทำปฏิกิริยาเพื่อฟอร์มตัวของพอร์สซิลิกอน การเกิดออกไซด์นี้จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใดก็ได้ ด้วยสาเหตุ การเปิดและการปิดของกระแสเนื่องจากออกไซด์นี้ เป็นผลทำให้พอร์สซิลิกอนมีความไม่สมบูรณ์และไม่สม่ำเสมอ[6,7] และจากรูปทั้งหมด(รูปที่ 4.1 – 4.5)จะเห็นได้ว่า เวลาที่ใช้ในการกัดและความหนาแน่นกระแสมีผลต่อความลึกของพอร์สซิลิกอน (รูปที่ 4.1 – 4.3 ความหนาแน่นกระแสคงที่ เปลี่ยนแปลงเวลา รูปที่ 4.3-4.5 เวลาคงที่ เปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแส) ถึงแม้ว่าลักษณะของพอร์สซิลิกอนจะไม่ดีและไม่สมบูรณ์ แต่ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดชนิดปลดปล่อยสนาม(Field Emission SEM หรือ FESEM) ในรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงเส้นใยของซิลิกอนในระดับนาโนเมตร(รูปที่ 4.6 ก) และ กลุ่มของผลึกระดับนาโนเมตร(aggregate of nano-crystalline) ที่มีขนาดอยู่ในระดับ 5- 20 นาโนเมตร(รูปที่ 4.6 ข) แม้ว่าจะไม่มีรายงานถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากเส้นใยระดับนาโนเมตรดังกล่าว แต่ก็มีรายงานเกี่ยวกับกลุ่มของผลึกระดับนาโนเมตรที่ผนังของพอร์สซิลิกอน ว่าสามารถที่จะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัมได้[8] ดังที่แสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8

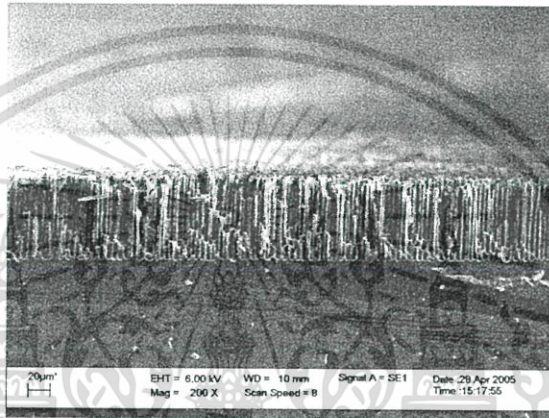
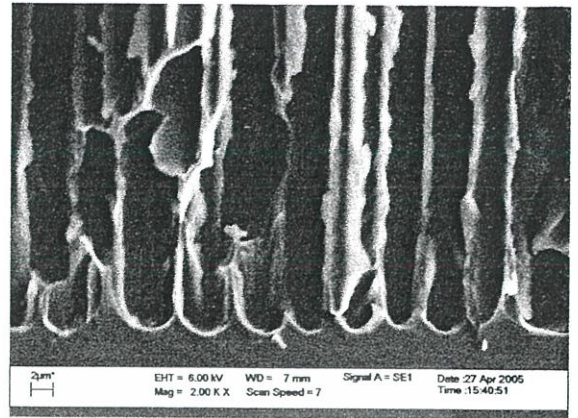
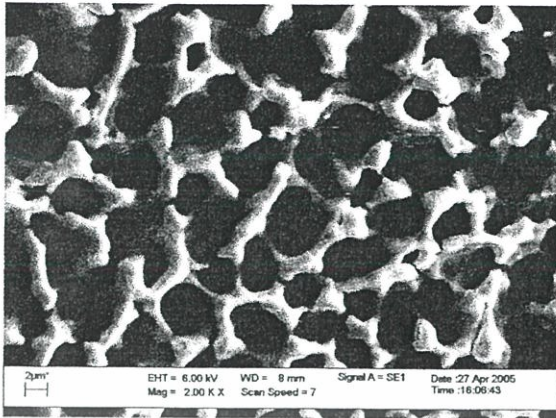


รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายด้านบน และภาคตัดขวาง ของ ตัวอย่างที่ 1

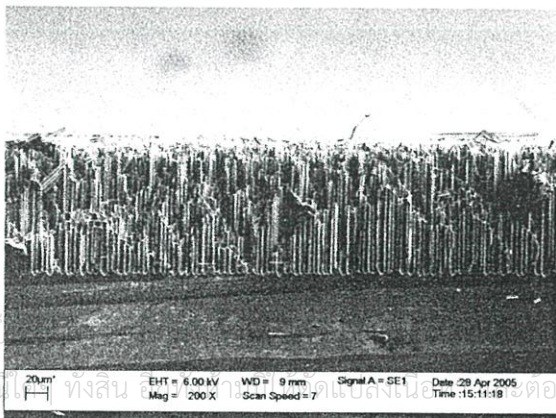
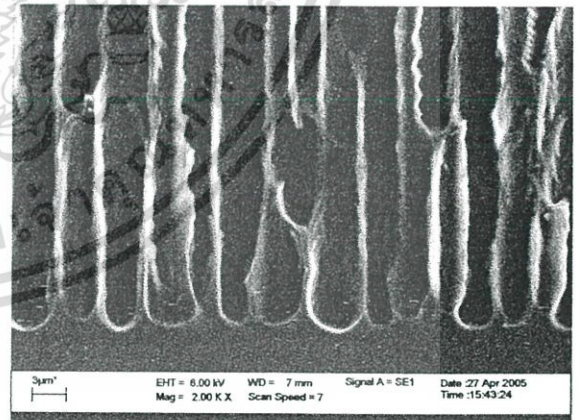
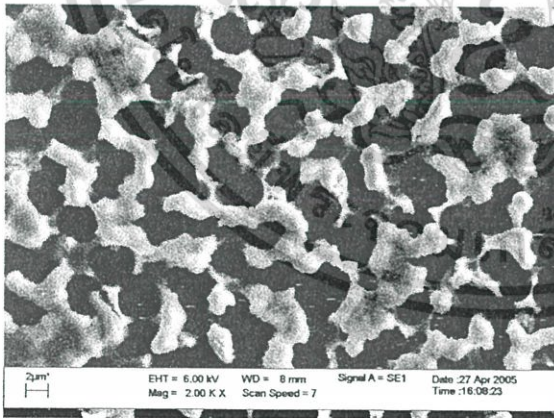


รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายด้านบน ภาคตัดขวาง และความลึกของตัวอย่างที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายด้านบน ภาคตัดขวาง และความลึกของตัวอย่างที่ 3



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายด้านบน ภาคตัดขวาง และความลึกของตัวอย่างที่ 4

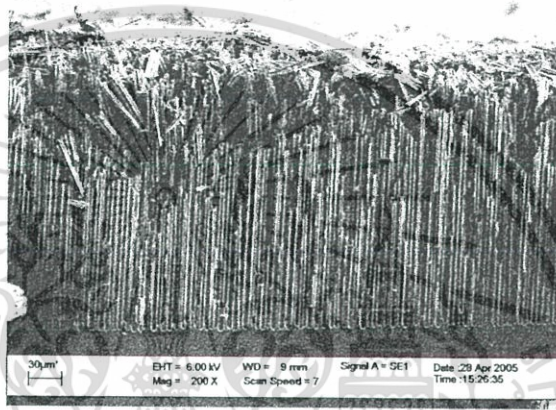
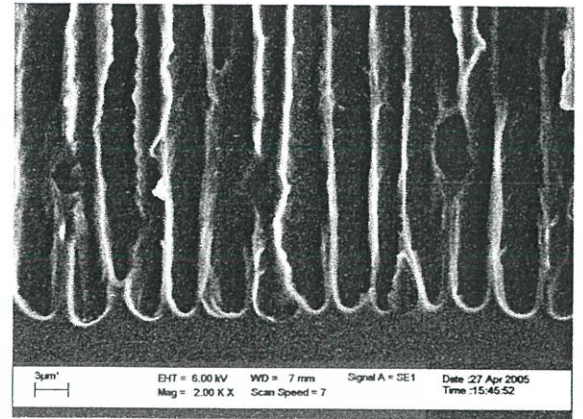
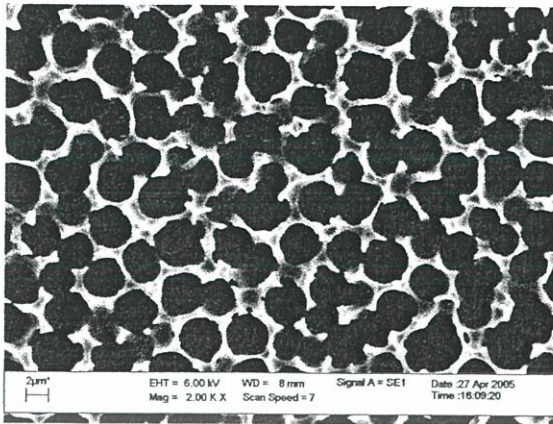
เอกสารนี้

ไม่ว่ากรณี

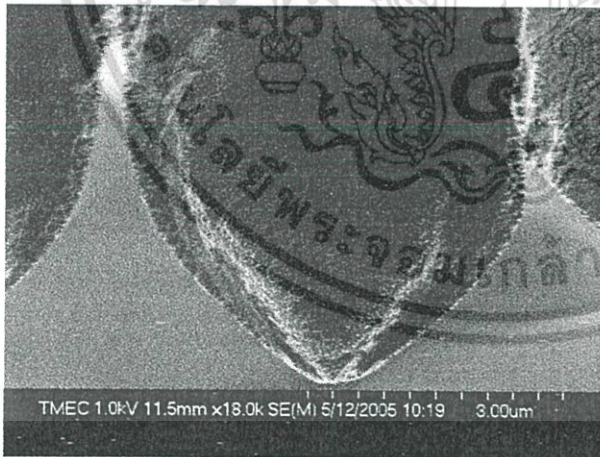
ทั้งสิน EHT = 6.00 kV, WD = 9 mm, Signal A = SE1, Date 29 Apr 2005, Time :15:11:18, Mag = 200 X, Scan Speed = 7

เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

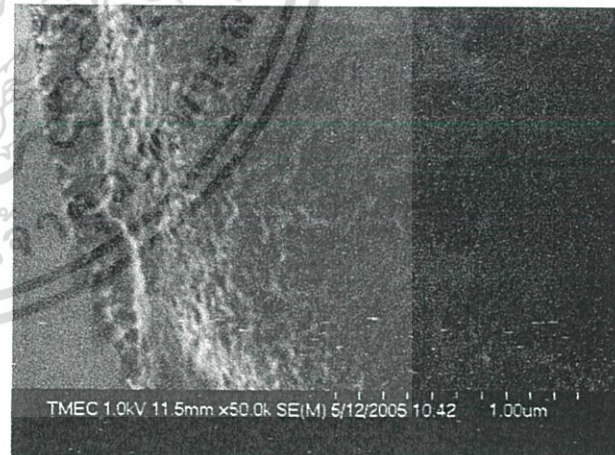
ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายด้านบน ภาคตัดขวาง และความลึกของตัวอย่างที่ 5



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจาก FESEM ของพอร์ซซิลิกอนที่สร้างโดยใช้แหล่งกำเนิดกระแส ก.) เส้นใย

ระดับนาโนเมตร ที่มีขนาดอยู่ในระดับต่ำกว่า 1 นาโนเมตร ข.) กลุ่มของผลึกระดับนาโน

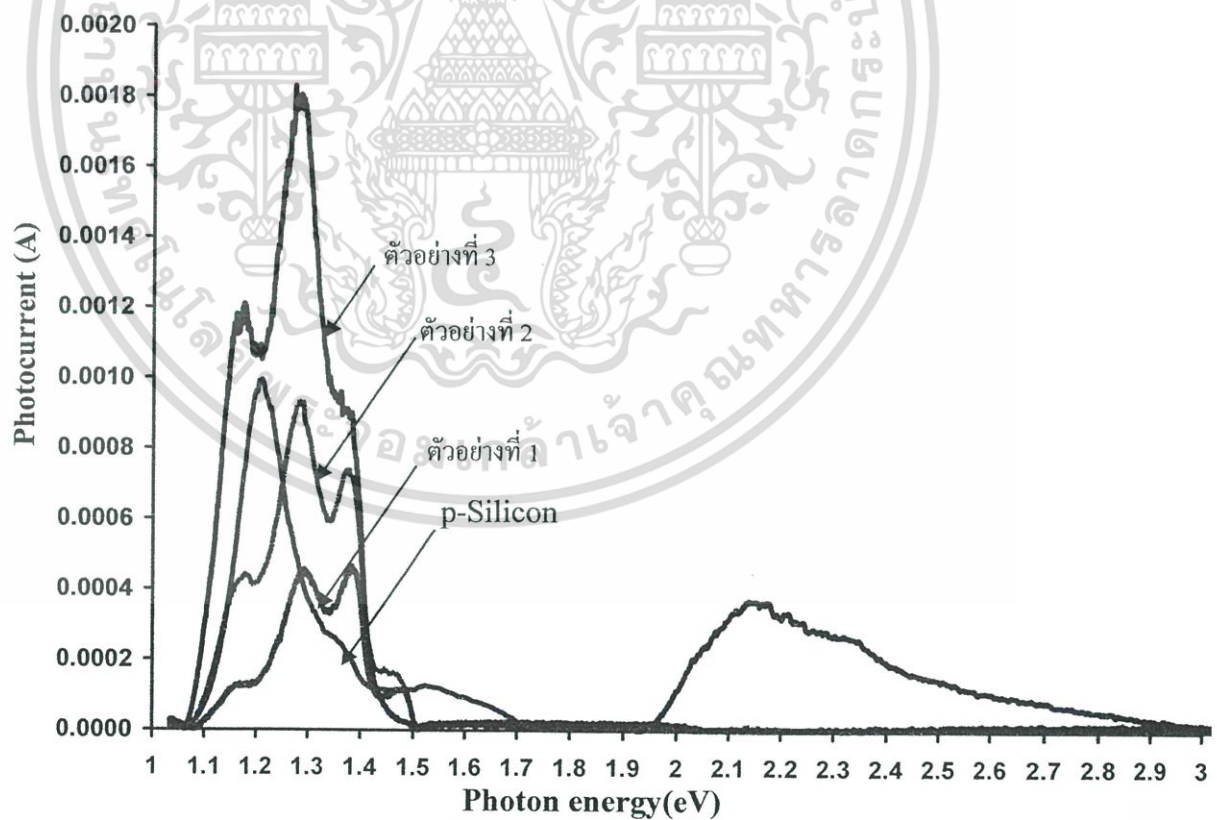
เมตร(nano-crystallite)ที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 5-20 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยโฟโตเคอร์เรนต์ของพอร์ซซิลิกอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดกระแส

รูปที่ 4.7 แสดงกราฟโฟโตเคอร์เรนต์ของตัวอย่างที่ 1-3 ซึ่งกำหนดให้ ความหนาแน่นกระแสคงที่คือ  $16 \text{ mA/cm}^2$  และเปลี่ยนแปลงเวลาในการกักเป็น 10 20 และ 30 นาที ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นว่า ซิลิกอนชนิดพี ตอบสนองที่พลังงานโฟตอนประมาณ  $1.2 \text{ eV}$  ขณะที่ ตัวอย่างที่ 1 จะมียอดพีคที่เด่นชัดคือ ที่  $1.28 \text{ eV}$  และ  $1.37 \text{ eV}$  เช่นเดียวกันกับ ตัวอย่างที่ 2 จะมียอดพีคเด่นชัดที่พลังงานโฟตอนเดียวกัน สำหรับตัวอย่างที่ 3 จะมียอดพีคเด่นชัดที่พลังงานโฟตอน 3 ค่าคือ  $1.18 \text{ eV}$   $1.28 \text{ eV}$  และ  $2.15 \text{ eV}$  ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ที่พลังงานโฟตอน  $1.18 \text{ eV}$  เกิดขึ้นเนื่องจากการดูดกลืนของพันธะระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจน(Si - O) ซึ่งจากรายงานวิจัย จะอยู่ในช่วงระหว่าง  $1.12 - 1.18 \text{ eV}$  [9] สำหรับพลังงานโฟตอน  $1.28 \text{ eV}$  เป็นการดูดกลืนเนื่องจากสถานะรอยต่อ(interface state) ระหว่างซิลิกอนกับพอร์ซซิลิกอน[10,11] พลังงานโฟตอน  $1.37 \text{ eV}$  เกิดจากการดูดกลืนของซิลิกอนที่สถานะแตริบ(trap state) [12] สุดท้าย พลังงานโฟตอน  $2.15 \text{ eV}$  เกิดขึ้นเนื่องจากผลของปรากฏการณ์ทางควอนตัม อันเป็นผลสืบเนื่องจากกลุ่มของผลึกระดับนาโนเมตร



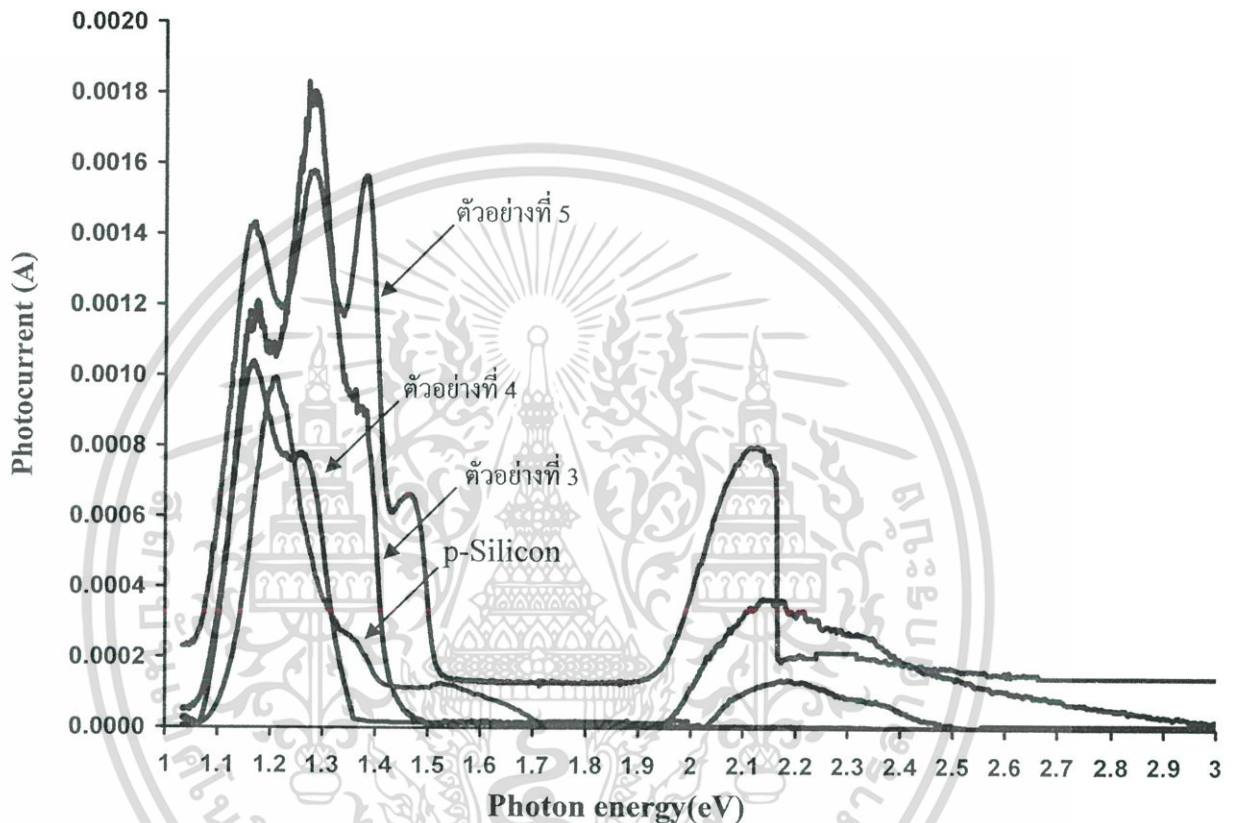
รูปที่ 4.7 กราฟโฟโตเคอร์เรนต์ ของตัวอย่างที่ 1 2 และ 3 ของแหล่งกำเนิดกระแส ที่ใช้ความ

หนาแน่นกระแส  $16 \text{ mA/cm}^2$  และเวลาในการกัก 10 20 และ 30 นาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 แสดงกราฟโฟโตเคอร์เรนต์ของตัวอย่างที่ 3-5 ซึ่งกำหนดให้เวลาในการกัดคงที่ คือ 30 นาที และเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสเป็น 16 32 และ 64  $\text{mA/cm}^2$  ตามลำดับ พิจารณา เฉพาะตัวอย่างที่ 4 และ 5 จะเห็นว่ามียอดพีคที่เด่นชัด 3 ค่าคือ 1.18 eV 1.28 eV และ 2.15 eV สำหรับ ตัวอย่างที่ 4 และในตัวอย่างที่ 5 จะเห็นว่ามียอดพีคที่เด่นชัด 4 ค่า คือ 1.18 eV 1.28 eV 1.37 eV และ 2.11 eV แต่ละพลังงานโฟตอนที่ตอบสนองได้อธิบายไว้แล้วในรูปที่ 4.6

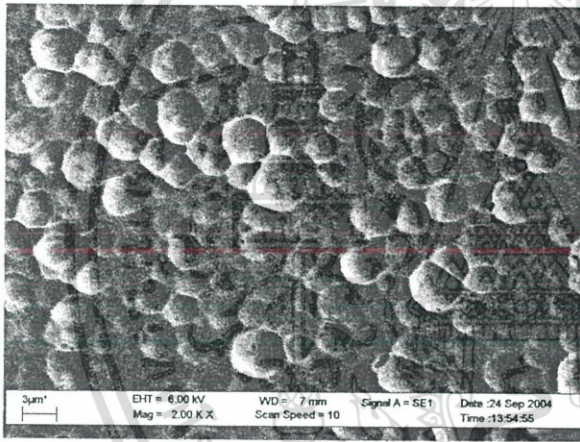


รูปที่ 4.8 กราฟโฟโตเคอร์เรนต์ ของตัวอย่างที่ 3 4 และ 5 ของแหล่งกำเนิดกระแส ที่ใช้เวลาในการกัด 30 นาที และความหนาแน่นกระแส 16 32 และ 64  $\text{mA/cm}^2$  ตามลำดับ

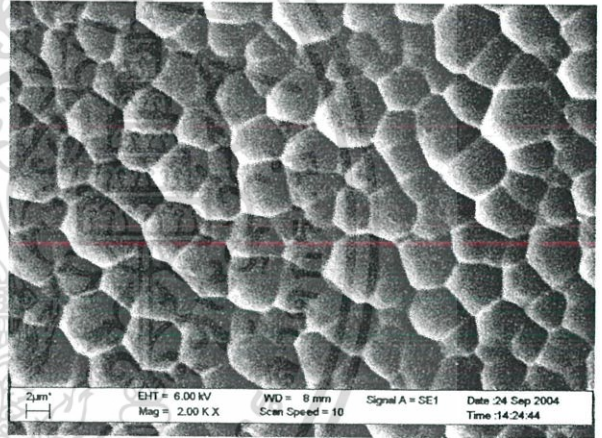
#### 4.3 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดของพอร์ซซิลิกอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดแรงดัน

รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ของตัวอย่างที่ 6 และตัวอย่างที่ 7 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นสถานะก่อนการที่จะเกิดพอร์ซซิลิกอน บริเวณพื้นผิวเริ่มมีการทำปฏิกิริยา แต่ยังไม่มากนัก จึงมีการพองตัว และคาดว่าจะมีอะตอมของซิลิกอนหลุดไปบางส่วน และเมื่อเพิ่มเวลาในการกัดเพิ่มขึ้น(รูปที่ 4.10) จะเห็นว่าเกิดปฏิกิริยามาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

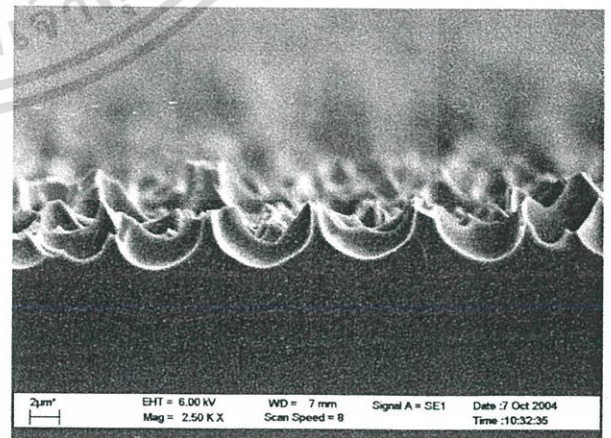
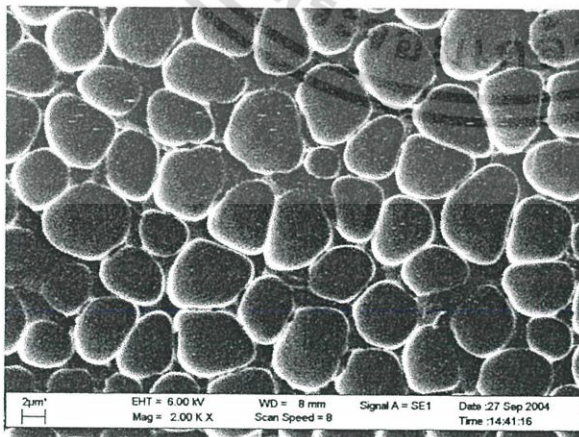
ชั้น แต่ยังไม่เกิดเป็นพอร์ซซีลิกอน สาเหตุนี้คาดว่ามาจากกาที่มีความหนาแน่นกระแสต่ำและเวลาที่ใช้ในการกัदन้อยเกินไป จึงทำให้มีไฮลไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดรูพรุน ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าไฮล มีบทบาทที่สำคัญในการทำให้เกิดพอร์ซซีลิกอน และเมื่อเราทำการเพิ่มเวลาในการกัตมากขึ้น พอร์ซซีลิกอนจะเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นภาพถ่ายด้านบน และภาคตัดขวาง ของตัวอย่างที่ 8 เราจะเห็นได้ว่า พอร์ซซีลิกอนที่เกิดขึ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนแตกต่างกัน และความหนาของผนังรูพรุน โดยวัดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด มีความหนาต่ำกว่า 350 นาโนเมตร ลักษณะของรูพรุนที่ได้ค่อนข้างมีความสม่ำเสมอและเป็นระเบียบมากกว่าพอร์ซซีที่ได้จากแหล่งกำเนิดกระแส ส่วนในรูปที่ 4.12 และ 4.13 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ถ้าเราเพิ่มความหนาแน่นกระแส ความลึกของชั้นพอร์ซซีลิกอนจะเพิ่มขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงไว้ในกราฟรูปที่ 4.14 ขณะที่ เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนและความหนาของผนังรูพรุนไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก



รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างที่ 6

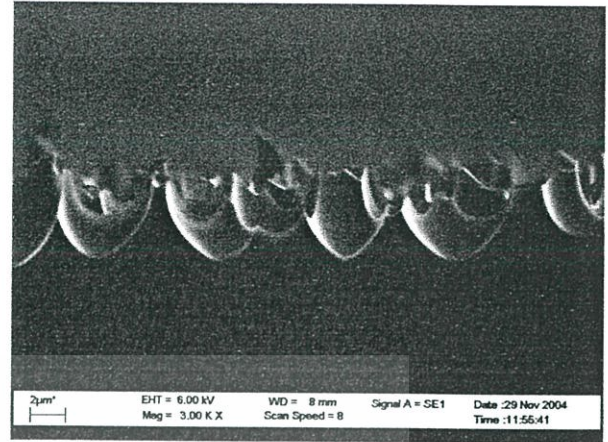
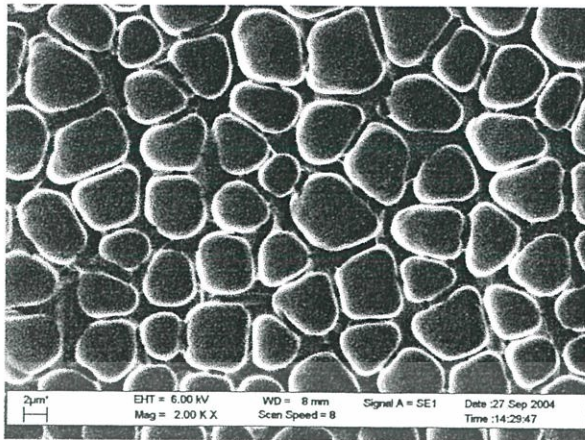


รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างที่ 7

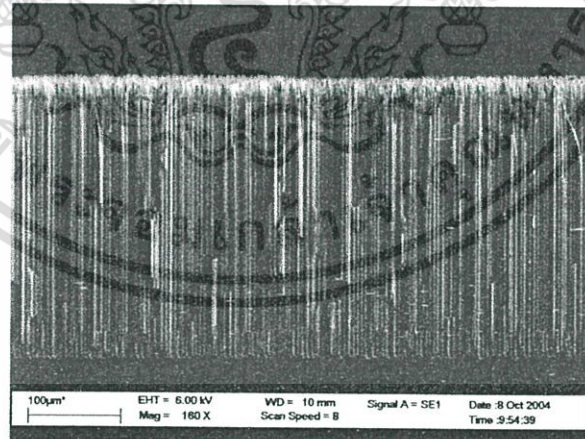
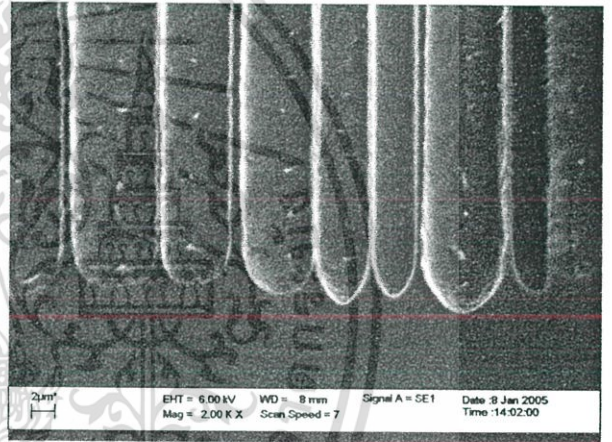
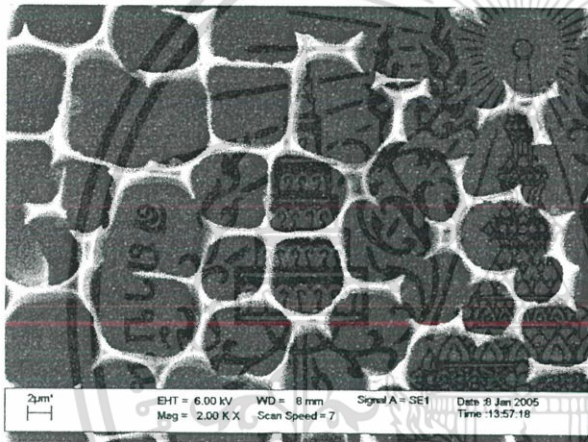


รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายด้านบน และภาคตัดขวาง ของ ตัวอย่างที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

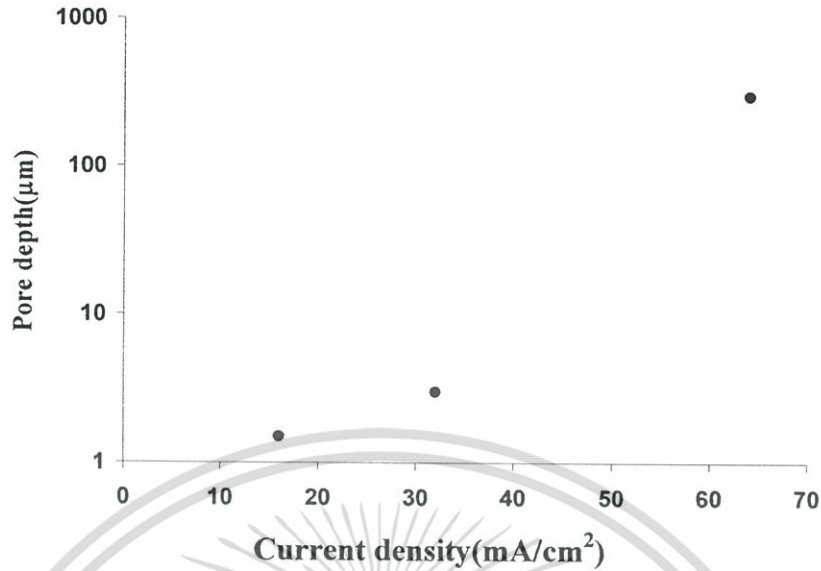


รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายด้านบน และภาคตัดขวาง ของ ตัวอย่างที่ 9



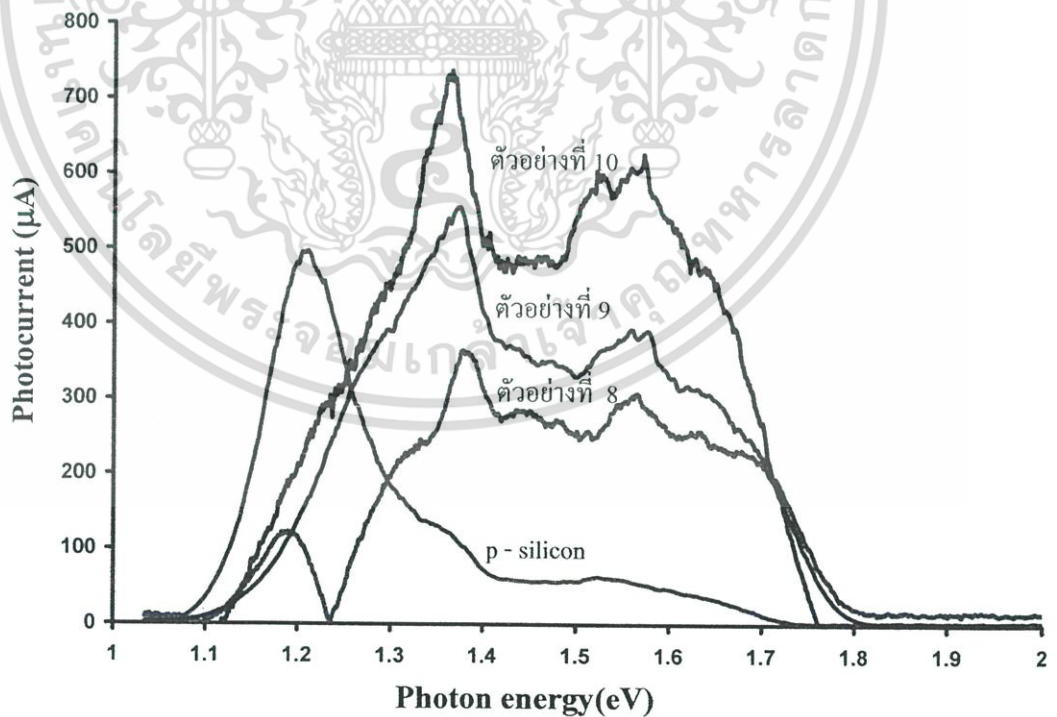
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายด้านบน ภาคตัดขวาง และความลึกของตัวอย่างที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความลึกของพอร์ซิลิกอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดแรงดัน

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยโฟโตเคอร์เรนต์ของพอร์ซิลิกอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดแรงดัน



รูปที่ 4.15 กราฟโฟโตเคอร์เรนต์ ของตัวอย่างที่ 8 9 และ 10 ของแหล่งกำเนิดแรงดัน ที่ใช้เวลาใน

การกัด 30 นาที ความหนาแน่นกระแส 16 32 และ 64 mA/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวัดโฟโตเคอร์เรนต์ แสดงไว้ในรูปที่ 4.15 จากรูปจะเห็นว่า ซิลิกอนชนิดพี จะตอบสนองที่พลังงานโฟตอนประมาณ 1.2 eV สำหรับ ตัวอย่างที่ 8 9 และ 10 จะปรากฏ พลังงานโฟตอนที่ตอบสนอง 2 ตำแหน่ง คือ ที่ ประมาณ 1.37 eV และ 1.55 eV โดยที่ พลังงานโฟตอน 1.37 eV เป็นผลสืบเนื่องมาจาก การดูดกลืนของซิลิกอน[12] และที่พลังงานโฟตอน 1.55 eV เป็นผลเนื่องมาจากผลของปรากฏการณ์ทางควอนตัม ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# การประยุกต์ใช้งาน

การตรวจรับแสงหรือวัดแสงเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการใช้งานทางด้านแสงให้เกิดประโยชน์ เนื่องจากแสงมีความยาวคลื่นตั้งแต่ระดับไม่ถึง 1 ไมโครเมตร ไปจนถึงหลายพันไมโครเมตร และความเข้มของแสงก็มีมากน้อยตามแต่สภาพการใช้งาน ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการคิดค้นสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงขึ้นมาหลายชนิดเพื่อใช้งานในย่านความยาวคลื่นต่างๆ และวัตถุประสงค์แตกต่างกัน สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงมีหลายประเภท เช่น โฟโตไดโอด โฟโตมัลติพลายเออร์ โฟโตทรานซิสเตอร์ โฟโตแคปเปลอร์ เซลล์แสงอาทิตย์ ฯลฯ เป็นต้น แต่สำหรับในงานวิจัยนี้ จะเน้นไปที่ สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง ประเภทโฟโตไดโอด

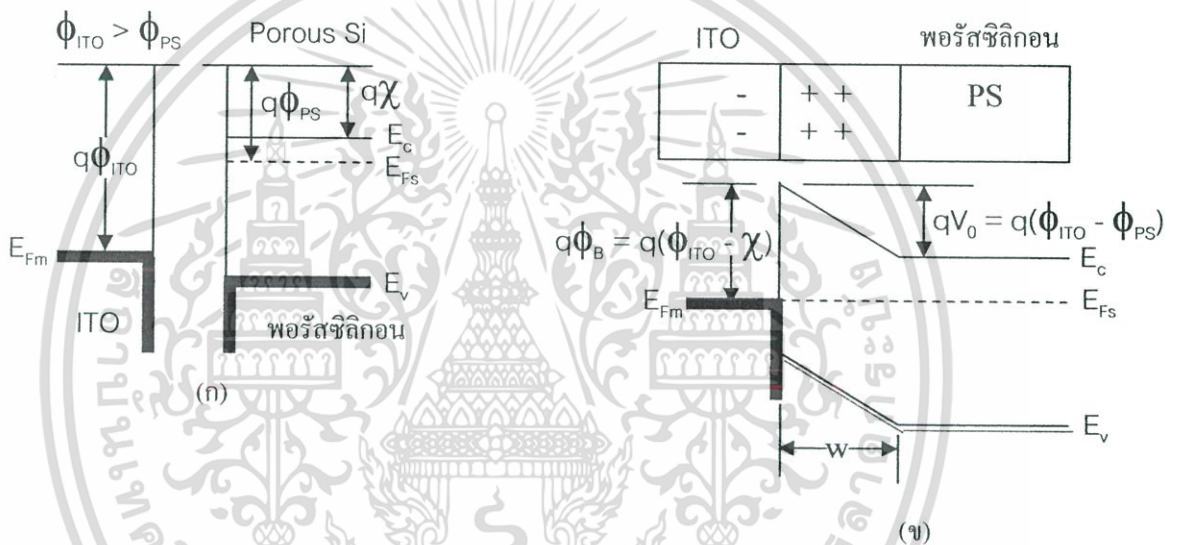
โฟโตไดโอด เป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน (Internal photoelectric) มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อพีเอ็น เมื่อมีแสงตกกระทบที่รอยต่อพีเอ็น จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันขึ้น โดยความหมายกว้างๆ แล้วอาจรวมเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยก็ได้ แต่โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึง โฟโตไดโอดจะหมายถึงเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและใช้ตรวจวัดความเข้มแสง ในปัจจุบันมีการพัฒนาให้โฟโตไดโอดมีโครงสร้างและคุณสมบัติเด่นแตกต่างกันออกไปหลายชนิด

### 5.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของตัวตรวจรับแสงนาโนพอร์สซิลิกอน

มีงานวิจัย[13] ได้รายงานไว้ว่า รอยต่อระหว่าง ทอง(Au)กับพอร์สซิลิกอน หรือ อินเดียมทินออกไซด์(ITO)กับพอร์สซิลิกอน แสดงพฤติกรรมเป็นแบบรอยต่อชอตต์กี(Schottky junction) ขณะที่ ชั้นพอร์สซิลิกอนกับฐานรองซิลิกอน มีพฤติกรรมเป็นแบบรอยต่อเฮเทอโร (Heterojunction) ซึ่งลักษณะของแถบพลังงานแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 ด้วยเหตุนี้ตัวตรวจวัดแสงนาโนพอร์สซิลิกอน จึงแสดงพฤติกรรมเป็นโฟโตไดโอด ชนิด ชอตต์กีแบบเรียโดไดโอด(Schottky barrier diode) โดยที่ผิวสัมผัสแบบชอตต์กีแบบเรีย จะพิจารณาที่ฟังก์ชันงาน(work function) โดยที่ อินเดียมทินออกไซด์มีฟังก์ชันงาน เท่ากับ 4.8 อิเล็กตรอนโวลต์ และพอร์สซิลิกอนมีฟังก์ชันงาน ประมาณ 4.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีหลักการดังนี้ ถ้าหากว่าประจุลบถูกนำมาใกล้ผิวของอินเดียมทินออกไซด์จะเกิดประจุบวกซึ่งถูกเหนี่ยวนำขึ้น เมื่อแรงนี้รวมเข้ากับสนามไฟฟ้าซึ่งถูกใส่เข้ามาจะทำให้ค่าประสิทธิผลของฟังก์ชันงาน ลดต่ำลง การที่ค่าแรงลดต่ำลงเช่นนี้ เราเรียกว่า ปรากฏการณ์ชอตต์กี(Schottky effect) แต่ผิวสัมผัสแบบเรียงกระแส มักถูกเรียกว่า ไดโอดชอตต์กีแบบเรีย(Schottky barrier diode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออินเดียม ซึ่งมี ฟังก์ชันงาน เท่ากับ  $q\phi_{ITO}$  ถูกนำมาสัมผัสกับพอร์สซิลิกอนซึ่งมีฟังก์ชันงาน  $q\phi_{PS}$  การเคลื่อนย้ายประจุจะเกิดขึ้น จนกระทั่งระดับเฟอร์มิในสารทั้งสองเรียงตัวกันเป็นเส้นตรงที่สภาวะสมดุล ตามรูปที่ 5.1 ตัวอย่างเช่น เมื่อ  $\phi_{ITO} > \phi_{PS}$  ในขณะเริ่มแรกระดับเฟอร์มิในพอร์สซิลิกอนจะอยู่สูงกว่าในอินเดียมฯ (ก่อนการสัมผัส) เพื่อให้ระดับเฟอร์มิทั้งสองอยู่ในแนวเดียวกัน ศักย์ไฟฟ้าสถิตในพอร์สซิลิกอนต้องถูกยกขึ้น (นั่นคือพลังงานอิเล็กตรอนจะลดลง) เมื่อเทียบกับของอินเดียมฯ ซึ่งจะทำให้เกิดย่านปลอดพาหะ  $W$  ขึ้นใกล้ๆ กับรอยต่อ ประจุบวกซึ่งเกิดจากอ็อกซิเจนแบบผู้ให้ภายใน  $W$  จะเท่ากับประจุลบภายในอินเดียมฯ สนามไฟฟ้าและการโค้งงอของแถบพลังงานภายใน  $W$  จะคล้ายๆ กับในรอยต่อพี-เอ็น(PN junction)



รูปที่ 5.1 ขอตักี่แบเรียซึ่งเกิดจากการที่พอร์สซิลิกอนสัมผัสกับอินเดียมฯ ซึ่งมีค่าฟังก์ชันงานสูงกว่า  
(ก) แผนภาพ พลังงานของอินเดียมและพอร์สซิลิกอนก่อนการต่อกัน  
(ข) แผนภาพพลังงานของหัวต่อที่สภาวะสมดุล

ศักย์ไฟฟ้า  $V_0$  บริเวณผิวสัมผัสที่สภาวะสมดุล จะมีค่าเท่ากับผลต่างของฟังก์ชันงานของอินเดียมฯ กับพอร์สซิลิกอน ซึ่งจะทำหน้าที่หยุดการแพร่ของอิเล็กตรอนจากแถบการนำ (Conduction band) ในพอร์สซิลิกอน ไปยังอินเดียม ความสูงของกำแพงศักย์  $\phi_B$  ซึ่งกั้นการฉีดอิเล็กตรอนจากโลหะไปยังแถบการนำในพอร์สซิลิกอน มีค่าเท่ากับ  $\phi_{ITO} - \chi$  เมื่อ  $\chi$  เรียกว่า อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (Electron affinity) คือ ระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนใช้ในการย้ายอิเล็กตรอนจากบริเวณขอบล่างของแถบการนำไปยังระดับสุญญากาศ ค่า  $V_0$  อาจถูกเพิ่มหรือลดได้โดยการไบอัสย้อนหรือไบอัสตาม หรือเมื่อมีแสงมาตกกระทบ นั่นคือ ถ้ามีแสงมาตกกระทบที่พอร์สซิลิกอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่อิเล็กตรอน โสไลด์ จะเกิดขึ้น โสไลด์จะเคลื่อนที่ไปสะสมที่บริเวณรอยต่อด้านอินเดียม ขณะที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางด้านพอร์ซซิลิกอน จนกระทั่งพลังงานสะสมมีค่ามากกว่ากำแพงศักย์ โสไลด์ก็จะข้ามไปทางด้านอินเดียมฯ เกิดเป็นสัญญาณไฟฟ้าขึ้น ซึ่งทำให้สามารถตรวจวัดแสงได้

## 5.2 ขั้นตอนการประดิษฐ์ตัวตรวจรับแสงนาโนพอร์ซซิลิกอน

นาโนพอร์ซซิลิกอนที่ได้จากการสร้างตามขั้นตอนในบทที่ 3 จะถูกนำมาประยุกต์ใช้สร้างเป็นตัวตรวจรับแสง โดยจะเลือกใช้ ตัวอย่างที่เกิดกลุ่มของผลึกระดับนาโนเมตร ซึ่งจะทำให้การปลูกข้าวไฟฟ้า คือ ทองและอินเดียมทินออกไซด์โดยรายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 2

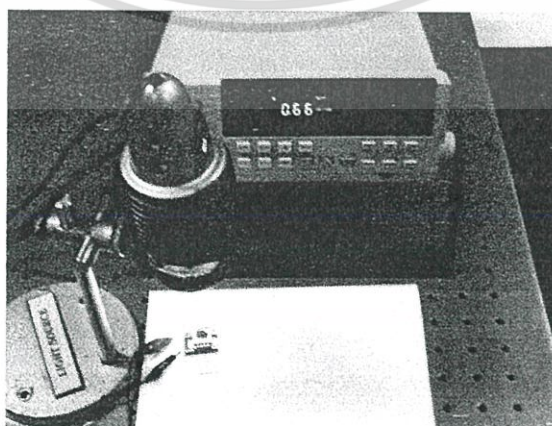
ตารางที่ 5.2 ตัวตรวจรับแสงนาโนพอร์ซซิลิกอน

อุปกรณ์	ตัวอย่าง	ข้าวไฟฟ้า	ความหนาข้าวไฟฟ้า (นาโนเมตร)	วิธีการปลูกข้าวไฟฟ้า	โครงสร้างตัวตรวจรับแสง
1	3	ITO	200	อาร์เอฟแมกนีตรอน สปีดเตอริง	ITO/NPS/p-Si/Al
2	4	ITO	200	อาร์เอฟแมกนีตรอน สปีดเตอริง	ITO/NPS/p-Si/Al
3	5	ITO	200	อาร์เอฟแมกนีตรอน สปีดเตอริง	ITO/NPS/p-Si/Al

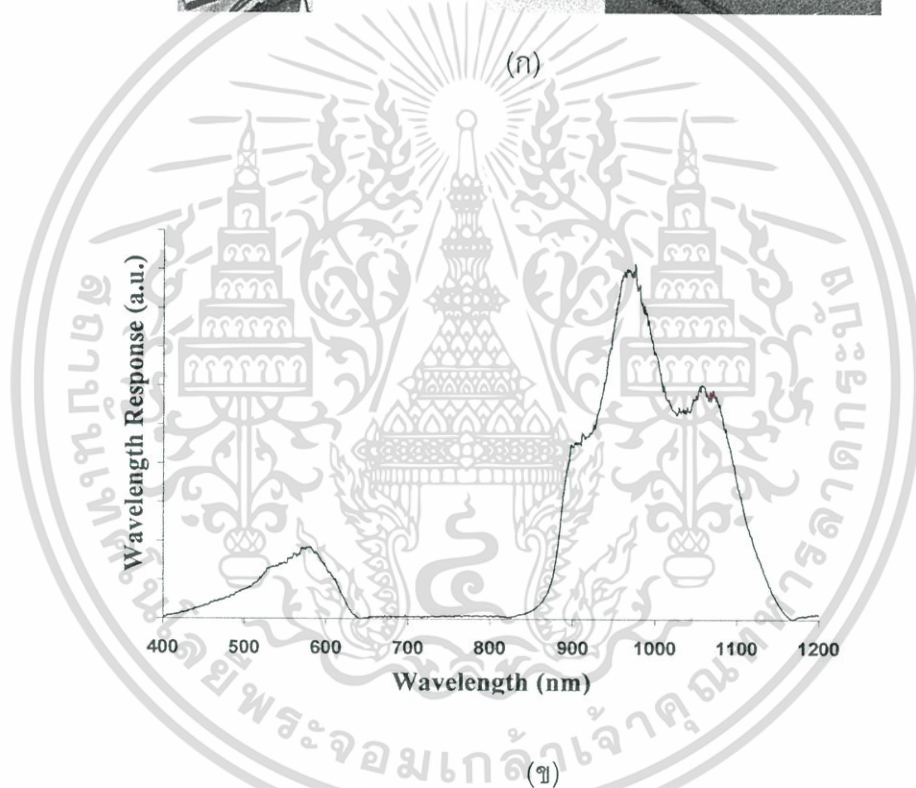
หมายเหตุ: NPS = นาโนพอร์ซซิลิกอน

## 5.3 ผลการทดสอบและการวัดการตอบสนองต่อแสง

อุปกรณ์ตรวจวัดแสงจะถูกนำไปทดสอบการตอบสนองต่อแสงโดยการฉายแสงที่ได้จากหลอดทังสเตน(Tungsten lamp) และความยาวคลื่นที่ตอบสนองถูกวัดด้วยระบบโฟโตเคอร์เรนซ์ ผลการทดสอบแสดงไว้ดังรูปที่ 5.2 - 5.6

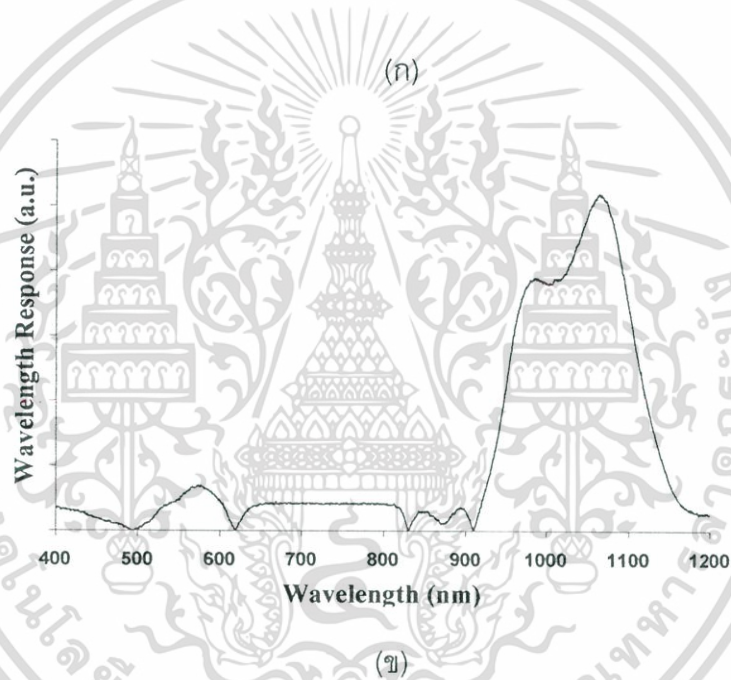


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี  
รูปที่ 5.2 แสดงผลการทดสอบการตอบสนองต่อแสง ของซิลิกอนชนิดพี  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



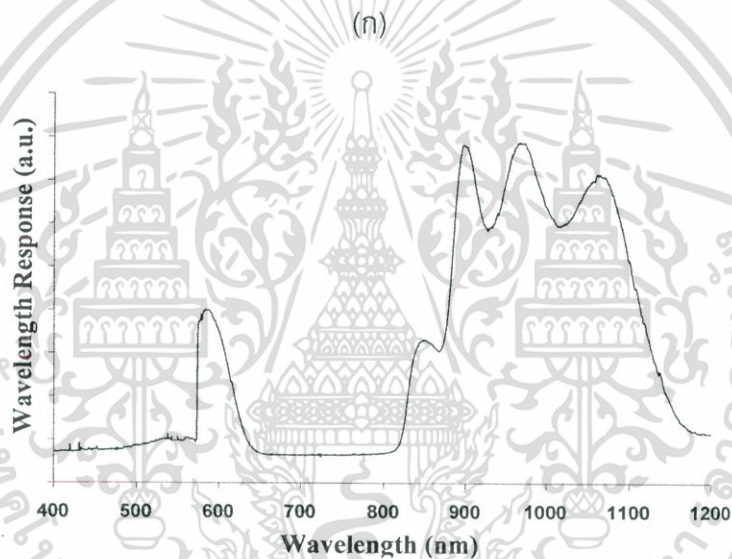
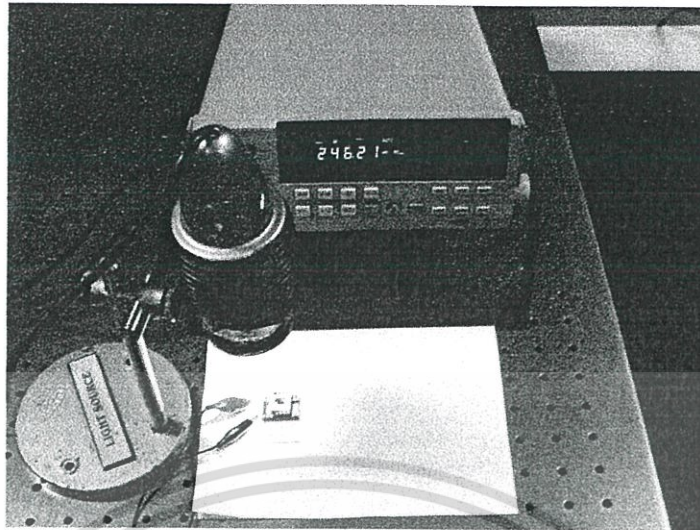
รูปที่ 5.3 ก) ผลการทดสอบการตอบสนองต่อแสง ข) ความยาวคลื่นตอบสนอง ของอุปกรณ์  
ตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 ก) ผลการทดสอบการตอบสนองต่อแสง ข) ความยาวคลื่นตอบสนอง ของอุปกรณ์  
ตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 ก) ผลการทดสอบการตอบสนองต่อแสง ข) ความยาวคลื่นตอบสนอง ของอุปกรณ์ ตัวที่ 3

จากผลการทดสอบและการวัดการตอบสนองต่อแสงของพอร์ซซิลิกอน จะเห็นได้ว่า เมื่อมีชั้นพอร์ซซิลิกอน จะมีการตอบสนองต่อแสงโดยมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 5.1 – 5.3 ขณะที่ซิลิกอนชนิดพ็อดเดียวไม่มีผลการตอบสนองดังกล่าว และความยาวคลื่นการตอบสนองจะอยู่ในย่านที่ตามองเห็น (visible light) และย่านใกล้ใต้แดง (near-infrared)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

นาโนพอร์สซิลิกอน สามารถสร้างได้ด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี โดยการใช้ซิลิกอนชนิดพี และทำการควบคุมอัตราส่วนของสารละลาย โดยกำหนดให้อัตราส่วนของสารละลาย ไฮโดรเจน ฟลูออริก:เอทานอล:น้ำ เป็น 1:2:1 มีค่าคงที่ และทำการเปลี่ยนแปลง ความหนาแน่นกระแสและ เวลาที่ใช้ในการกัด นอกจากนี้ยังใช้แหล่งกำเนิดกระแสและแหล่งกำเนิดแรงดัน เพื่อทำการ เปรียบเทียบผลที่ได้จากแหล่งกำเนิดทั้งสอง

จากผลการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด พบว่า พอร์สซิลิกอน ที่ได้ จากแหล่งกำเนิดกระแสจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีมากกว่าพอร์สซิลิกอนที่ได้จาก แหล่งกำเนิดแรงดัน แต่ลักษณะของพอร์สซิลิกอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดแรงดันจะให้ลักษณะของ พอร์สซิลิกอนที่มีความสม่ำเสมอและสมบูรณ์มากกว่า ซึ่งสาเหตุที่แหล่งกำเนิดกระแสได้ลักษณะ ของพอร์สซิลิกอนที่ไม่ดี เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดออกไซด์ ส่งผลทำให้กระแสที่ไหลในแต่ละ ตำแหน่งมีความไม่สม่ำเสมอ(localized inhomogeneous current flow) เป็นผลให้ได้พอร์ส ซิลิกอนที่ไม่ดี แต่ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดชนิดปลดปล่อยสนาม แสดงให้เห็นถึงเส้นใยของซิลิกอนในระดับนาโนเมตรและ กลุ่มของผลึกระดับนาโนเมตรที่มีขนาด อยู่ในระดับ 5- 20 นาโนเมตร ที่ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ควอนตัมได้ ในกรณีที่พอร์สซิลิกอนสร้าง จากแหล่งกำเนิดแรงดัน จะเห็นได้ว่า ลักษณะของรูพรุนและเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมีความ สม่ำเสมอมากกว่าพอร์สซิลิกอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดแรงดัน และความหนาของผนังรูพรุนอยู่ใน ระดับต่ำกว่า 350 นาโนเมตร และแม้ว่าจะไม่ปรากฏกลุ่มของผลึกระดับนาโนเมตร แต่ความบาง ของผนังที่อยู่ในระดับนาโนเมตร ก็ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ควอนตัมได้เช่นกัน

ผลการวัดโฟโตเคอร์เรนต์สเปกโตรสโคปี พบว่า สำหรับซิลิกอนชนิดพีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะ ตอบสนองที่พลังงานโฟตอนประมาณ 1.2 eV และผลจากการวัดพอร์สซิลิกอนที่ได้จาก แหล่งกำเนิดกระแส จะมียอดพีคที่ตอบสนองตามนี้ 1.18 eV เป็นผลจากการดูดกลืนของพันธะ ระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจน ที่พลังงาน 1.28 eV เป็นการดูดกลืนเนื่องจากสถานะรอยต่อ (interface state) ระหว่างซิลิกอนกับพอร์สซิลิกอน ที่พลังงาน 1.37 eV เกิดจากการดูดกลืนของ ซิลิกอนที่สถานะแตริป และพลังงานโฟตอน 2.11 eV และ 2.15 eV เกิดขึ้นเนื่องจากผลของ ปรากฏการณ์ทางควอนตัม ขณะที่ พอร์สซิลิกอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดแรงดัน จะมี จะมียอดพีคที่ ตอบสนอง คือ 1.37 eV และ 1.55 eV ในส่วนของพลังงาน 1.55 eV เป็นผลเนื่องมาจาก ปรากฏการณ์ควอนตัม ของโครงสร้างที่ลดขนาดลงจนอยู่ในระดับนาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

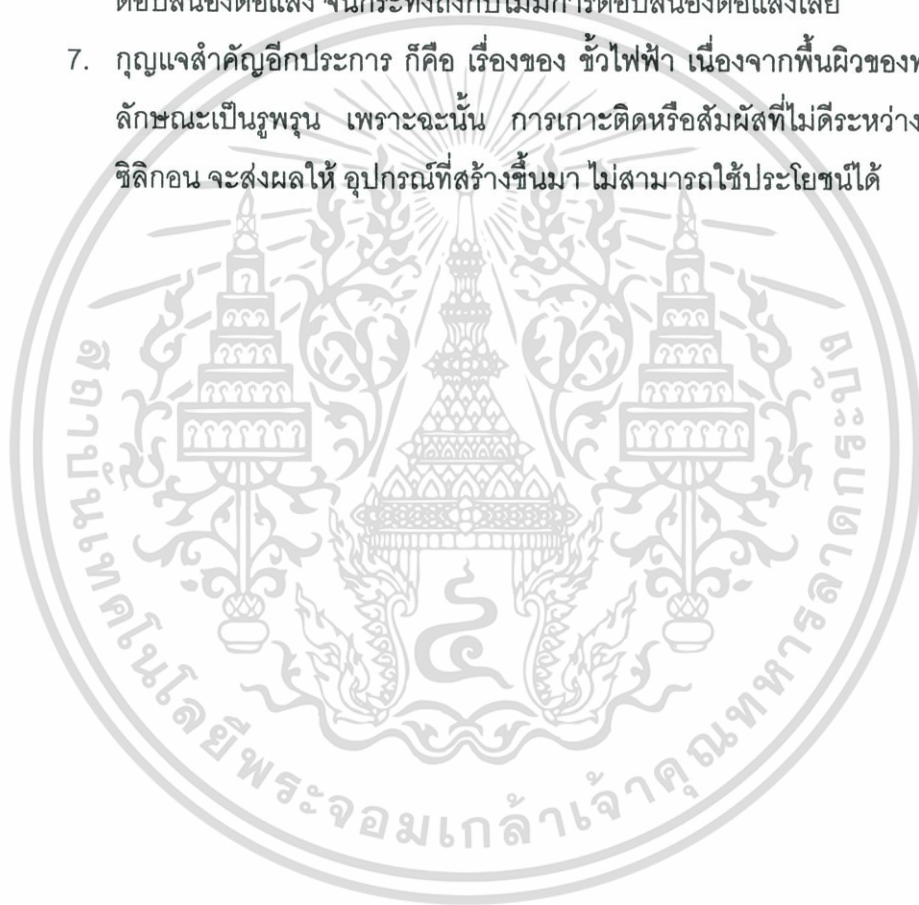
การประยุกต์ใช้งาน เราสามารถนำพอร์สซิลิกอนมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสงได้ โดยมีโครงสร้างอย่างง่ายดังนี้ ITO/PS/p-Si/Al โดยที่ผิวสัมผัสระหว่างอินเดียมทินออกไซด์กับพอร์สซิลิกอนเป็นผิวสัมผัสแบบขอตตีก์แบเรีย (Schottky barrier contact) ขณะที่รอยต่อระหว่างพอร์สซิลิกอนกับซิลิกอนชนิดที่เป็นรอยต่อแบบเฮเทอโรโร ดังนั้น อุปกรณ์ตรวจวัดแสงนี้ จึงมีแสดงพฤติกรรมเหมือน ขอตตีก์แบเรียไดโอด และผลการทดสอบอย่างง่ายด้วยการฉายแสงจากหลอดทังสเตน พบว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมีการตอบสนองต่อแสง โดยสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น ขณะที่ซิลิกอนชนิดที่ถูกทำเป็นอุปกรณ์ไม่มีการตอบสนอง นอกจากนี้ จากการวัดความยาวคลื่นการตอบสนอง ผลที่ได้จะอยู่ในย่านที่ตามองเห็น (visible light) และย่านใกล้ได้แดง (near-infrared)

### ข้อเสนอแนะ

1. ซิลิกอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นแบบที่เรียกว่า ดัมมี่ (dummies) คือ ไม่ทราบค่าความต้านทาน ปริมาณสารเจือ ทิศทางของผลึก ทราบแต่เพียงว่าเป็นชนิดพี ซึ่งข้อมูลที่ไม่ทราบดังกล่าว เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน ดังนั้น จึงเป็นเรื่องที่สำคัญมาก ที่เราจำเป็นต้องทราบข้อมูล เบื้องต้นดังกล่าว
2. ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรฟลูออริก เป็นอีกตัวแปรที่สำคัญ ซึ่งในการทำวิจัย ควรที่จะมีให้เลือกหลายความเข้มข้น เพื่อเลือกใช้ให้เหมาะสม
3. แผ่นซิลิกอนที่จะใช้สร้างชั้นพอร์สซิลิกอน จะมีค่าความต้านทาน ปริมาณสารเจือ ทิศทางของผลึก ไม่เหมือนกัน ฉะนั้นจำเป็นต้องตรวจสอบความหนาแน่นกระแสที่จะทำให้เกิดพอร์สซิลิกอนอย่างชัดเจน ถ้ากำหนดให้  $J$  คือ ความหนาแน่นกระแสที่จะเลือกใช้ และ  $J_{ps}$  คือ ความหนาแน่นกระแสที่เกิดพอร์สซิลิกอน มีกฎง่ายๆ คือ
  - ถ้า  $J > J_{ps}$  จะเกิดการขัดผิวหน้าขึ้น (electropolishing)
  - $J < J_{ps}$  พอร์สซิลิกอนจะเริ่มมีการฟอร์มตัวขึ้น
  - และ  $J = J_{ps}$  จะเกิดสภาวะที่เรียกว่า สถานะคงที่ (steady state) ซึ่งจะทำให้ได้พอร์สซิลิกอน ที่มีความสมบูรณ์และสม่ำเสมอที่สุด
4. ในระหว่างการทำปฏิกิริยาจะเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนขึ้น ฟองก๊าซนี้ถ้าถ่ายเทไม่ดีจะทำให้เกิดการสะสมกันที่ขั้วลบด้านบน ส่งผลให้พอร์สซิลิกอนที่ได้ไม่มีความสม่ำเสมอ ดังนั้นในการออกแบบระบบจำเป็นต้องหาวิธีการถ่ายเทก๊าซนี้ เช่น การเขย่าอย่างต่อเนื่องตลอดการทดลอง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สาเหตุหลักที่ทำให้ได้พอร์ซซีลิกอนที่ไม่ดี เนื่องจากการมีออกซิเจนมากเกินไป ซึ่งออกซิเจนนี้มาจากน้ำ แต่เป็นที่ทราบกันว่าระบบสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่เหมาะสมจะสร้างพอร์ซซีลิกอนที่ดีที่สุด คือ ระบบไฮโดรฟลูออริก-น้ำ(HF-H<sub>2</sub>O system) ดังนั้นจำเป็นต้องหาวิธีการลดปริมาณออกซิเจน และเพิ่มไฮโดรเจน(ไม่ใช่สถานะก๊าซ)เข้าไปแทน เนื่องจากไฮโดรเจนซึ่งเกาะที่พื้นผิวจะช่วยนำไฟฟ้าแล้วยังทำให้ไฮลมีโอกาสนทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นด้วย
6. ในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสง สิ่งสำคัญที่สุดที่จะต้องคำนึงถึง คือ การเกิดออกซิเดชัน ภายในรูพรุน ซึ่งนี่จะเป็นสาเหตุหลักในการลดความไวในการตอบสนองต่อแสง จนกระทั่งถึงกับไม่มีการตอบสนองต่อแสงเลย
7. กุญแจสำคัญอีกประการ ก็คือ เรื่องของ ขั้วไฟฟ้า เนื่องจากพื้นผิวของพอร์ซซีลิกอนมีลักษณะเป็นรูพรุน เพราะฉะนั้น การเกาะติดหรือสัมผัสที่ไม่ดีระหว่าง ขั้วกับพอร์ซซีลิกอน จะส่งผลให้ อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมา ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] L.T. Canham[ *Appl. Phys. Lett.* (USA)Vol.57(1990)p.1046
- [2] X. G. Zhang, *J. Electrochem. Soc.* (USA) Vol. 138(1991) p. 3750-6
- [3] G. Di Francia, A. Citarella, *J. Appl. Phys.* Vol. 77(1995) p.354
- [4] V. Lehmann and U. Gosele, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 58 (1990) p. 856
- [5] V. Lehmann, B. Jobst, T. Muschik, A. Kux and V. Petrova-Koch, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 32,Pt. 1, No. 5A, p. 2095-2099(1993)
- [6] J. Carstensen, M. Christophersen, H. Foll, *Mater. Sci. Eng.* B69-70 (2000) 23
- [7] M. Christophersen, J. Carstensen, A. Feuerhake, H. Foll, *Mater. Sci. Eng.* B69-70 (2000) 194
- [8] D.A. Kim, S. I. Im, C. M. Whang, W.S. Cho, Y. C. Yoo, N. H. Cho, J. G. Kim and Y.J. Kwon, *Appl. Surf. Sci.* 230(2004)125
- [9] S.N. Sharma, R. Bamerjee, A.K. Barua, *Curr. Appl. Phys.* 3(2003) 269
- [10] G. Barillaro , A. Diligenti , M. Piotto , M. Allegrini , F. Fuso and L. Pardi, *Mater. Sci. Eng.* B101 (2003) 266
- [11] M. Parkinson, S.C. Bayliss, D.T. Clarke, D. Law, G. Beamson, *Thin Solid Films* 326 (1998) 194
- [12] G. Mauckner, W. Rebitzer, K. Thomke, R. Sauer, *Solid State Commun.* 91(1994) 717
- [13] N. Koshida and H. Koyama, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 60(1992) p. 347
- [14] J. P. Zheng, K. L. Jiao, W. P. Shen, W. A. Anderson and H. S. Kwok, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 61(1992) p. 459
- [15] L. Canham, *Properties of porous silicon*, London : INSPEC, IEE, c1997
- [16] ดุสิต เครื่องงาม, **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่ม 1**, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายกาจปัญญา สุวรรณสุข
วัน เดือน ปีเกิด	17 พฤษภาคม พ.ศ. 2519 ที่ อำเภอเมือง จังหวัดยะลา
ที่อยู่	278/84 ถ. เพชรเกษม ซอย 4 แขวงวัดท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพฯ 10600
ประวัติการศึกษา	2537 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนโพน ทองพัฒนาวิทยา อ.โพนทอง จ.ร้อยเอ็ด 2541 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัย นเรศวร อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 2545 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตร มหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้