

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสมบัติพื้นฐานของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงจากพอร์สซิลิกอน



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา พ.ศ.2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **A study of Fundamental Property of Porous Silicon Photodetector**

**Miss. Passanunporn Sopa**



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Bachelor  
of Science**

**Department of Applied Physics**

**Faculty of Science**

**King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**

**Academic Year 2005**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง

การศึกษาสมบัติพื้นฐานของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงจาก  
พอร์สซิลิกอน

นักศึกษา

นางสาวพรชนันท์พร โสภา

ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

สาขาวิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. จิติ หนูแก้ว

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

อาจารย์ กางปัญญา สุวรรณสุขโข

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร-  
บัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือ
ประธานกรรมการ	อ.ทศยาภรณ์ ทิววงศ์	
กรรมการ	อ.เบญจพล ต้นอู๋	
กรรมการ	รศ.วิษณุ เพชรภา	
กรรมการที่ปรึกษา	รศ.ดร. จิติ หนูแก้ว	



(รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาสมบัติพื้นฐานของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงจากพอร์สซิลิกอน
นักศึกษา	นางสาวพรชนันท์พร โสภา
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์-เครื่องมือวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	พ.ศ.2548
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. จิตี หนูแก้ว
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ กางปัญญา สุวรรณสุโข

### บทคัดย่อ

ซิลิกอนชนิดพี ที่ถูกกัดด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยใช้แหล่งกำเนิดกระแส จะทำให้เกิด โครงสร้างของพอร์สซิลิกอนซึ่งสามารถตรวจสอบสมบัติพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด โครงสร้างของพอร์สซิลิกอนสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสและเวลาที่ใช้ในการกัด สมบัติทางแสงตรวจสอบด้วยระบบวัดโฟโตเคอร์เรนท์สเปกโตรสโคปี ผลจากการวัด แสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ควอนตัมคอนไฟน์เมนต์ ของพอร์สซิลิกอน สามารถนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสง ผลจากการวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อแรงดันพบว่าพอร์สซิลิกอนแสดงพฤติกรรมเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงประเภท โฟโตไดโอด

**Special Project Title** A study of Porous Silicon Photodetector  
**Name** Miss Passanunporn Sopa  
**Department of** Applied Physics Faculty of Science  
**Program** Applied Physics-Science and Industry Instrumentation  
**Academic Year** 2005  
**Special Project Advisor** Assoc. Prof. Dr. Jiti Nukeaw  
**Special Project co-avisor** Mr. Kajpanya Suwansukho

### ABSTRACT

P-type silicon was etched by electro-chemical etching by HF solution. The current source is applied to excite the chemical process to form porous silicon structure. The scanning electron microscope (SEM) was observed surface morphology of porous. The results of SEM micrograph confirm that porous structures were different due to various current densities and etching time. Optical properties of porous silicon were investigated by photocurrent spectroscopy (PC). The PC spectra showed the quantum confinement effect of porous-silicon that it addresses to photo detector application. The I-V Characteristics results illustrate that porous silicon have photodiode behavior.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเล่มนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ ก็ด้วยบุคคลที่ให้การสนับสนุนเหล่านี้

1. ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดาที่ให้การกำเนิด และมอบทรัพย์สินที่มีค่ามากที่สุดคือ การศึกษา รวมทั้ง Notebook เครื่องใหม่สำหรับการทำงานที่สะดวกมากขึ้น
2. ขอกราบขอบพระคุณครู- อาจารย์ทุกคนที่ให้ความรู้อย่างเต็มใจ
3. ขอพระขอบคุณ รศ.ดร.จิตติ หนูแก้ว, อาจารย์กาญจน์ปัญญา สุวรรณสุขุโข ที่ให้คำปรึกษาและช่วยแก้ปัญหาตลอดการวิจัย ซึ่งเป็นบุคคลสำคัญที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี
5. ขอขอบคุณ นายพรชนก อินทโก ที่เอื้อเฟื้อคอมพิวเตอร์และอินเทอร์เน็ตสำหรับค้นคว้าข้อมูล รวมทั้งความห่วงใย กำลังใจและคำปลอบใจที่ให้แก่ตลอดมา
6. ขอขอบคุณ นายนพพรชัย โสภาน้องชายที่ไม่ได้ช่วยเหลืออะไรแต่คอยเป็นห่วงกัน และทำให้พี่เข้มแข็งมากขึ้น
7. ขอขอบคุณมิตรภาพและกำลังใจที่ได้จากเพื่อนๆ ทุกคนมาตลอด
8. ที่จะต้องขอบคุณเป็นพิเศษคือบุคลากรในห้องปฏิบัติ การวิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสง พี่นิสาพร ภรธีรภัทร, อาจารย์สุรชาติ กมลฉลิก, พี่ดอน คล้ายทับทิม, อาจารย์หุติยาภรณ์ ทิวาวงศ์ พี่นพพันธ์ ขยันกิจ, พี่อนุศิษย์ แก้วประจักษ์และพี่อรรณพ จันทร์หอม รวมทั้ง คุณจักรพันธ์ ศักดิ์แสง คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์ ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือวัด

นางสาว พรชนันท์พร โสภาน้องชาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 พอร์สซิลิกอน	4
2.1.1 การเกิดพอร์สซิลิกอน	4
2.1.2 กลไกในการเกิดพอร์สซิลิกอน	5
2.1.3 ความพรุนของพอร์สซิลิกอน	10
2.2 ลักษณะของแถบพลังงาน	11
2.3 ปฏิกิริยาการนำคอนแทกคอนไฟต์เมนต์	13
2.4 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์	18
2.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด	18
2.4.2 โฟโตเคอร์เรนท์สเปกโตรสโคปี	20
2.5 โครงสร้างและหลักการทํางานของตัวตรวจจับแสงพอร์สซิลิกอน	22
2.6 สิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน	24
2.6.1 ข้อพิจารณาในการใช้สิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสง	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	
3.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน	26
3.2 ขั้นตอนการปลูกชั้นอลูมิเนียม	27

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3 ขั้นตอนการสร้างชั้นพอร์สซิติคอน	28
3.4 ขั้นตอนการประดิษฐ์ตัวตรวจรับแสงพอร์สซิติคอน	30
3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์	30
3.5.1 การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด	30
3.5.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยระบบวัดโฟโตเคอร์เรนซ์	31
3.5.3 การวัดการตอบสนองต่อแรงดันด้วยระบบวัดIV	32
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	
4.1 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือน กราดของพอร์สซิติคอนที่ได้จากกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยแหล่ง กำเนิดกระแสไฟฟ้า	35
4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยระบบโฟโตเคอร์เรนซ์ ของพอร์สซิติคอนที่ได้จากกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีด้วย แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า	38
4.3 ผลความยาวคลื่นที่ตอบสนองจากระบบวัดโฟโตเคอร์เรนซ์	43
4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติกระแส-แรงดัน (I-V Characteristics) ของพอร์สซิติคอนที่ได้จากกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมี ด้วยแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	53
เอกสารอ้างอิง	56

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์สซอลิกอน	3
4.1 แสดงตัวอย่างตามเงื่อนไขที่ใช้สร้างชั้นพอร์สซอลิกอน	34



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพแสดงกระบวนการกักทางไฟฟ้าเคมี	4
2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ พอร์สซิติคอนจะเกิดขึ้นได้ ก็ต่อเมื่อ $j_{ps} < j_{cp}$	5
2.3 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกักเนื้อของผลึกซิติคอน	7
2.4 การเกิดพอร์สซิติคอน (รูปบน) สถานะเริ่มต้น การเกิดพอร์สเป็นไปอย่าง ลุ่มบนพื้นผิวของซิติคอน (รูปกลาง) กระบวนการปรับด้วยตนเอง (Self – regulating process) เมื่อพื้นที่ว่างเกิดการซ้อนทับกัน การเกิดรูพรุนจะเปลี่ยนจากแบบไอโซโทรปิก(Isotropic growth) เป็น แบบไดเรกชันนอล(Directional growth) (รูปล่าง) เฉพาะปลายยอด ของรูพรุนเท่านั้นที่ เกิดปฏิกิริยา	9
2.5 แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์สซิติคอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ	11
2.6 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิติคอน	12
2.7 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างพอร์สซิติคอนกับซิติคอนที่ซึ่ง โครงสร้างของผลึก ซิติคอนขนาดเล็กกลางจนเพียงพอที่จะแสดงพฤติกรรม ควอนตัมคอนไฟน์เมนต์	13
2.8 แสดงบ่อศักย์สี่เหลี่ยมสูงอนันต์ (Infinite Square well potential)	15
2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของขนาดเม็ดผลึก กับค่าแถบพลังงานต้องห้าม	17
2.10 องค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด	18
2.11 โฟโตเคอร์เรนท์ ในสารกึ่งตัวนำ	21
2.12 ซอดกึ่งแบเรียซึ่งเกิดจากการที่พอร์สซิติคอนสัมผัสกับอินเดียมฯ ซึ่งมีค่าฟังก์ชันงานสูงกว่า	23
3.1 สารเคมีและเครื่องอัลตราโซนิกที่ใช้ในการทำความสะอาดแผ่นซิติคอน	26
3.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิติคอน	27
3.3 แสดงลักษณะของระบบ อาร์เอฟ แมกนีตรอนสปัดเคอริง	27
3.4 แสดงการจัดอุปกรณ์และเครื่องมือ	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 ระบบการกักทางไฟฟ้าเคมี	29
3.6 แสดงลักษณะกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด	30
3.7 การจัดอุปกรณ์ ในการวัดโฟโตเคอร์เรนซ์	31
3.8 แผนภาพแสดงไดอะแกรมระบบวัดโฟโตเคอร์เรนซ์	32
3.9 การจัดอุปกรณ์ ในการวัดการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้า (IV)	33
3.10แผนภาพแสดงไดอะแกรมระบบวัดการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้า (IV)	33
4.1 ภาพถ่ายด้านบนพื้นผิวของตัวอย่างที่1	35
4.2 ภาพถ่ายด้านบนพื้นผิวของตัวอย่างที่2	36
4.3 ภาพถ่ายด้านบนพื้นผิวของตัวอย่างที่3	36
4.4 ภาพถ่ายด้านบนพื้นผิวของตัวอย่างที่4	36
4.5 ภาพถ่ายด้านบนพื้นผิวของตัวอย่างที่5	37
4.6 ภาพถ่ายด้านบนพื้นผิวของตัวอย่างที่6	37
4.7 ภาพถ่ายด้านบนพื้นผิวของตัวอย่างที่7	37
4.8 กราฟโฟโตเคอร์เรนซ์ ของตัวอย่างที่ 1-7	38
4.9 กราฟโฟโตเคอร์เรนซ์ ของตัวอย่างที่ 1-3	39
4.10 กราฟโฟโตเคอร์เรนซ์ ของตัวอย่างที่4-7	40
4.11 กราฟโฟโตเคอร์เรนซ์ เปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่1 และตัวอย่างที่ 5	41
4.12 กราฟโฟโตเคอร์เรนซ์ เปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่2 และตัวอย่างที่ 6	42
4.13 กราฟโฟโตเคอร์เรนซ์ เปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่3 และตัวอย่างที่ 7	42
4.14 ความยาวคลื่นที่ตอบสนองของตัวอย่างที่ 1-7	43
4.15 ความยาวคลื่นที่ตอบสนองของตัวอย่างที่ 1-3	44
4.16 ความยาวคลื่นที่ตอบสนองของตัวอย่างที่ 4-7	44
4.17 แสดงการวัดวิเคราะห์สมวัตติกระแส-แรงดัน (I-V Characteristics) ของพอร์สซิลิกอนที่ได้จาก กระบวนการกักทางไฟฟ้าเคมีด้วยแหล่งกำเนิด กระแสไฟฟ้าขณะอยู่ในสภาวะด้วยหลอดไฟทั้งสแตนด์ กำลัง100วัตต์	45
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสขณะอยู่ในที่มีคของตัวอย่างที่I-7	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ขณะอยู่ในที่สว่างด้วยหลอดไฟทั้งสแตน กำลัง100วัตต์ โดยตัวอย่างที่1-7	48
4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของพอร์ส ที่กักด้วยความหนาแน่นกระแส 200 (mA/cm <sup>2</sup> ) ในที่มืด	49
4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของพอร์ส ที่กักด้วยความหนาแน่นกระแส 200 (mA/cm <sup>2</sup> ) ในแสงสว่างกำลัง100วัตต์	50
4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของพอร์ส ที่กักด้วยความหนาแน่นกระแส400 (mA/cm <sup>2</sup> ) ที่มืด	51
4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของพอร์ส ที่กักด้วยความหนาแน่นกระแส400 (mA/cm <sup>2</sup> ) ในแสงสว่างกำลัง100วัตต์	52

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

เทคโนโลยีที่ทันสมัยในปัจจุบันจะอาศัยคุณสมบัติทางแสงเช่น การเปล่งแสง การดูดกลืนแสง การกระจายแสง การมอดูเลตแสง และการประมวลสัญญาณแสง มาใช้ประโยชน์ซึ่งสิ่งประดิษฐ์ที่เกี่ยวข้องกับแสงจะเรียกว่า สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอดเปล่งแสง ตัวตรวจจับแสง โฟโตไดโอด เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น โดยวัสดุสำคัญที่เลือกนำมาใช้สร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์คือ สารกึ่งตัวนำ วัสดุสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้ซึ่งมีราคาค่อนข้างถูก และมีมากบนพื้นโลก ได้แก่ ซิลิกอน ที่ได้จากการถลุงแร่ควอตไซต์หรือทราย

หลังจากที่ได้มีการประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์ในปี พ.ศ.2490 ซิลิกอนจึงได้เริ่มมีบทบาทในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำเป็นอย่างมาก ซิลิกอนถูกนำมาใช้เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำในอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Microelectronic) เป็นเวลานานแล้ว แต่การที่ซิลิกอนมีโครงสร้างแถบพลังงานแบบไม่ตรง (Indirect band gap) ทำให้สารกึ่งตัวนำชนิดนี้ไม่เหมาะนำมาใช้ในงานทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (Optoelectronics) จนเมื่อมีการค้นพบคุณสมบัติในการเปล่งแสง (Luminescent) ที่อุณหภูมิห้องของผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากที่เรียกว่า พอร์สซิลิกอน (Porous Silicon) ซึ่งสร้างได้จากขบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical etching) พอร์สซิลิกอนที่รูพรุนมีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรจะถูกเรียกว่า นาโนพอร์สซิลิกอน (Nanoporous Silicon) เนื้อของผลึกในระดับนาโนเมตรนี้จะแสดงคุณสมบัติทางควอนตัม เป็นที่น่าสนใจมากเพราะมีศักยภาพในการประยุกต์การใช้งานในหลายด้าน เช่น ไดโอดเปล่งแสง (Light-Emitting Diodes) ท่อนำคลื่น (Waveguides) ตัวตรวจวัดแสง (Photo detector) และเซ็นเซอร์แก๊ส (Gas sensor) เป็นต้น

จากคุณสมบัติของนาโนพอร์สซิลิกอนที่สามารถนำมาประยุกต์การใช้งานหลายด้านนั้นทำให้มีความน่าสนใจที่จะทำการพัฒนาสร้างเป็นอุปกรณ์เปล่งแสงและอุปกรณ์รับแสงให้รวมอยู่กับอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นบนฐานรองรับซิลิกอนเดียวกันได้ซึ่งจะทำให้การติดต่อรับส่งข้อมูลต่างๆภายในวงจรรวมหรือระหว่างวงจรรวมด้วยกันมีการเปลี่ยนจากการใช้สัญญาณไฟฟ้ามาเป็นสัญญาณทางแสงแทนเพราะการติดต่อรับส่งข้อมูลโดยใช้สัญญาณทางแสงจะสามารถติดต่อ

รับส่งข้อมูลได้คราวละมากๆในเวลาเดียวกันโดยไม่มีการรบกวนกันของสัญญาณเหมือนกับที่เกิดขึ้นกับการรับส่งสัญญาณไฟฟ้า

การศึกษาการสร้างพอร์สซิลิกอนให้เป็นอุปกรณ์ตรวจรับแสงซึ่งในงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของตัวตรวจจับทางแสง ซึ่งต้องทำการปลูกชั้นไฟฟ้าให้กับพอร์สซิลิกอนเพื่อให้เป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจวัดแสง ซึ่งการปลูกชั้นไฟฟ้ามักมีหลายวิธี แต่จะเลือกใช้การปลูกชั้นไฟฟ้าไปร่งไอฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (Indium Tin Oxide; ITO) ในการสร้างให้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสง เพราะ ITO มีสมบัติความต้านทานต่ำ ค่าการทะลุผ่านของแสงสูง การปลูกชั้นไฟฟ้านั้นสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ Thermal Evaporation, E-Beam Evaporation, Spray Pyrolysis และ Sputtering โดยจะเลือกใช้วิธี Sputtering เพราะสามารถทำที่อุณหภูมิต่ำได้แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสงนาโนพอร์สซิลิกอน

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษากระบวนการเกิดพอร์สซิลิกอน ด้วยระบบการกัดทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Etching)
2. ศึกษาการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสงด้วยพอร์สซิลิกอน
3. วิเคราะห์พื้นผิว สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้า ด้วยระบบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ระบบวัดโฟโตเคอร์เรนท์และระบบวัดกระแส-แรงดัน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในการวิจัยนี้เป็นการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสงจากพอร์สซิลิกอนที่สร้างด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมีและปลูกชั้นไฟฟ้าไปร่งไอฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (Indium Tin Oxide; ITO) จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์พื้นผิว ศึกษาสมบัติทางแสง ด้วยระบบวัดโฟโตเคอร์เรนท์ และสมบัติทางไฟฟ้าด้วยระบบวัดกระแส-แรงดัน เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสง

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษากระบวนการเกิดพอร์สซึกลิกอนด้วยขบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Etching)
2. สร้างพอร์สซึกลิกอนให้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสงโดยปลูกชั้นไฟฟ้าโปร่งใสฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (Indium Tin Oxide; ITO)
3. วิเคราะห์พื้นผิว สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้า ด้วยระบบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ระบบวัดโฟโตเคอร์เรนท์และระบบวัดกระแสแรงดัน
4. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความสามารถในการสร้างพอร์สซึกลิกอน ด้วยระบบการกัดทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical etching)
2. มีความรู้ความสามารถในการปลูกชั้นไฟฟ้าโปร่งใสฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (Indium Tin Oxide; ITO) ให้แก่พอร์สซึกลิกอน เพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจวัดทางแสงได้
3. มีความรู้ความสามารถในการใช้ระบบวัดโฟโตเคอร์เรนท์ และระบบวัดกระแสแรงดัน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางแสงและไฟฟ้าได้

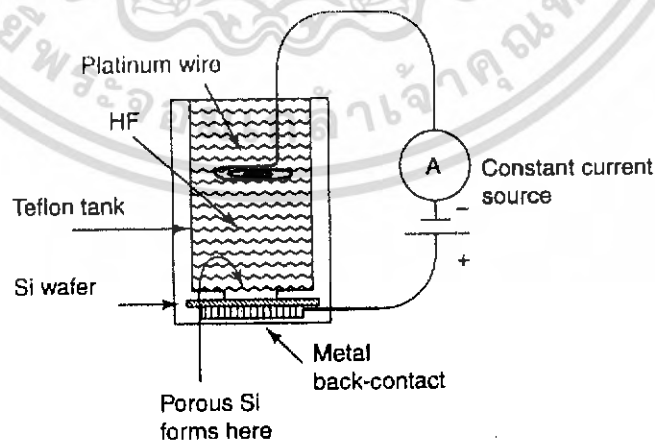
## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พอร์สซิลิกอน

##### 2.1.1 การเกิดพอร์สซิลิกอน

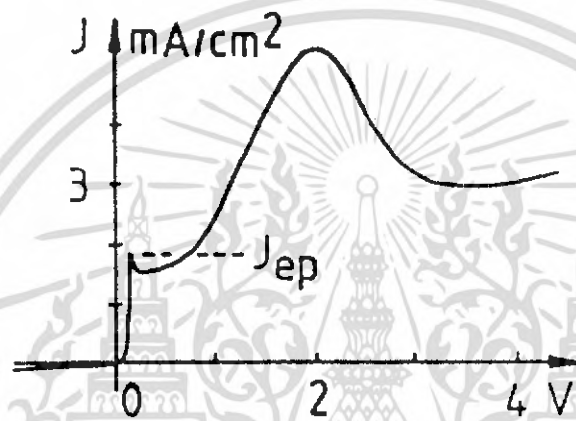
พอร์สซิลิกอน เป็นที่ทราบกันดีว่าเกิดขึ้นเนื่องจาก ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีของซิลิกอนกับ สารละลายที่มีส่วนประกอบของไฮโดรฟลูออริก ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นเนื่องจากการจ่ายกระแส คงที่เข้าไปในระบบ รูปที่ 2.1 แสดงแผนภาพ ระบบการกัดทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งประกอบด้วย แผ่น ซิลิกอนที่ต่ออยู่กับขั้วบวกด้านหลัง ส่วนขั้วลบสามารถใช้ ขดแพลทินัม(Platinum spiral) หรือ เป็นแบบแผ่นตาข่ายกลม(Circular grid) หรือไม้ก็เป็นวัสดุที่ทนต่อไฮโดรเจนฟลูออไรด์และเป็น วัสดุนำไฟฟ้า ตัววัสดุที่ใช้บรรจุสารละลาย 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษา พอร์สซิลิกอนสร้างได้จากการกัดทางไฟฟ้าเคมีในสารละลายไฮโดรฟลูออริกเจือจาง หรือ สารละลายเอทานอิกไฮโดรฟลูออริก (Ethanoic HF solution) รูปที่ 2.2 เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ ของสารละลายไฮโดรฟลูออริกเจือจาง เงื่อนไขการเกิดพอร์สซิลิกอนจะเกิดขึ้นได้ ก็ต่อเมื่อ ความหนาแน่นกระแสของการเกิดพอร์ส  $j_{ps}$  ต้องต่ำกว่า ความหนาแน่นกระแสของการขัดผิวหน้า (Electropolishing)  $j_{cp}$  และค่า  $j_{cp}$  ขึ้นอยู่กับ ส่วนประกอบของสารละลายและชนิดของฐานรอง ถ้า  $j_{ps} > j_{cp}$  จะเกิดการขัดผิวหน้าขึ้น



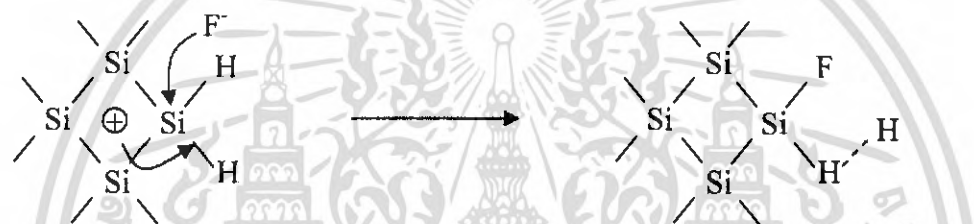
รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ พอร์สซิลิกอนจะเกิดขึ้นได้ ก็ต่อเมื่อ  $j_{ps} < j_{cp}$  [3]

### 2.1.2 กลไกในการเกิดพอร์สซิลิกอน

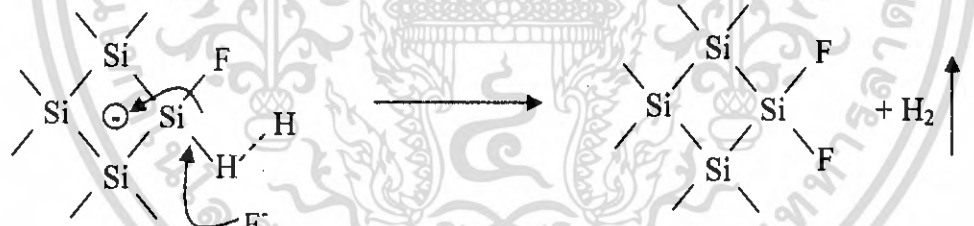
มีกลไกที่แตกต่างกันหลายๆ กลไก ที่เกี่ยวข้องกับสารละลายทางเคมีของซิลิกอนได้ถูก รายงานไว้เป็นจำนวนมาก แต่โดยทั่วไปแล้ว เป็นที่ยอมรับกันว่า โฮล(Hole) เป็นตัวการสำคัญ ในการทำให้เกิดพอร์สซิลิกอน ในจำนวนโมเดลต่างๆ ที่ได้มีการนำเสนอ สำหรับปฏิกิริยาสารละลาย ทางเคมีของซิลิกอนนั้น โมเดลที่ได้รับการยอมรับมากที่สุด ถูกนำเสนอโดย เลขมานน์และโกเซล (Lehmann and Gösele) ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 เพื่อที่จะเข้าใจถึงกลไกในการเกิดพอร์ส ซิลิกอน เราจำเป็นต้องทราบถึงปฏิกิริยาเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน ที่อยู่ภายใต้การไบอัส (Bias) ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าในสภาวะปกติเมื่อทำการ จุ่มผลึกซิลิกอนลงไป ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกผิวหน้าของผลึกซิลิกอนจะไม่ถูกสารละลาย กรดไฮโดรฟลูออริกกัดแต่อย่างใด แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ผลึกซิลิกอนที่สัมผัสสารละลาย ถูกไบอัสด้วย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักย์ไฟฟ้าแล้ว ผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ เกิดเป็นชั้นของพอร์ซซิลิกอนขึ้นมา โดยปฏิกิริยาเคมีและขั้นตอนในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนแสดงไว้ในรูปที่ 2.3 จากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงกลไกในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน ที่ทำให้เกิดชั้นของพอร์ซซิลิกอนขึ้นมา เริ่มต้นจากขั้นตอนแรกเมื่อยังไม่มีการไบอัส ที่บริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิกอนจะมีอะตอมของไฮโดรเจนปกคลุมอยู่เต็ม มีผลทำให้ไอออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไม่สามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนได้(Si-H)แต่เมื่อไรก็ตามที่มีการไบอัสศักย์ไฟฟ้าให้กับขั้วแอโนด จนพาหะโฮล

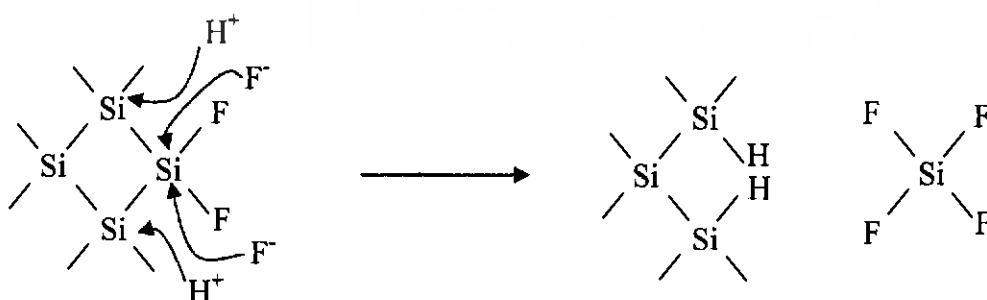
ขั้นตอนที่ 1



ขั้นตอนที่ 2

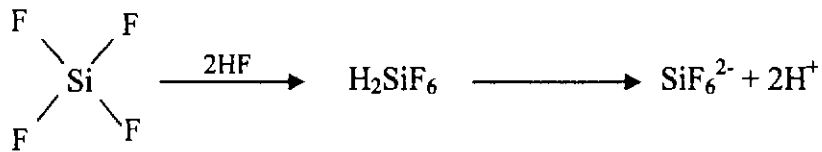


ขั้นตอนที่ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

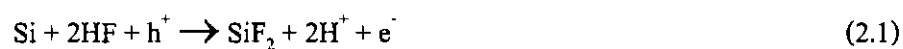
ขั้นตอนที่ 4



### รูปที่ 2.3 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน

สามารถเคลื่อนที่มาถึงบริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่ผิวสามารถถูกทำลายได้โดยไอออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรด เกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับฟลูออรีน(Si-F) ขึ้นมาแทน ดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 1 นอกจากนี้ไอออนของฟลูออรีน อีกตัวที่อยู่ในสารละลายสามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอม ที่ยังคงเหลืออยู่อีกข้างหนึ่งได้ พร้อมกับมีการปลดปล่อยพาหะอิเล็กตรอน 1 ตัว ไปยังขั้วแอโนด และเกิดโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน( $\text{H}_2$ ) ขึ้น ดังแสดงในขั้นตอนที่ 2 ต่อจากนั้นก็เกิดการเหนี่ยวนำว่าเลนส์อิเล็กตรอน โดยกลุ่มของพันธะเคมีซิลิกอนกับฟลูออรีนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 มีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับซิลิกอนที่อยู่ถัดเข้ามา มีความแข็งแรงลดลง ทำให้พันธะเคมีดังกล่าวสามารถที่จะถูกทำลายได้โดยไอออนของฟลูออรีน เกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับฟลูออรีนขึ้นมาแทนที่ ดังแสดงในขั้นตอนที่ 3 จากขั้นตอนนี้เองจะเห็นได้ว่าอะตอมของซิลิกอนจะถูกดึงให้หลุดออกมาจากผิวหน้าของผลึกซิลิกอน พร้อมกับเกิดพันธะเคมีระหว่างไฮโดรเจนกับซิลิกอนอะตอมที่อยู่ถัดเข้ามา และในขั้นตอนที่ 4 อะตอมซิลิกอนและฟลูออไรด์ที่หลุดออกมา จะทำปฏิกิริยากับไฮโดรฟลูออริก ได้เป็นไดไฮโดรเจนซิลิกอนเฮกซะฟลูออไรด์( $\text{H}_2\text{SiF}_6$ )

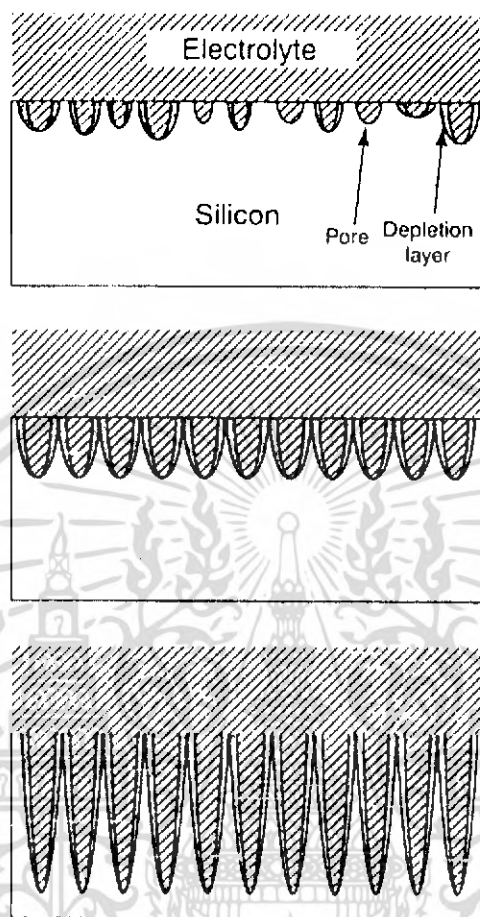
ส่วนปฏิกิริยาเคมีในการกัดที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็น จากสมการที่ (2.2) และ (2.3) สามารถเขียนสมการปฏิกิริยาเคมีรวม ได้เป็นข้อเสนอแนะด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากสมการเคมีที่แสดงข้างต้น เริ่มต้นจากปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ (2.1) ที่มีผลึกซิลิกอนเป็นสารเริ่มต้น อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยในปฏิกิริยาเคมีนี้จำเป็นที่จะต้องอาศัยไฮโดร ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจะทำให้เกิด ซิลิกอนไดฟลูออไรด์( $\text{SiF}_2$ ) กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ดังแสดงในสมการที่(2.2) ได้ผลลัพธ์เป็น ซิลิกอนเตตระฟลูออไรด์( $\text{SiF}_4$ ) ในระหว่างกระบวนการกัดขั้นตอนนี้เอง สามารถสังเกตได้ว่าจะเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนขึ้นที่ผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่ถูกกัด สุดท้ายก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง ซิลิกอนเตตระฟลูออไรด์ กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ เป็นสารละลาย  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ดังแสดงในสมการที่ (2.3) กลไกนี้ อธิบายอยู่บนพื้นฐานของปฏิกิริยาออกซิเดชันของพื้นระพื้นผิว (Surfacebound oxidation) ที่มีการจับไฮโดร(Hole capture) และตามด้วยการฉีดอิเล็กตรอน(Electron injection) ซึ่งนำไปสู่สถานะออกซิเดชันซิลิกอนไดวาเลนต์(Divalent Si oxidation state) พอร์ตซิลิกอนที่เกิดขึ้น พื้นที่ระหว่างรูพรุนจะเป็นพื้นที่ปลอดไฮโดร ยิ่งไปกว่านั้นการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ปลายยอดของรูพรุนเท่านั้น ตามรูปที่ 2.4 ด้วยวิธีนี้ กระบวนการกัดจะเกิดขึ้นในแนวลึกตามทิศทางของกระแสที่ไบอัสภายในซิลิกอน



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

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  $j_{cp}$

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

### 2.1.3 ความพรุนของพอร์สซิลิกอน

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

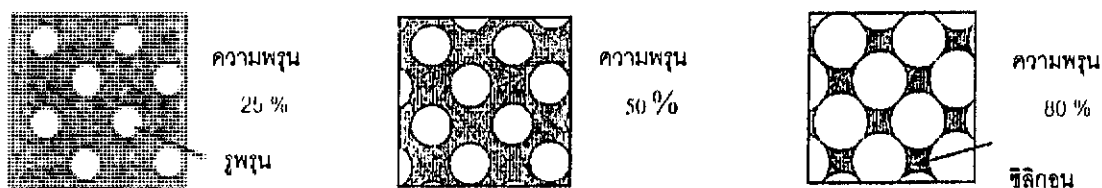
$$\text{เปอร์เซ็นต์ความพรุน} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \times 100 \quad (2.5)$$

โดยที่  $m_1$  คือ น้ำหนักของวัสดุเริ่มต้นก่อนเกิดรูพรุน

$m_2$  คือ น้ำหนักของวัสดุหลังเกิดรูพรุน

$m_3$  คือ น้ำหนักของวัสดุส่วนที่เหลือหลังจากลอกชั้นความพรุนออก

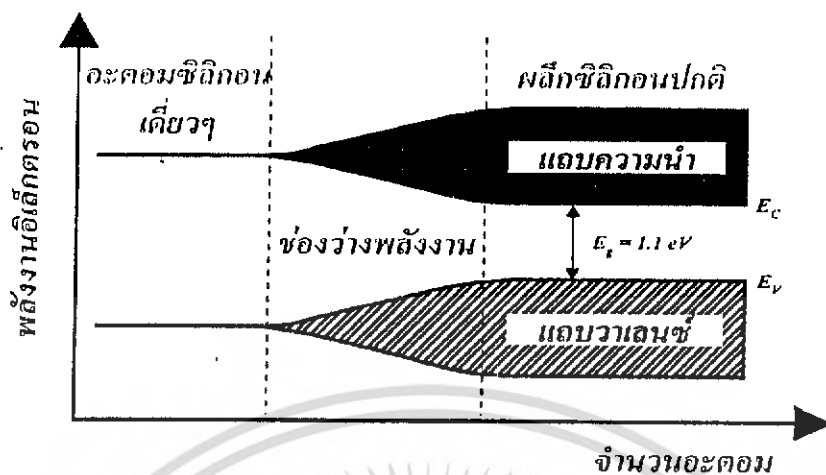
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แผนภาพจำลองด้านบนของ โครงสร้างพอร์ซซิลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ

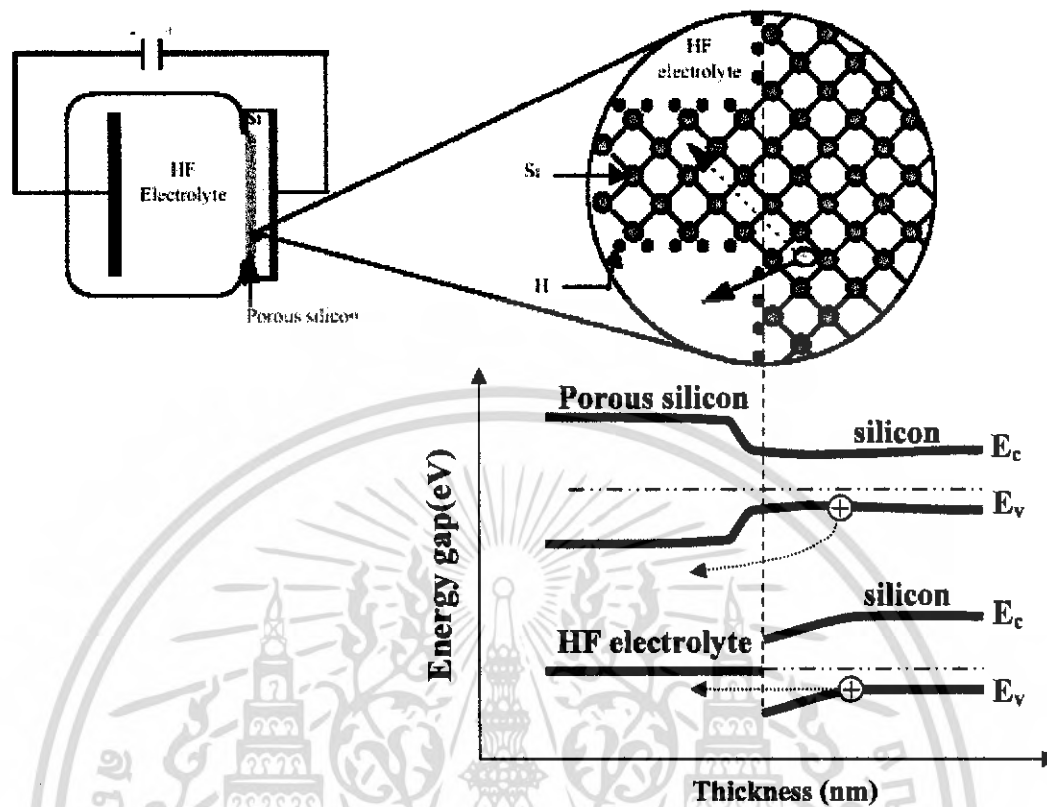
## 2.2 ลักษณะของแถบพลังงาน

จากหลักการแถบพลังงาน เมื่ออะตอมของผลึกซิลิกอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จะเกิดการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงานภายในอะตอม ทำให้เกิดการแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แตกแยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนของอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.6 จากหลักการนี้เองถ้าเราสามารถทำการลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ ก็จะทำให้ปฏิริยาระหว่างอะตอมที่มีต่อกันนั้นมีจำนวนลดลงด้วย ซึ่งจะมีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนของช่องว่างแถบพลังงาน (Band gap energy) ที่จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิลิกอนเดิม (ซึ่งมีจำนวนอะตอมซิลิกอนอยู่ภายในประมาณ  $10^{22}$  อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)



รูปที่ 2.6 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอน

จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนมีค่าลดลง จะมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนลงนั้นสามารถทำได้ โดยการลดหรือบีบขนาดของโครงสร้างของผลึกซิลิกอนให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับนาโนเมตร ซึ่งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม อันจะมีผลทำให้ลักษณะโครงสร้างของช่องว่างพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกเดิม เรียกปรากฏการณ์ลักษณะนี้ว่า ปรากฏการณ์ขนาดทางควอนตัม (Quantum size effect) ซึ่งทำให้มีค่าพลังงานเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงนี้ โดยลักษณะของแถบพลังงานดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 ซึ่งความกว้างของช่องว่างพลังงาน ( $E_{ps}$ ) มีค่าขึ้นอยู่กับขนาดโครงสร้างระดับนาโนเมตรของพอร์ซซิลิกอน จากรูปที่ 2.7 (บนขวา) แสดงโครงสร้างอะตอมของผลึกซิลิกอนที่ถูกแยกด้วยรูพรุน 2 รู และความเป็นไปได้ 2 วิธี ในการที่โฮลจะข้ามรอยต่อระหว่างซิลิกอนกับพอร์ซซิลิกอน รูปที่ 2.7 (ล่าง) แสดงแผนภาพของแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างพอร์ซซิลิกอนกับซิลิกอน และความแตกต่างกันของ 2 กำแพงศักย์ ในการที่โฮลจะข้ามกำแพงศักย์ทั้งจากซิลิกอนไปยังพอร์ซซิลิกอนและจากซิลิกอนไปยังสารละลายอิเล็กโตรไลต์



รูปที่ 2.7 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างพอร์สซิลิกอนกับซิลิกอน ที่ซึ่ง โครงสร้างของผลึกซิลิกอนขนาดเล็กลงจนเพียงพอที่จะแสดงพฤติกรรมควอนตัมคอนไฟน์เมนต์

### 2.3 ปรากฏการณ์ควอนตัมคอนไฟน์เมนต์

จากการค้นพบการเปล่งแสงที่อุณหภูมิห้องของพอร์สซิลิกอน ทำให้มีการอธิบายถึงปรากฏการณ์ควอนตัมคอนไฟน์เมนต์ พอร์สซิลิกอน ก็เหมือนกันกับ โครงสร้างในระดับนาโนเมตร แบบอื่นๆ ซึ่งพาหะ (carrier) จะถูกขังอยู่ในขอบเขตของโครงสร้าง ระดับนาโนเมตรที่อยู่ในบริเวณที่มีแถบพลังงานกว้าง พาหะที่ถูกขังจะมีพลังงานสูง และด้วยเหตุนี้ โครงสร้างแถบพลังงานของนาโนพอร์สซิลิกอน จึงมีความแตกต่างกับบัลค์ซิลิกอน(bulk silicon) โดยอาศัยแบบจำลองผลึก 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

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

เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.10) ด้วยมวลประสิทธิผลจากสมการที่ (2.8) เราสามารถหาพลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่เหนือขอบต่ำสุดของแถบความนำ ที่  $k$  ใดๆ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$E_c$  คือ ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำ

$m_e^*$  คือ มวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอน

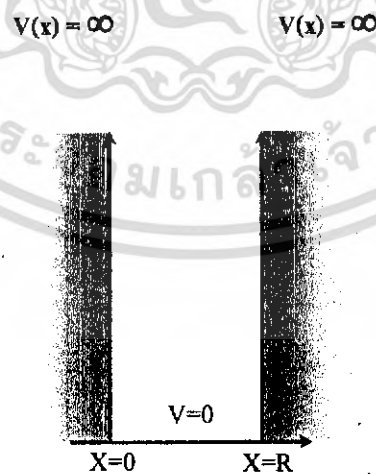
เช่นเดียวกัน เราสามารถหาพลังงานของโฮล ที่อยู่ต่ำกว่าขอบสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ที่  $k$  ใด ๆ ได้ ดังนี้

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

$E_v$  คือ ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำ

$m_h^*$  คือ มวลประสิทธิผลของโฮล

เมื่อพิจารณาที่พื้นผิวของนาโนพอร์สซิลิกอน จะประกอบด้วยโครงสร้างที่ลดขนาดลงของผลึกซิลิกอนจนอยู่ในระดับนาโนเมตร โดยอาศัยทฤษฎีบ่อควอนตัม ในกรณีที่เป็นบ่อศักย์สูงอนันต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



**รูปที่ 2.8** แสดงบ่อศักย์สี่เหลี่ยมสูงอนันต์ (Infinite Square well potential)

ในกรณีของบ่อควอนตัมกว้าง  $R$  มีความสูงอนันต์จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

พิจารณาที่  $n = 1$  จะได้ว่า

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

เมื่อนำสมการที่ (2.11) ลบด้วยสมการที่ (2.12) จะได้

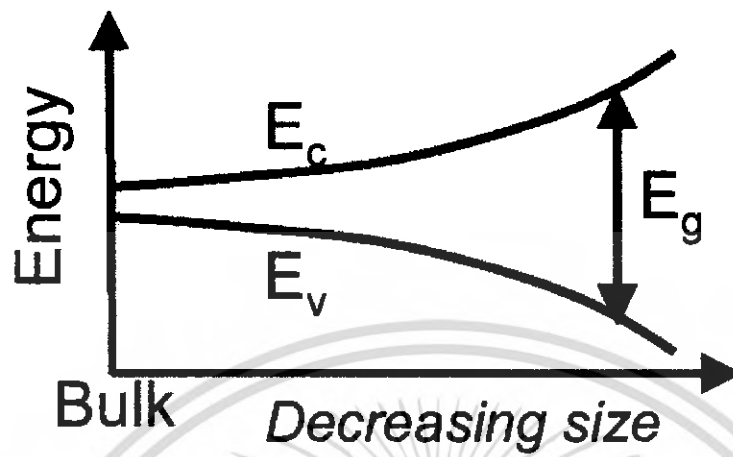
$$E_{g,PS} = E_{g,bulk} + \frac{\hbar^2 k^2}{2} \left( \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (2.15)$$

ยกกำลังสองสมการที่(2.14) แล้วแทนลงในสมการที่(2.15) เราจะได้

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

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

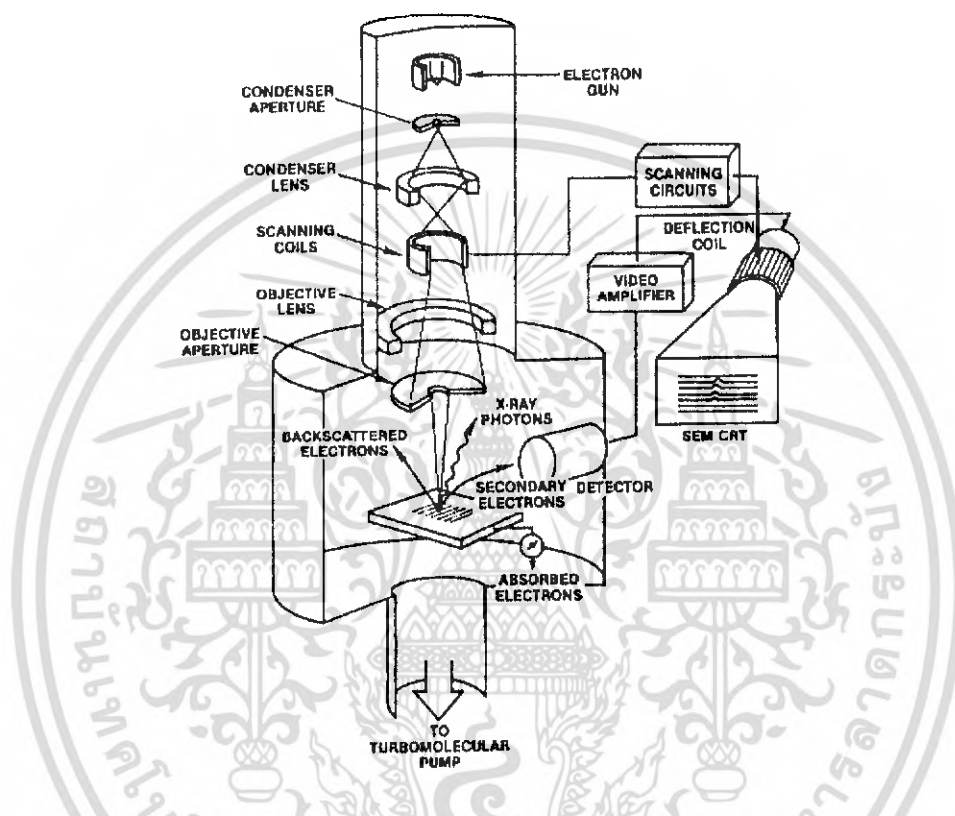
จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.16) สามารถนำมาเขียนกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.9 จากรูปแสดงให้เห็นว่า เมื่อขนาดของโครงสร้างผลึกลดลง ค่าแถบพลังงานต้องห้าม มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งเมื่อขนาดของ โครงสร้างผลึกลดลงจนถึงค่า ๆ หนึ่งจะเกิดการเปลี่ยนเฟส (Phase transition) จากโครงสร้างผลึก (Crystal) เป็นโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งไม่สามารถหาค่าความกว้างของแถบพลังงานต้องห้ามได้



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของขนาดเม็ดผลึก กับค่าแถบพลังงานต้องห้าม

## 2.4 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์

### 2.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด



รูปที่ 2.10 องค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่าง โดยตรวจสอบได้จาก การยิงลำอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแล้วแสดงผลบนจอหลอดรังสีแคโทด (cathode ray tube; CRT) มีลักษณะของภาพเป็นภาพขาวดำ มีกำลังขยาย 10 – 300,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง หลักการทำงานคือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับสารตัวอย่างทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron : SE) และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector) นำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอ CRT การทำงานของกล้อง SEM เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนเรียกว่า แคโทด (Cathode) เนื่องจากเป็นขั้วลบ ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูงในช่วง 1 – 40 keV พร้อมทั้งบีบกลุ่มอิเล็กตรอนให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดยระบบของเลนส์เอกซารีนเป็นเอกซารีนที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอน (Electron lens) ซึ่งมี 2 ชนิด คือ เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) และเลนส์วัตถุ (Objective lens) ทำหน้าที่โฟกัสภาพ ขณะเดียวกันลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนผิวสารตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (Scanning coils) บนระนาบ  $x - y$  สิ่งสำคัญของการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด คือการเลือกสัญญาณจากอันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับอะตอมของสารตัวอย่างมาสร้างเป็นภาพ ความต่างจากผลของอันตรกิริยาคือชนิดของสารตัวอย่างขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของธาตุในเนื้อสารตัวอย่างและกระบวนการวัดสัญญาณด้วยตัวตรวจจับสัญญาณ แบบต่างๆ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ มีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่าง เนื่องจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดออกมาส่วนมากจะมาจากบริเวณผิวของสารตัวอย่าง สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron : PE) ถ่ายโอนพลังงานให้แก่อะตอมของสารตัวอย่าง บริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของสารตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนก็จะหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อีกทั้งสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิมีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของสารตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวสารตัวอย่าง โอกาสที่สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ จะหลุดออกมาจากชั้นความลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกดึงเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากบริเวณที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของสารตัวอย่างจะมีสัญญาณหลายชนิด ดังนั้นต้องเลือกสัญญาณเฉพาะที่ต้องการ ในกรณีของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าจากตัวตรวจจับสัญญาณ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งมีพลังงานต่ำจะเคลื่อนที่อยู่ในบริเวณผิวของสารตัวอย่างหลังจากสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิถูกดึงโดยสนามไฟฟ้าที่ถูกไบแอสไว้ สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณ scintillator ซึ่งทำมาจาก  $\text{CaF}_2$  และฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมบางทำหน้าที่เป็น collector ไบแอสศักย์ไฟฟ้าที่ 12 kV ซึ่งสนามไบแอสนี้จะเร่งให้สัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิเคลื่อนที่เข้าสู่ scintillator ทำให้เกิดสัญญาณแสง และจะถูกส่งไปตาม light guide เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วจึงทำการขยายสัญญาณ เพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอ CRT กล่าวคือเมื่ออิเล็กตรอนถูกบีบเป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของสารตัวอย่าง ลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุด scanning coils ซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กควบคุมการกราดของลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งการกราดบนผิวของสารตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่างๆ สัญญาณควบคุมการกราดบนพื้นผิวนี้อาจทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้น ในขณะเดียวกันสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณความมืดสว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกราดของลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์แบบ SEM เนื่องจากพื้นที่แสดงจอภาพ CRT โดกว่าพื้นที่การกราดบนผิวของสารตัวอย่าง โดยลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์ ดังนั้นจึงเกิดความสัมพันธ์ของกำลังขยายของภาพขึ้นดังนี้

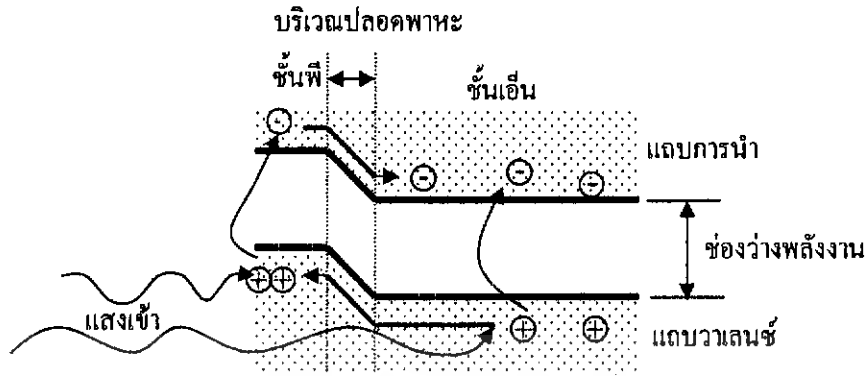
$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{พื้นที่บน CRT}}{\text{พื้นที่ของการกราดบนสารตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน}} \quad (2.17)$$

ชุดของ scanning coils นี้เป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน และนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย ซึ่งลักษณะความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพที่ออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกราดมีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าการใช้ความเร็วต่ำในการกราด

#### 2.4.2 โฟโตเคอร์เรนต์สเปกโทรสโคปี

โฟโตเคอร์เรนต์สเปกโทรสโคปี (Photocurrent spectroscopy; PC) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติทางแสงและไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นการวัดกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ รูปที่ 2.11 แสดงกลไกของขบวนการโฟโตเคอร์เรนต์จากรูปที่ 2.11 เมื่อแสงตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำ คู่อิเล็กตรอน-โฮล จะเกิดขึ้น เป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้า และเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไปจะส่งผลให้อิเล็กตรอน และโฮลต่างเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้าม เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าขึ้น ในการวิเคราะห์กระแสโฟโตเคอร์เรนต์ที่เกิดขึ้น จะเริ่มต้นจากอัตราการ recombination ซึ่งมีนิยามดังนี้

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



รูปที่ 2.11 โฟโตคอนดักทีวิตี ในสารกึ่งตัวนำ

เมื่อ  $\Delta n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น และ  $\tau$  คือ เวลาชีวิต(lifetime) ของพาหะ ส่วนเกิน ในกรณีที่ไม่มีแสง 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 ความหนาแน่นของพาหะ ส่วนเกินจะเท่ากันนั่นคือ  $\Delta n = \Delta p$  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 โฟโตคอนดักทีวิตี(Photoconductivity) มีนิยามดังนี้

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

ความหนาแน่นกระแสจะถูกกำหนดโดย

$$J = J_d + J_L = (\sigma_0 + \Delta\sigma)F_d \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $J_0$  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

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

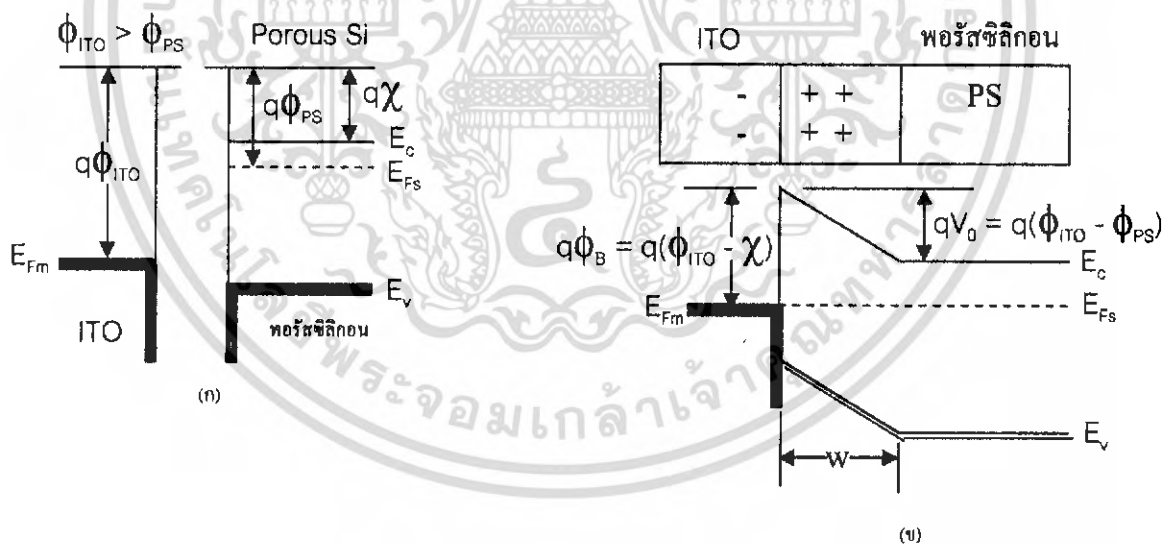
สมการนี้คือ กระแสโฟโตเคอร์เรนต์ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำที่ต่อเป็นอุปรกรณ์แล้ว

## 2.5 โครงสร้างและหลักการทํางานของตัวตรวจจับแสงพอร์สซิลิกอน

มีงานวิจัยได้รายงานไว้ว่า รอยต่อระหว่าง ทอง(Au)กับพอร์สซิลิกอน หรือ อินเดียมทินออกไซด์(ITO)กับพอร์สซิลิกอน แสดงพฤติกรรมเป็นแบบรอยต่อชอตต์กี(Schottky junction) ขณะที่ชั้นพอร์สซิลิกอนกับฐานรองซิลิกอน มีพฤติกรรมเป็นแบบรอยต่อเฮเทอโร (Heterojunction) ซึ่งลักษณะของแถบพลังงานแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 ด้วยเหตุนี้ตัวตรวจจับแสงนาโนพอร์สซิลิกอน จึงแสดงพฤติกรรมเป็นโฟโตไดโอด ชนิด ชอตต์กีแบเรียไดโอด(Schottky barrier diode) โดยที่ผิวสัมผัสแบบชอตต์กีแบเรีย จะพิจารณาที่ฟังก์ชันงาน(work function) โดยที่ อินเดียมทินออกไซด์มีฟังก์ชันงาน เท่ากับ 4.8 อิเล็กตรอนโวลท์ และพอร์สซิลิกอนมีฟังก์ชันงาน ประมาณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 อิเล็กตรอนโวลท์ ซึ่งมีหลักการดังนี้ ถ้าหากว่าประจุลบถูกนำมาใกล้ผิวของอินเดียมฯ ในอินเดียมจะเกิดประจุบวกซึ่งถูกเหนี่ยวนำขึ้น เมื่อแรงนี้รวมเข้ากับสนามไฟฟ้าซึ่งถูกใส่เข้ามาจะทำให้ค่าประสิทธิผลของฟังก์ชันงาน ลดต่ำลง การที่ค่าแรงลดต่ำลงเช่นนี้ เราเรียกว่า ปรากฏการณ์ชอตต์กี(Schottky effect) แต่ผิวสัมผัสแบบเรียงกระแสมีถูกเรียกว่า ไดโอดชอตต์กีแบบเรีย (Schottky barrier diode)

เมื่ออินเดียม ซึ่งมี ฟังก์ชันงาน เท่ากับ  $q\phi_{ITO}$  ถูกนำมาสัมผัสกับพอร์สซิลิกอนซึ่งมีฟังก์ชันงาน  $q\phi_{PS}$  การเคลื่อนย้ายประจุจะเกิดขึ้น จนกระทั่งระดับเฟอร์มิในสารทั้งสองเรียงตัวกันเป็นเส้นตรงที่สภาวะสมดุล ตามรูปที่ 2.12 ตัวอย่างเช่น เมื่อ  $\phi_{ITO} > \phi_{PS}$  ในขณะเริ่มแรกระดับเฟอร์มิในพอร์สซิลิกอนจะอยู่สูงกว่าในอินเดียมฯ(ก่อนการสัมผัส) เพื่อให้ระดับเฟอร์มิทั้งสองอยู่ในแนวเดียวกัน ศักย์ไฟฟ้าสถิตย์ในพอร์สซิลิกอนต้องถูกยกขึ้น(นั่นคือพลังงานอิเล็กตรอนจะลดลง) เมื่อเทียบกับของอินเดียมฯ ซึ่งจะทำให้เกิดย่านปลอดพาหะ W ขึ้นใกล้ๆ กับรอยต่อ ประจุบวกซึ่งเกิดจากอ็อนแบบผู้ให้ภายใน W จะเท่ากับประจุลบภายในอินเดียมฯ สนามไฟฟ้าและการโค้งงอของแถบพลังงานภายใน W จะคล้ายๆ กับในรอยต่อพี-เอ็น(PN junction)



รูปที่ 2.12 ชอตต์กีแบบเรียซึ่งเกิดจากการที่พอร์สซิลิกอนสัมผัสกับอินเดียมฯซึ่งมีค่าฟังก์ชันงานสูงกว่า

(ก) แผนภาพ พลังงานของอินเดียมและพอร์สซิลิกอนก่อนการต่อกัน

(ข) แผนภาพพลังงานของหัวต่อที่สภาวะสมดุล

ศักย์ไฟฟ้า  $V_0$  บริเวณผิวสัมผัสที่สภาวะสมดุล จะมีค่าเท่ากับผลต่างของฟังก์ชันงานของอินเดียมฯ กับพอร์สซิลิกอน ซึ่งจะทำหน้าที่หยุดการแพร่ของอิเล็กตรอนจากแถบการนำ (Conduction band) ในพอร์สซิลิกอน ไปยังอินเดียม ความสูงของกำแพงศักย์  $\phi_b$  ซึ่งกั้นการฉีดอิเล็กตรอนจากโลหะไปยังแถบการนำในพอร์สซิลิกอน มีค่าเท่ากับ  $\phi_{\text{ITO}} - \chi$  เมื่อ  $\chi$  เรียกว่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (Electron affinity) คือ ระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนใช้ในการย้ายอิเล็กตรอนจากบริเวณขอบล่างของแถบการนำไปยังระดับสูญญากาศ ค่า  $V_0$  อาจถูกเพิ่มหรือลดได้โดยการไบอัสย้อนหรือไบอัสตาม หรือเมื่อมีแสงมาตกกระทบ นั่นคือ ถ้ามีแสงมาตกกระทบที่พอร์สซิลิกอน คู่อิเล็กตรอน โฮล จะเกิดขึ้น โฮลจะเคลื่อนที่ไปสะสมที่บริเวณรอยต่อด้านอินเดียม ขณะที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางด้านพอร์สซิลิกอน จนกระทั่งพลังงานสะสมมีค่ามากกว่ากำแพงศักย์ โฮลก็จะข้ามไปทางด้านอินเดียมฯ เกิดเป็นสัญญาณไฟฟ้าขึ้น ซึ่งทำให้สามารถตรวจวัดแสงได้

## 2.6 สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน

(Internal Photoelectric Type Light Detector)

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน (Internal Photoelectric effect) ได้แก่การส่องแสงเข้าสู่วัสดุและกระตุ้นอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบเวเลนซ์ให้กระโดดขึ้นสู่แถบคอนดักชัน และกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (free electron หรือ conductive electrons) พลังงานโฟตอนของแสงต้องมีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานของวัสดุ

ชนิดโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic type) ได้แก่ การผลิตให้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมีรอยต่อ p-n (หรือ p-i-n) ซึ่งที่รอยต่อ p-n นี้จะมีศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in potential) เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและศักย์ไฟฟ้าภายในนี้จะพัดพาอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระที่เกิดจากแสงให้วิ่งออกไปสู่วงจรภายนอกทางด้านชั้น n และ p ได้ตามลำดับ พลังงานโฟตอนของแสงจะต้องมีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานของวัสดุจึงจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระ โครงสร้างเช่นนี้ทำให้สิ่งประดิษฐ์ที่ทำงานได้รวดเร็วและบางชนิดสามารถขยายสัญญาณได้ในตัว ตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์ที่ทำงานด้วยวิธีนี้ ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ โฟโตไดโอด โฟโตทรานซิสเตอร์ CCD สิ่งประดิษฐ์ตรวจวัดตำแหน่งของแสง (PSD) กล้องถ่ายภาพสัญญาณวิดีโอชนิดอิมเมจเซ็นเซอร์ (image sensor) และเซ็นเซอร์ตรวจวัดสีของแสง (color sensor) ฯลฯ เป็นต้น

### 2.6.1 ข้อพิจารณาในการใช้สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง

แสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสงหลายแสงมีการแทรกสอดกัน (Interference) และแสงเดินทางได้ด้วยความเร็วสูงมาก ในการใช้งานสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติต่างๆ หลายด้าน เช่น

- ความเข้มของแสงที่ตรวจรับ
- ความยาวคลื่นแสงที่จะถูกคลื่นได้
- ความเร็วการทำงานสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง
- เสถียรภาพและราคาของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง

พารามิเตอร์ที่ควรพิจารณาในการใช้สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

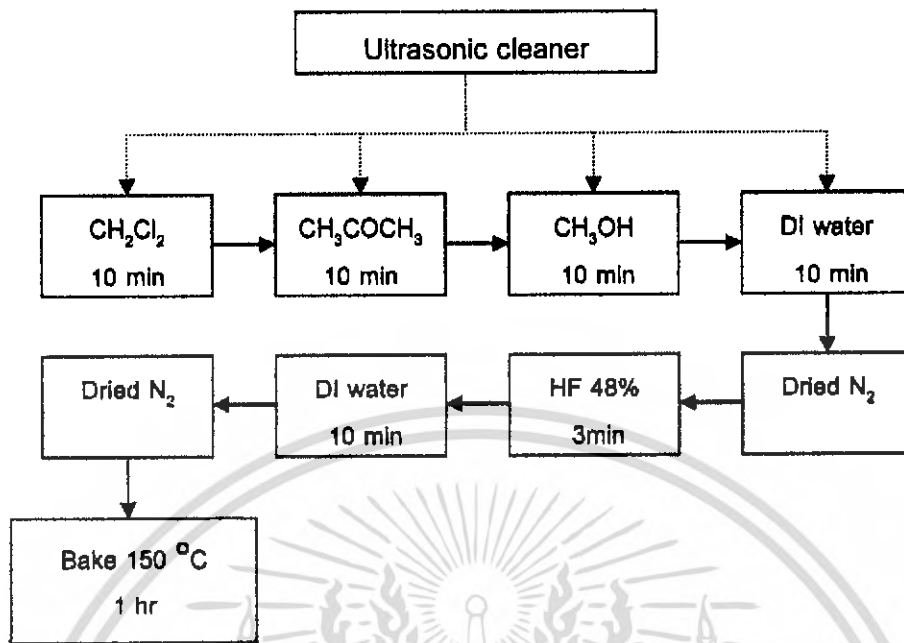
#### 3.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

รูปที่ 3.1 แสดงสารเคมีและเครื่องอัลตราโซนิก ที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน สำหรับแผ่นซิลิกอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะเป็นชนิดพี และมีขั้นตอนในการทำความสะอาด ตามขบวนการดังรูปที่ 3.2 โดยก่อนการทำความสะอาด 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 สารเคมีและเครื่องอัลตราโซนิกที่ใช้ในการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

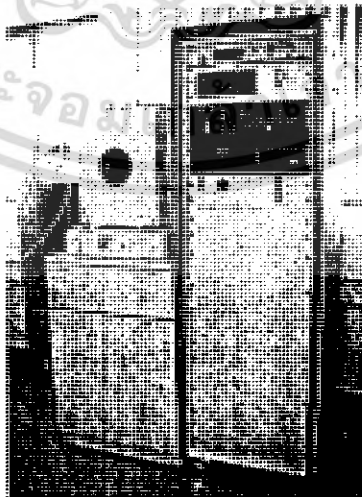
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอน

### 3.2 ขั้นตอนการปลูกซิลิกอน

ซิลิกอนที่ผ่านขั้นตอนการทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว จะถูกนำไปปลูกซิลิกอนเนียมด้านหลังความหนา 200 นาโนเมตร ด้วยระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (RF magnetron sputtering) ดังรูปที่ 3.3 เพื่อช่วยให้การฉีกกระแสในระหว่างขบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีดีขึ้น หลังจากนั้น จะถูกนำไปอบที่อุณหภูมิ 200 องศา เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ซิลิกอนเนียมยึดเกาะดียิ่งขึ้น

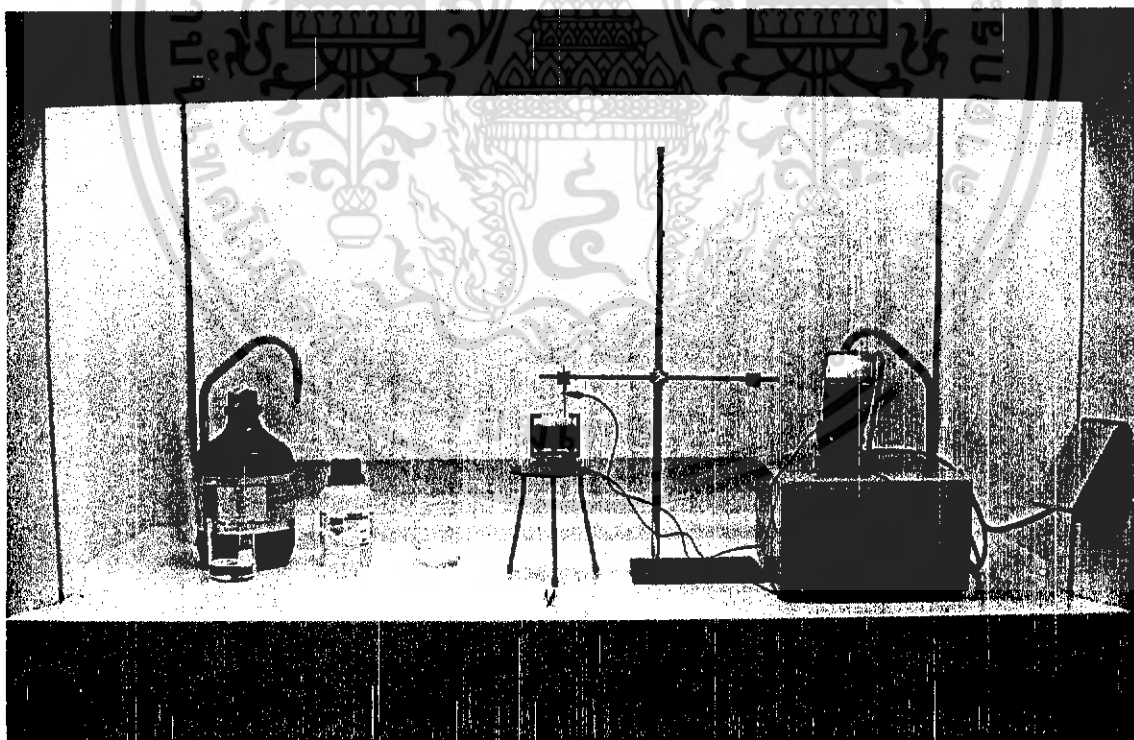


รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะของระบบ อาร์เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ขั้นตอนการสร้างชั้นพอร์สซิติคอน

รูปที่ 3.4 แสดงภาพการจัดอุปกรณ์ เพื่อทำการทดลองการสร้างชั้นพอร์สซิติคอนด้วยการกัดทางไฟฟ้าเคมี โดยวิธีการทดลองจะเริ่มจาก แผ่นซิติคอนที่ผ่านการปลูกข้าวลุมิเนียมแล้ว จะถูกตัดออกเป็นชิ้นมีพื้นที่ประมาณ  $1.5 \times 1.5$  ตารางเซนติเมตร ซิติคอนที่ถูกตัดเป็นชิ้นแล้ว จะถูกนำไปใส่ในไว้ในระบบดังรูปที่ 3.5 เดิมสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเป็นสารผสมระหว่าง กรดไฮโดรฟลูออริก(HF 48%):เอทานอล:น้ำDI ในอัตราส่วนผสม 1:2:1 โดยปริมาตร ขั้วลบจะใช้ลวดทองแดงขดเป็นแบบก้นหอย เพื่อให้ฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการลอยออกมาได้ และมีขั้วลุมิเนียมเป็นขั้วบวก ภาชนะบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเป็นเทฟลอน (Teflon) ซึ่งสามารถทนกรดได้ เจือไนซ์ที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์สซิติคอนจะเป็นคังตารางที่ 1 หลังจากเสร็จสิ้นการสร้างชั้นพอร์สซิติคอนแล้ว พอร์สซิติคอนจะถูกนำไปล้างด้วยน้ำไร้ประจุ ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจะนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศา เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

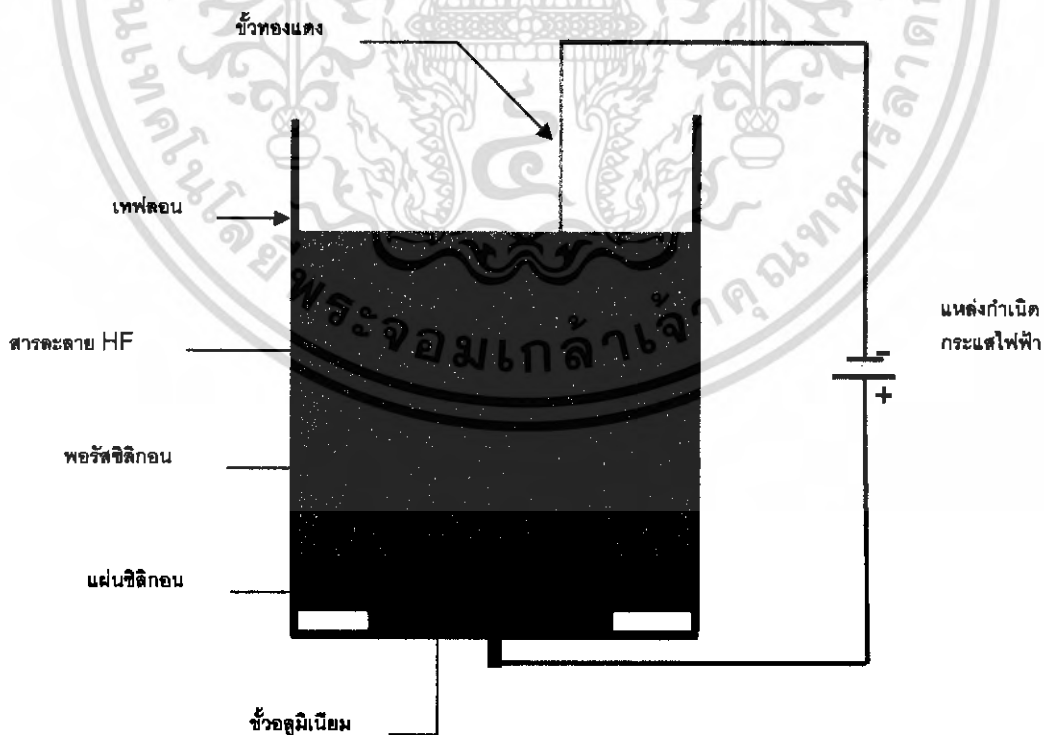


รูปที่ 3.4 แสดงการจัดอุปกรณ์และเครื่องมือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างชั้นพอร์ซซิลิกอน

ความหนาแน่น กระแส(mA/cm <sup>2</sup> )	กระแส (A)	เวลาที่ใช้ในการกัด (min)
200	0.19	5
200	0.19	8
200	0.19	10
200	0.19	15
ความหนาแน่น กระแส(mA/cm <sup>2</sup> )	กระแส (A)	เวลาที่ใช้ในการกัด (min)
400	0.38	5
400	0.38	8
400	0.38	10
400	0.38	15



รูปที่ 3.5 ระบบการกัดทางไฟฟ้าเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

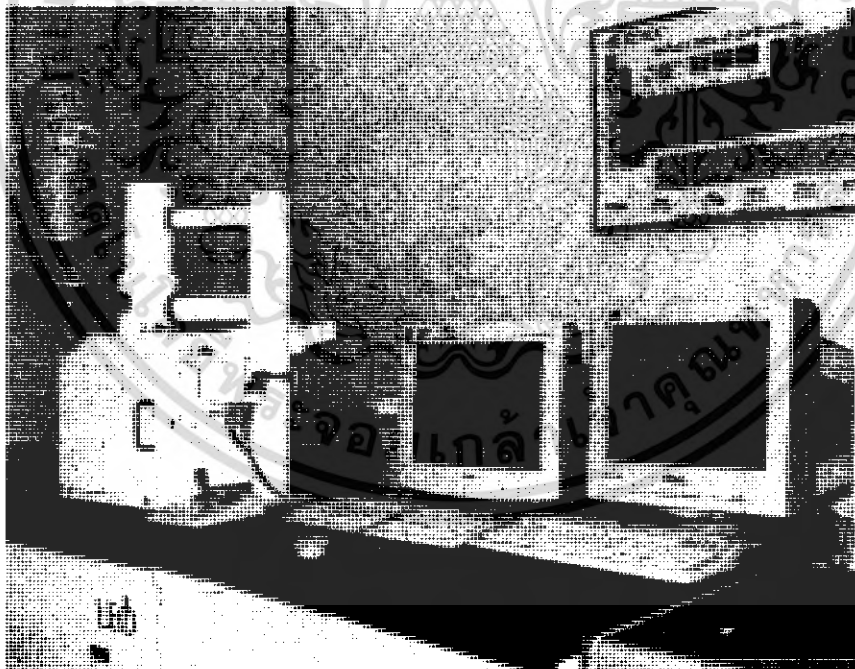
### 3.4 ขั้นตอนการประดิษฐ์ตัวตรวจรับแสงนาโนพอร์สซิลิกอน

นาโนพอร์สซิลิกอนที่ได้จากการสร้างตามขั้นตอน จะถูกนำมาประยุกต์ใช้สร้างเป็นตัวตรวจรับแสง และจะทำการปลุกขั้วไฟฟ้า คือ อินเดียมทินออกไซด์ที่มีความหนา 200 นาโนเมตร จากนั้นทำการต่อขั้วสำหรับการวัดค่าการตอบสนองต่างๆ

### 3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์

#### 3.5.1 การวิเคราะห์พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

ในการวิเคราะห์พื้นผิว จะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด ของบริษัท LEO รุ่น 1455 VP เป็นเครื่องมือในการตรวจสอบชั้นพอร์สซิลิกอน โดยจะทำการตรวจสอบผิวด้านหน้าของตัวอย่าง

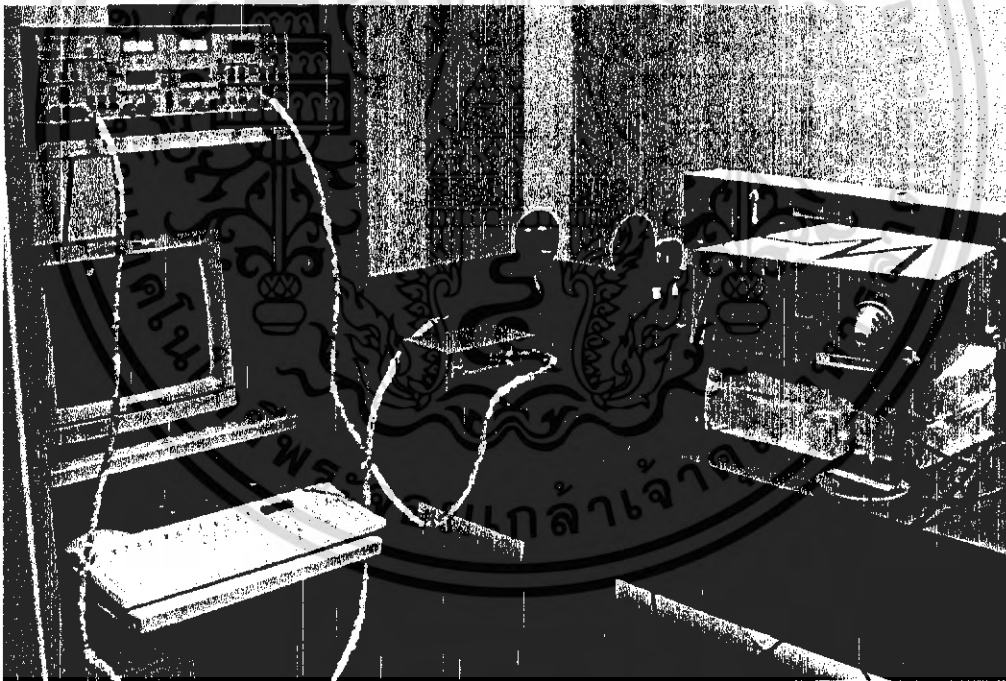


รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

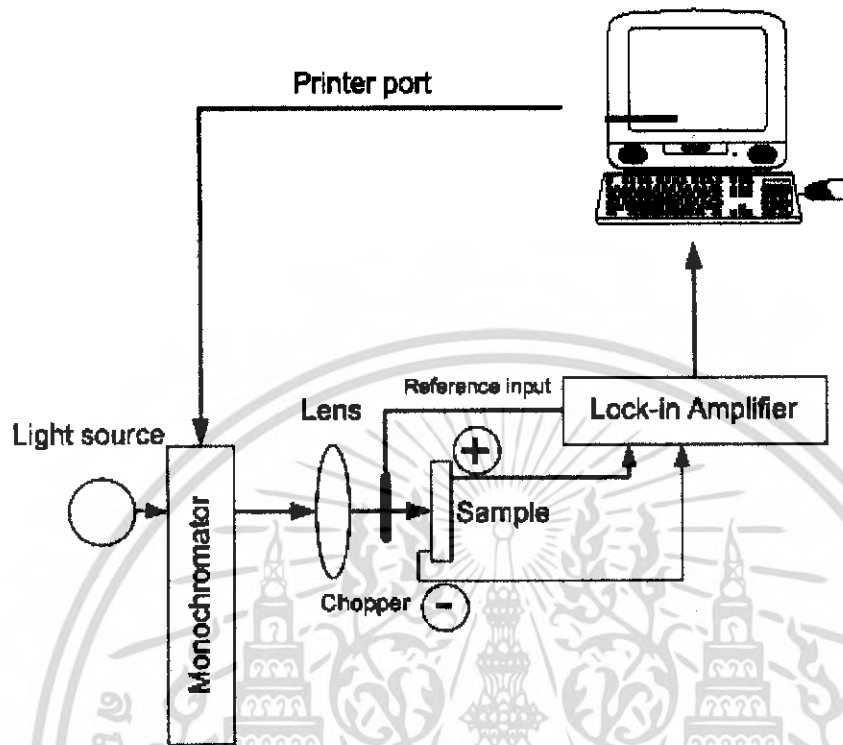
### 3.5.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยระบบวัดโฟโตเคอร์เรนซ์

ก่อนที่จะทำการวัดคุณสมบัติทางแสงของพอร์สซิลิกอน เราจะทำการปลูกชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (Indium Tin Oxide; ITO) ความหนา 200 นาโนเมตร ลงบนผิวหน้าของพอร์สซิลิกอน ด้วยระบบ อาร์เอฟแมกนีตรอน สปีดเตอริง รูปที่ 3.7 แสดงการจัดอุปกรณ์และเครื่องมือ ของระบบโฟโตเคอร์เรนซ์ โดยจะใช้แสงจากหลอดทังสเตน ส่งไปยังโมโนโครมาเตอร์ (monochromatic) ความยาวคลื่นจะถูกเลือก โดยการควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ แสงที่ผ่าน โมโนโครมาเตอร์ จะผ่านชอปเปอร์ (chopper) ซึ่งแสงจะถูกตัดเป็นสัญญาณพัลส์ (pulse) หลังจากนั้นจะตกกระทบอุปกรณ์ที่ต้องการวัด กระแสโฟโตเคอร์เรนซ์ที่เกิดขึ้น จากภายในอุปกรณ์ จะถูกวัดและขยายสัญญาณ โดย ล็อกอินแอมพลิฟาย (Lock – in Amplifier) ก่อนถูกบันทึกค่าลงในคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ผลต่อไป รายละเอียดแสดงไว้ในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 การจัดอุปกรณ์ ในการวัด โฟโตเคอร์เรนซ์

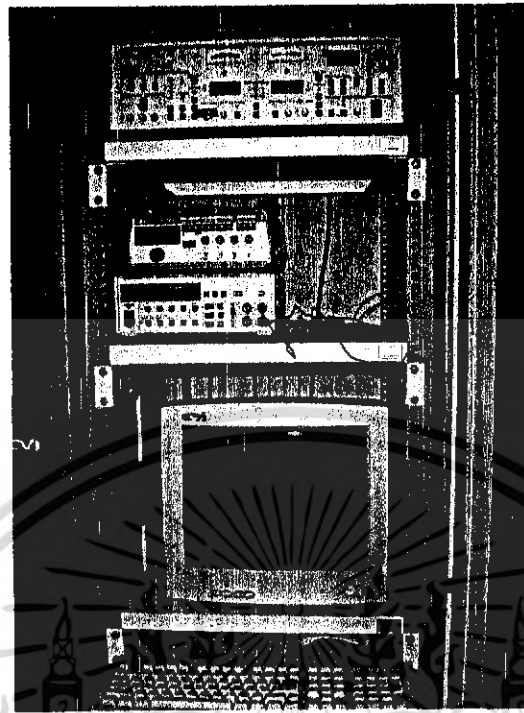
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



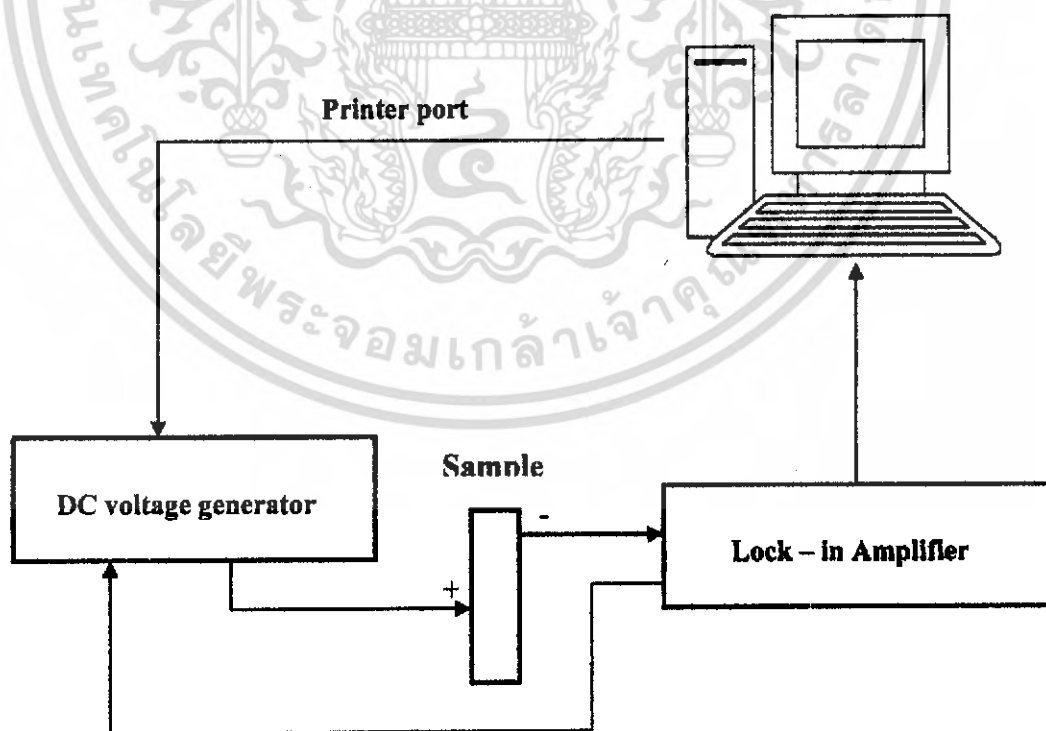
รูปที่ 3.8 แผนภาพแสดงไดอะแกรมระบบวัดโฟโตเคอร์เรนต์

### 3.5.3 การวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าต่อแรงดันไฟฟ้า (IV)

โดยจะทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับพอร์สซิลิกอนที่ทำการปลูกชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (Indium Tin Oxide; ITO) แล้วทำการวัดกระแสที่เกิดขึ้นโดยระบบนี้จะประกอบด้วย DC voltage generator เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับพอร์สซิลิกอนซึ่งถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์จากนั้นจะถูกวัดและขยายสัญญาณโดย ล็อกอินแอมพลิฟาย (Lock - in Amplifier) ก่อนถูกบันทึกค่าลงในคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ผลต่อไป



รูปที่ 3.9 การจัดอุปกรณ์ ในวัดการการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้า (IV)



รูปที่ 3.10 แผนภาพแสดง โค้ดแกรมระบบวัดการการตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้า (IV)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

หลังจากการสร้างชั้นพอร์ซลิคอนด้วยการกัดทางไฟฟ้าเคมี ได้ตัวอย่างพอร์ซจำนวน 7 ตัวอย่างดังนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงตัวอย่างตามเงื่อนไขที่ใช้สร้างชั้นพอร์ซลิคอน

ตัวอย่างที่	ความหนาแน่นกระแส(mA/cm <sup>2</sup> )	กระแส (A)	เวลาที่ใช้ในการกัด(min)
1	200	0.19	8
2	200	0.19	10
3	200	0.19	15
ตัวอย่างที่	ความหนาแน่นกระแส(mA/cm <sup>2</sup> )	กระแส (A)	เวลาที่ใช้ในการกัด(min)
4	400	0.38	5
5	400	0.38	8
6	400	0.38	10
7	400	0.38	15

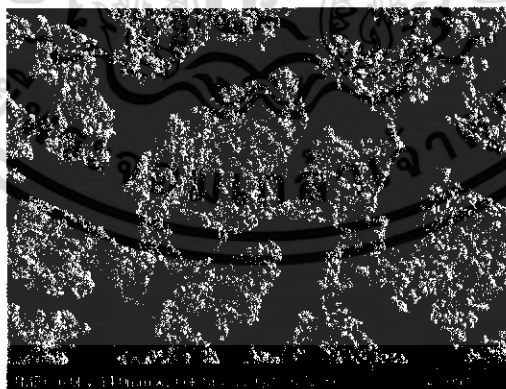
หมายเหตุ : ที่ความหนาแน่นกระแส 200 mA/cm<sup>2</sup> ใช้เวลากัด 5 นาทีการเปลี่ยนแปลงมองเห็นได้ไม่ชัดเจนจึงเริ่มกัดที่ 8 นาที

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์พื้นผิวจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อน

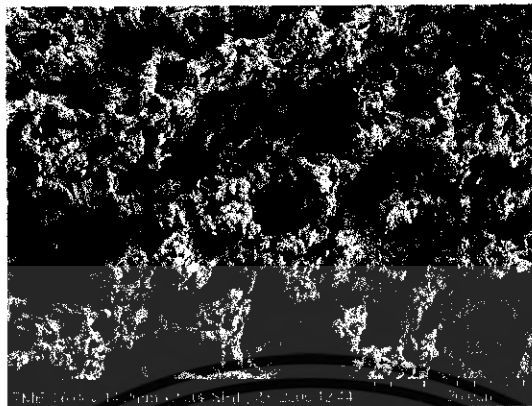
##### กราดของพอร์ซซิติกอนที่ได้จากกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า

รูปที่ 4.1 – 4.7 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด ของพอร์ซซิติกอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดกระแส จากรูปทั้งหมดจะเห็นว่า ลักษณะของพื้นผิวของซิติกอนมีลักษณะแตกต่างกัน เกิดความไม่สม่ำเสมอของรูพรุน ซึ่งเป็นผลมาจากในระบบการกัดเกิดออกซิเจนขึ้น(ขณะการกัดจะสังเกตเห็นฟองอากาศได้) ออกซิเจนจะส่งผลทำให้เกิดการฟอร์มตัวของออกไซด์ที่ผิวหน้าของซิติกอน สนามไฟฟ้าที่บริเวณนั้นขาดหาย ทำให้ไม่เกิดไฮโดรเจนในสารละลาย ไฮโดรฟลูออริก-น้ำ(HF-H<sub>2</sub>O) ไม่สามารถจับพันธะกับอะตอมของซิติกอนได้ตำแหน่งที่เกิดออกไซด์นั้นก็จะไม่เกิดรูพรุน แต่เมื่อเวลาผ่านไปออกไซด์ที่เกิดจะถูกทำลายได้ด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออริก และบริเวณนั้นก็สามารถเกิดรูพรุนได้

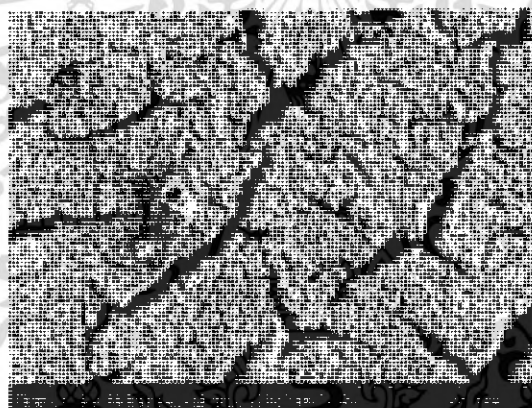
จากรูปทั้งหมด(รูปที่ 4.1 – 4.7) จะเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้กัดและความหนาแน่นของกระแสที่ใช้มีผลต่อลักษณะและขนาดของรูพรุนที่เกิดขึ้น โดยรูปที่ 4.1-4.3 ใช้ความหนาแน่นของกระแสเท่ากันที่ 200 mA/cm<sup>2</sup> ใช้เวลา 8, 10, 15 นาที รูปที่ 4.4 -4.7ใช้ความหนาแน่นของกระแสเท่ากันที่ 400 mA/cm<sup>2</sup> ใช้เวลา 5, 8, 10, 15 นาที ซึ่งคุณสมบัติทางแสงของพอร์ซที่มีลักษณะและขนาดรูพรุนต่างกันจะสามารถศึกษาได้ในผลการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายด้านบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ 1  
เวลาที่ใช้ในการกัด 8 นาที ความหนาแน่นกระแส 200 mA/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายด้านบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ 2  
เวลาที่ใช้ในการกัก 10 นาที ความหนาแน่นกระแส  $200 \text{ mA/cm}^2$



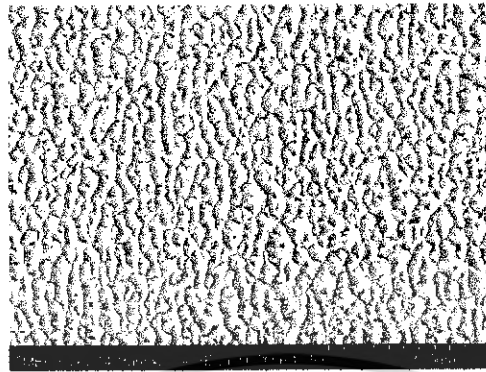
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายด้านบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ 3  
เวลาที่ใช้ในการกัก 15 นาที ความหนาแน่นกระแส  $200 \text{ mA/cm}^2$



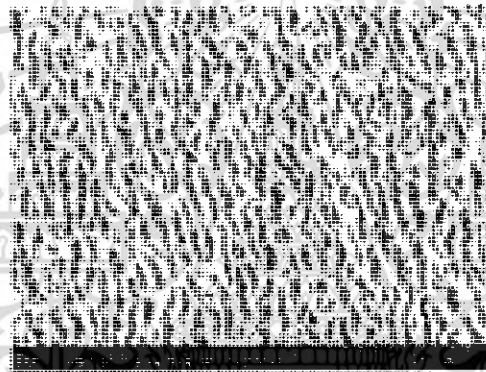
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายด้านบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ 4

เวลาที่ใช้ในการกัก 5 นาที ความหนาแน่นกระแส  $400 \text{ mA/cm}^2$

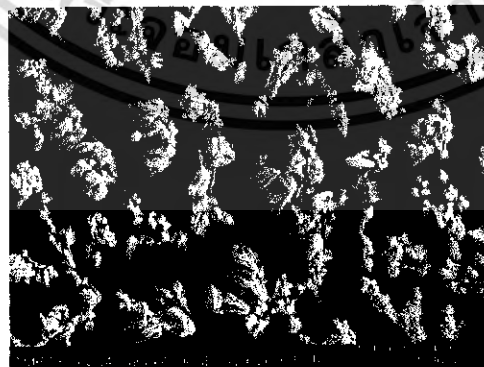
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 4.5** ภาพถ่ายด้านบนบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ 5  
เวลาที่ใช้ในการกัก 8 นาที ความหนาแน่นกระแส 400 mA/cm<sup>2</sup>



**รูปที่ 4.6** ภาพถ่ายด้านบนบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ 6  
เวลาที่ใช้ในการกัก 10 นาที ความหนาแน่นกระแส 400 mA/cm<sup>2</sup>

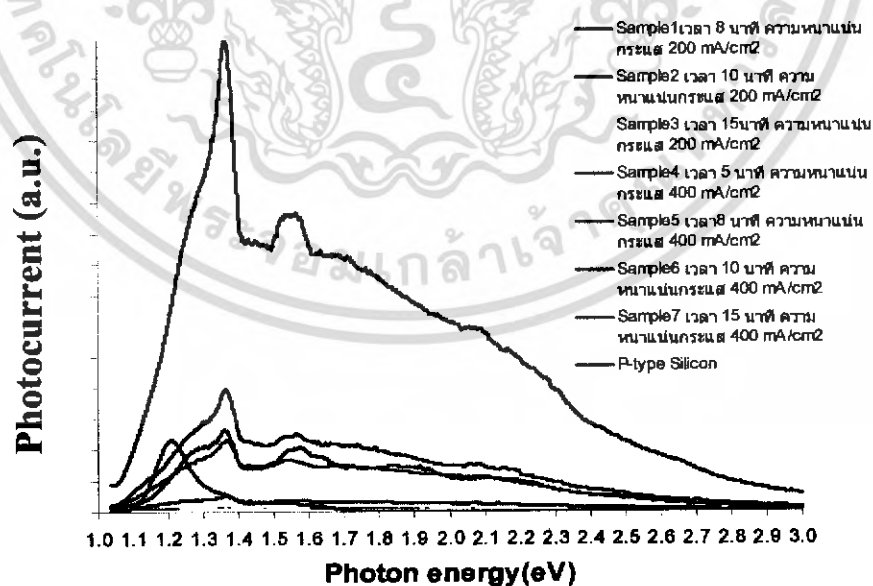


**รูปที่ 4.7** ภาพถ่ายด้านบนบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ 7  
เวลาที่ใช้ในการกัก 15 นาที ความหนาแน่นกระแส 400 mA/cm<sup>2</sup>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงด้วยระบบโฟโตเคอร์เรนต์ของพอร์สซิลิกอนที่ได้จากกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า

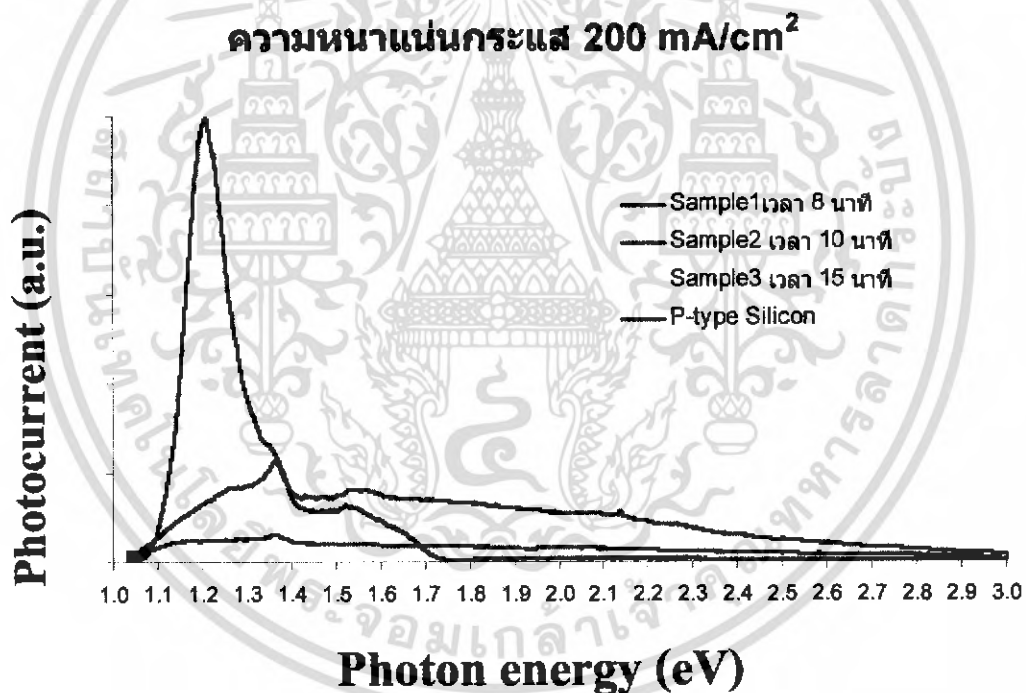
หลังจากการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนด้วยการกัดทางไฟฟ้าเคมีและทำการปลูกชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (Indium Tin Oxide; ITO) 200 นาโนเมตร ลงบนผิวหน้าของพอร์สซิลิกอน ด้วยระบบ อาร์เอฟแมกนีตรอน สปีดเคอริง แล้วทำการวัดคุณสมบัติทางแสงด้วยระบบโฟโตเคอร์เรนต์ของพอร์สซิลิกอนที่ได้จากกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าได้ผลดังนี้ รูปที่ 4.8 แสดงกราฟโฟโตเคอร์เรนต์ ของตัวอย่างที่ 1 - 7 โดยตัวอย่างที่ 1-3 ใช้ความหนาแน่นกระแส 200 mA/cm<sup>2</sup> เวลาในการกัดเป็น 8, 10, 15 นาทีตามลำดับ และตัวอย่างที่ 4-7 ใช้ความหนาแน่นกระแส 400 mA/cm<sup>2</sup> เวลาในการกัดเป็น 5, 8, 10, 15 นาทีตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวอย่างทุกตัวอย่างจะมีตอบสนองต่อพลังงานโฟตอนได้ตั้งแต่ 1.1 - 3.0 eV แต่ละตัวอย่างจะมีขดพิคสูงเด่นชัดสองพิค ที่ค่าพลังงานโฟตอน 1.38 eV และ 1.55 eV (โดยปกติแล้วซิลิกอนชนิดพีจะตอบสนองที่พลังงานโฟตอนประมาณ 1.2 eV ) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามแบบจำลองที่ได้อธิบายไว้ และที่มีสองค่าเนื่องจากความไม่เป็นหนึ่งเดียวกันของ โครงสร้างจากความไม่สม่ำเสมอของกระแสที่ใช้ระหว่างการกัด ตัวอย่างแต่ละตัวอย่างนั้นก็จะมี การตอบสนองต่อพลังงานโฟตอนให้กระแสโฟโตเคอร์เรนต์ที่ไม่เท่ากันซึ่งอาจเป็นผลมาจากลักษณะ ขนาดรูพรุนที่ต่างกัน และข้อสัมผัสระหว่างชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์กับพอร์สซิลิกอน



รูปที่ 4.8 กราฟโฟโตเคอร์เรนต์ ของตัวอย่างที่ 1 - 7 โดยตัวอย่างที่ 1-3 ใช้ความหนาแน่นกระแส 200 mA/cm<sup>2</sup> เวลาในการกัดเป็น 8, 10, 15 นาทีตามลำดับ และตัวอย่างที่ 4-7 ใช้ความหนาแน่นกระแส 400 mA/cm<sup>2</sup> เวลาในการกัดเป็น 5, 8, 10, 15 นาทีตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

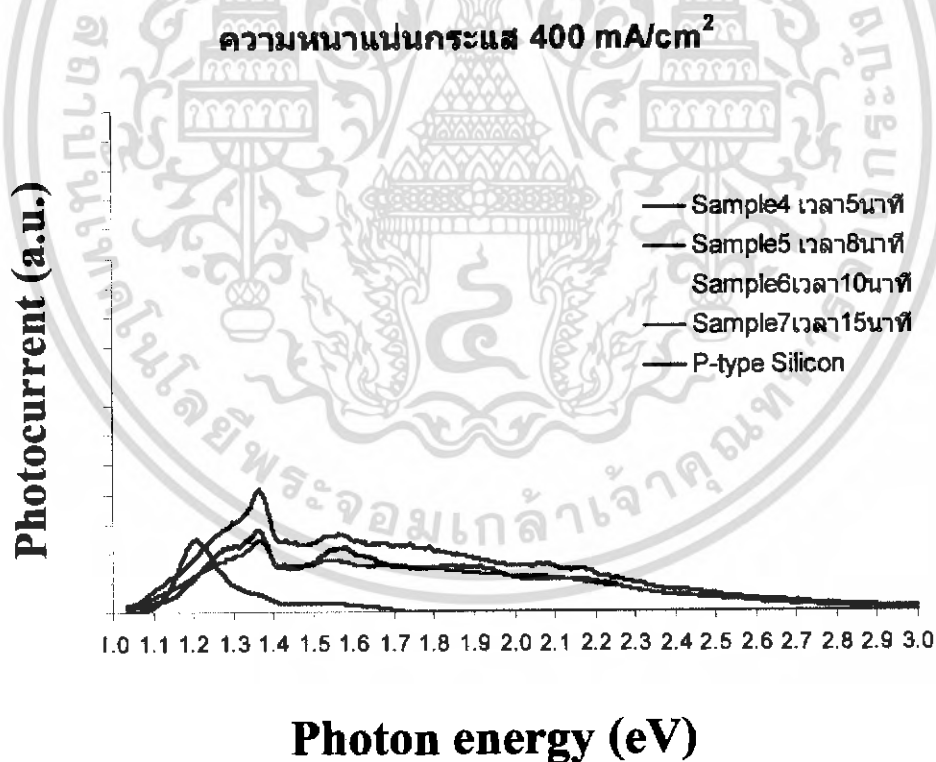
รูปที่ 4.9 แสดงกราฟโฟโตเคอร์เรนต์ ของตัวอย่างที่ 1-3 เปรียบเทียบเวลาในการกักที่ 8, 10 และ 15 นาทีตามลำดับโดยตัวอย่างทั้งสาม ใช้ความหนาแน่นกระแส  $200 \text{ mA/cm}^2$  เท่ากัน จะสังเกตเห็นได้ว่าตัวอย่างทั้งสามจะมีการตอบสนองต่อพลังงานโฟตอนได้ตั้งแต่ประมาณ 1.1 – 3.0 eV และแต่ละตัวอย่างจะมียอดฟิสิกสูงเด่นชัด 2 ฟิสิก ที่ค่าพลังงานโฟตอน 1.38 eV และ 1.55 eV โดยตัวอย่างที่ 1 จะให้กระแสโฟโตเคอร์เรนต์สูงกว่าตัวอย่างที่ 2 และ 3 ตามลำดับ แสดงว่าเวลาในการใช้กักมีผลต่อคุณสมบัติทางแสงของพอร์สในที่นี้อาจกล่าวได้ว่าที่เวลา 8 นาทีทำให้เกิดพอร์สที่มีคุณสมบัติทางแสงเด่นชัดกว่าที่เวลา 10 และ 15 นาที ในความหนาแน่นกระแสเท่ากันที่  $200 \text{ mA/cm}^2$  ซึ่งถ้าพิจารณาจากภาพถ่ายพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราดจะเห็นว่าตัวอย่างที่ 1 มีรูพรุนที่สม่ำเสมอกว่าเรียงตัวได้ดีกว่าตัวอย่างที่ 2 และ 3



รูปที่ 4.9 กราฟโฟโตเคอร์เรนต์ ของตัวอย่างที่ 1-3 โดยตัวอย่างทั้งสาม ใช้ความหนาแน่นกระแส  $200 \text{ mA/cm}^2$  เวลาในการกักเป็น 8, 10, 15 นาทีตามลำดับ

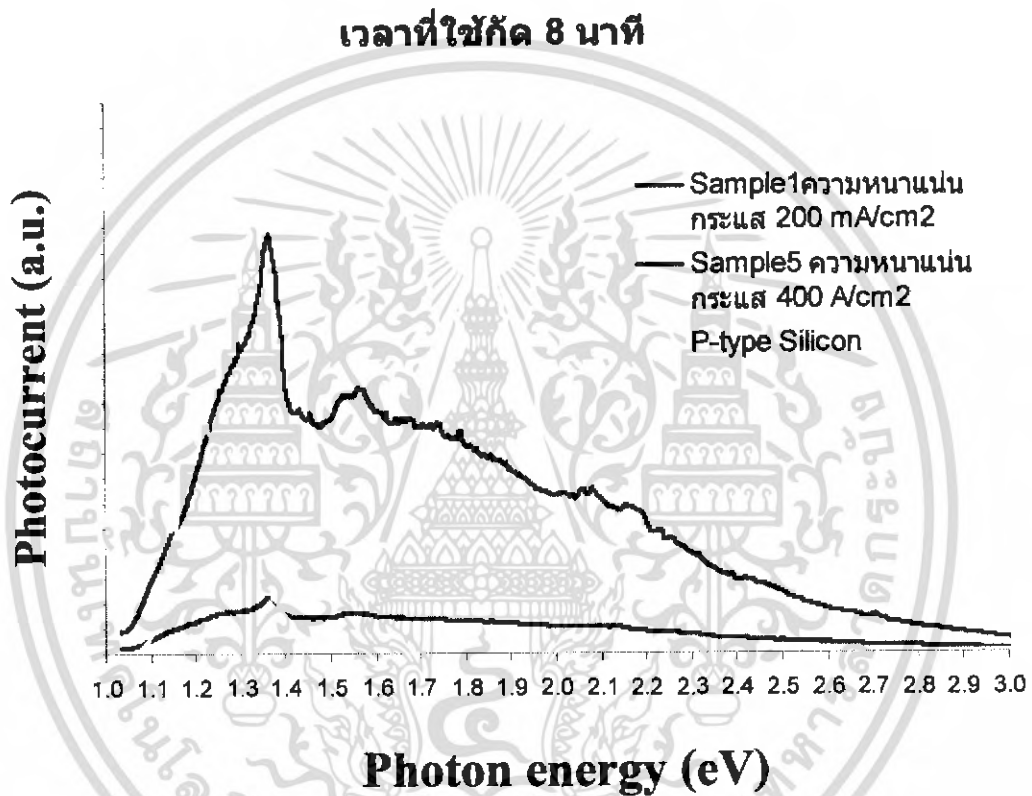
รูปที่ 4.10 แสดงกราฟโฟโตเคอร์เรนต์ ของตัวอย่างที่ 4-7 เปรียบเทียบเวลาในการกักที่ 5, 8, 10, 15 นาที ตามลำดับ โดยตัวอย่างทั้งสี่ ใช้ความหนาแน่นกระแส  $400 \text{ mA/cm}^2$  เท่ากันจะเห็นได้ว่า ตัวอย่างทั้งสามมีการตอบสนองต่อพลังงานโฟตอนได้ตั้งแต่ประมาณ 1.1 – 3.0 eV และแต่ละตัวอย่างจะมีขดพิกสูงเด่นชัด 2 พิก ที่ค่าพลังงานโฟตอน 1.38 eV และ 1.55 eV โดยตัวอย่างที่ 6 จะให้กระแสโฟโตเคอร์เรนต์สูงกว่าตัวอย่างที่ 4, 5 และ 7 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเวลาในการใช้กักมีผลต่อคุณสมบัติทางแสงของพอร์สในที่นี้อาจกล่าวได้ว่าที่เวลา 10 นาทีทำให้เกิดพอร์สที่มีคุณสมบัติทางแสงเด่นชัดกว่าที่เวลา 5, 8 และ 15 นาที ในความหนาแน่นกระแสเท่ากันที่  $400 \text{ mA/cm}^2$

จากรูปที่ 4.9 กับ รูปที่ 4.10 เมื่อเปรียบเทียบการตอบสนองต่อพลังงานโฟตอนจากค่ากระแสโฟโตเคอร์เรนต์แล้วตัวอย่างที่ใช้ความหนาแน่นกระแส  $400 \text{ mA/cm}^2$  จะมีค่ากระแสโฟโตเคอร์เรนต์ที่สูงกว่าตัวอย่างที่ใช้ความหนาแน่นกระแส  $200 \text{ mA/cm}^2$  โดยตัวอย่างที่ 6 ใช้เวลา 10 นาทีใช้ความหนาแน่นกระแส  $400 \text{ mA/cm}^2$  มีการตอบสนองให้ค่ากระแสโฟโตเคอร์เรนต์ที่สูงที่สุด



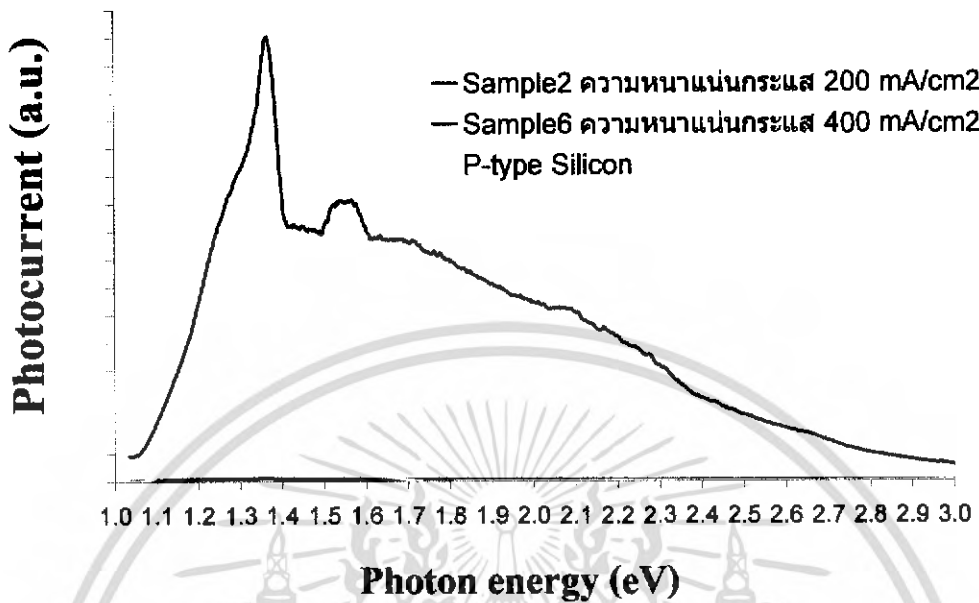
รูปที่ 4.10 กราฟโฟโตเคอร์เรนต์ ของตัวอย่างที่ 4-7 โดยตัวอย่างทั้งสี่ ใช้ความหนาแน่นกระแส  $400 \text{ mA/cm}^2$  เวลาในการกักเป็น 5, 8, 10, 15 นาที ตามลำดับ

รูปที่ 4.11 - 4.13 เป็นรูปภาพเปรียบเทียบความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการกัด 400 mA/cm<sup>2</sup> กับ 200 mA/cm<sup>2</sup> ที่เวลาเดียวกัน รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบ ที่เวลา 8 นาที รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบ ที่เวลา 10 นาที และรูปที่ 4.13 เปรียบเทียบ ที่เวลา 15 นาที โดยสรุปได้ว่า ความหนาแน่นกระแส 400 mA/cm<sup>2</sup> ที่ใช้กัดทำให้พอร์ซซิลิกอนมีการตอบสนองต่อพลังงานโฟตอนให้ค่ากระแสโฟโตเคอร์เรนท์มากกว่าความหนาแน่นกระแส 200 mA/cm<sup>2</sup>



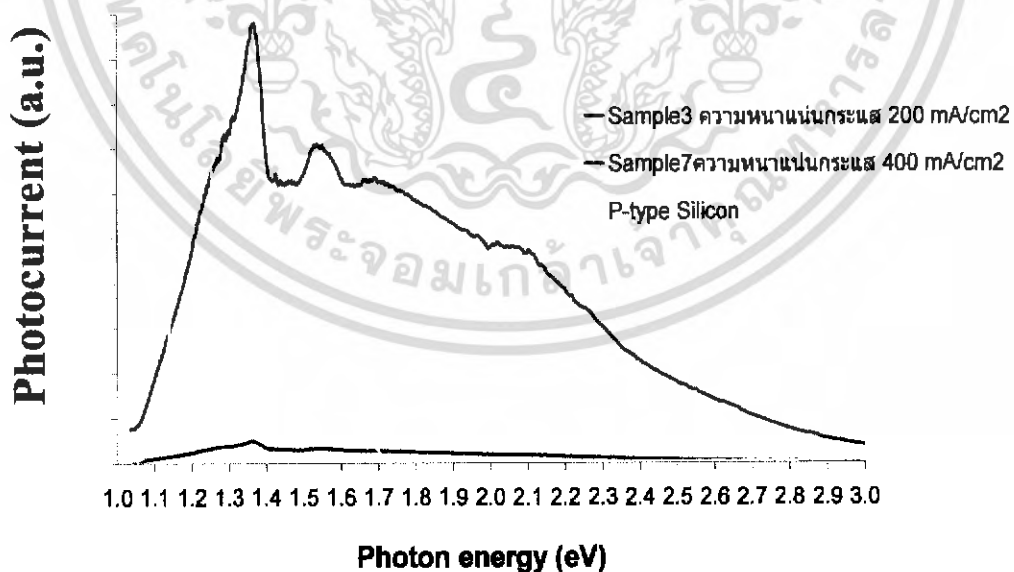
รูปที่ 4.11 กราฟโฟโตเคอร์เรนท์ เปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่ 1 ที่ใช้ความหนาแน่นกระแส 200 mA/cm<sup>2</sup> และตัวอย่างที่ 5 ใช้ความหนาแน่นกระแส 400 mA/cm<sup>2</sup> โดยใช้เวลากัดเท่ากันที่ 8 นาที

### เวลาที่ใช้กัด 10 นาที



รูปที่ 4.12 กราฟโฟโตเคอร์เรนต์ เปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่ 2 ที่ใช้ความหนาแน่นกระแส 200 mA/cm<sup>2</sup> และตัวอย่างที่ 6 ใช้ความหนาแน่นกระแส 400 mA/cm<sup>2</sup> โดยใช้เวลากัดเท่ากันที่ 10 นาที

### เวลาที่ใช้กัด 15 นาที

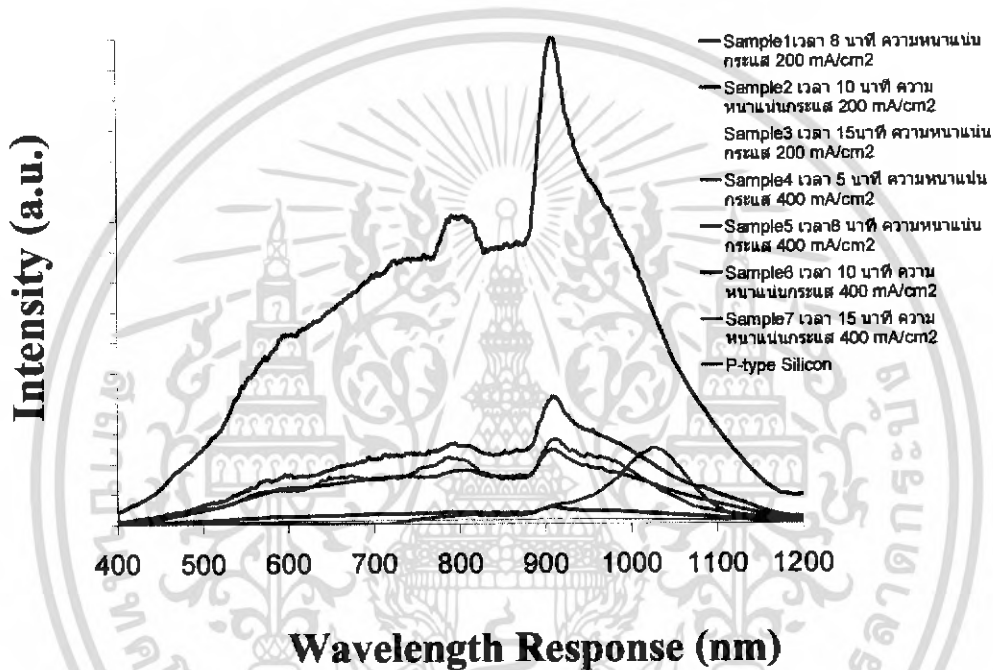


รูปที่ 4.13 กราฟโฟโตเคอร์เรนต์ เปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่ 3 ที่ใช้ความหนาแน่นกระแส 200 mA/cm<sup>2</sup> และตัวอย่างที่ 7 ใช้ความหนาแน่นกระแส 400 mA/cm<sup>2</sup> โดยใช้เวลากัดเท่ากันที่ 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

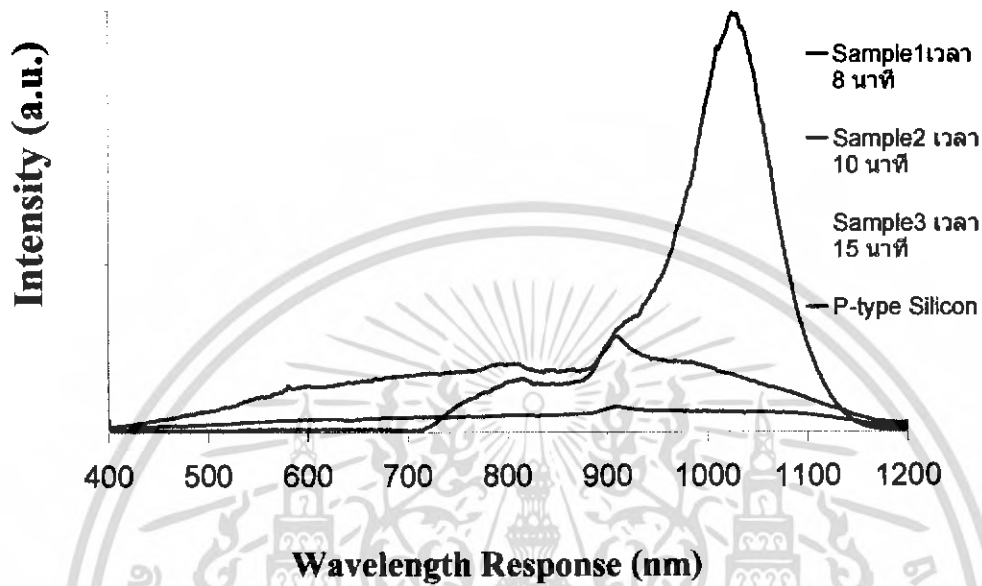
#### 4.3 ผลความยาวคลื่นที่ตอบสนองจากระบบวัดโฟโตเคอร์เรนต์

จากรูป 4.14 ถึงรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างทั้งหมดตอบสนองในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ ประมาณ 400 – 1200 นาโนเมตร และมีการตอบสนองที่ชัดเจนที่ความยาวคลื่น 800 และประมาณ 900 นาโนเมตร ซึ่งความยาวคลื่นที่ตอบสนองของซิลิกอนชนิดพีอยู่ที่ประมาณ 1050 นาโนเมตร



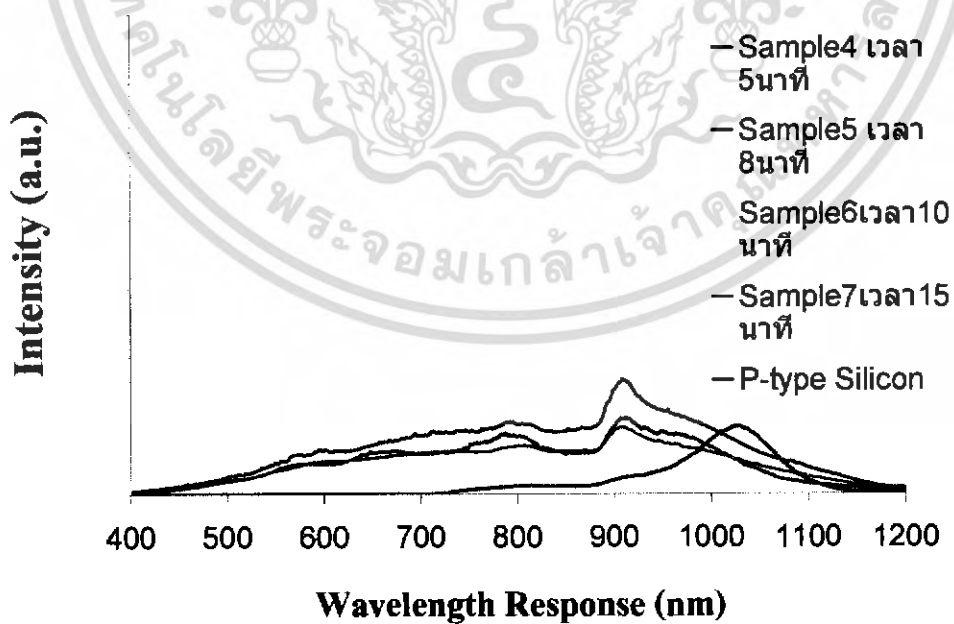
รูปที่ 4.14 ความยาวคลื่นที่ตอบสนองของตัวอย่างที่ 1-7 โดยตัวอย่างที่ 1-3 ใช้ความหนาแน่นกระแส 200 mA/cm<sup>2</sup> เวลาในการกัดเป็น 8, 10, 15 นาทีตามลำดับ และตัวอย่างที่ 4-7 ใช้ความหนาแน่นกระแส 400 mA/cm<sup>2</sup> เวลาในการกัดเป็น 5, 8, 10, 15 นาทีตามลำดับ

### ความหนาแน่นกระแส 200 mA/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 4.15 ความยาวคลื่นที่ตอบสนองของตัวอย่างที่ 1-3 โดยตัวอย่างทั้งสาม ใช้ความหนาแน่นกระแส 200 mA/cm<sup>2</sup> เวลาในการกักเป็น 8, 10, 15 นาทีตามลำดับ

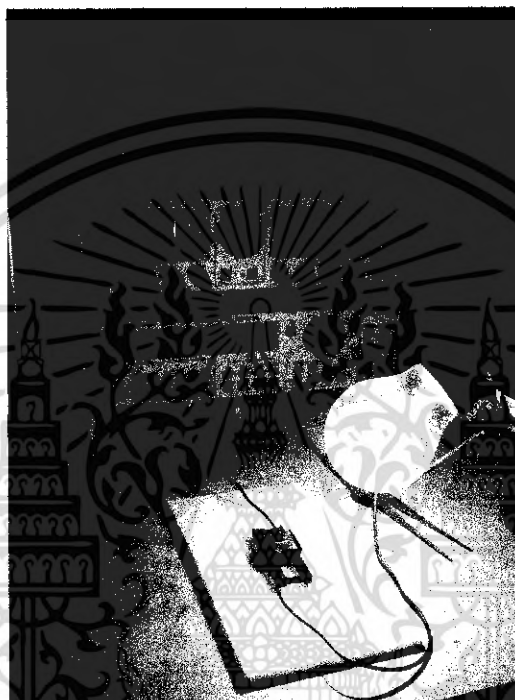
### ความหนาแน่นกระแส 400 mA/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 4.16 ความยาวคลื่นที่ตอบสนองของตัวอย่างที่ 4-7 โดยตัวอย่างทั้งสี่ ใช้ความหนาแน่นกระแส 400 mA/cm<sup>2</sup> เวลาในการกักเป็น 5, 8, 10, 15 นาที ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

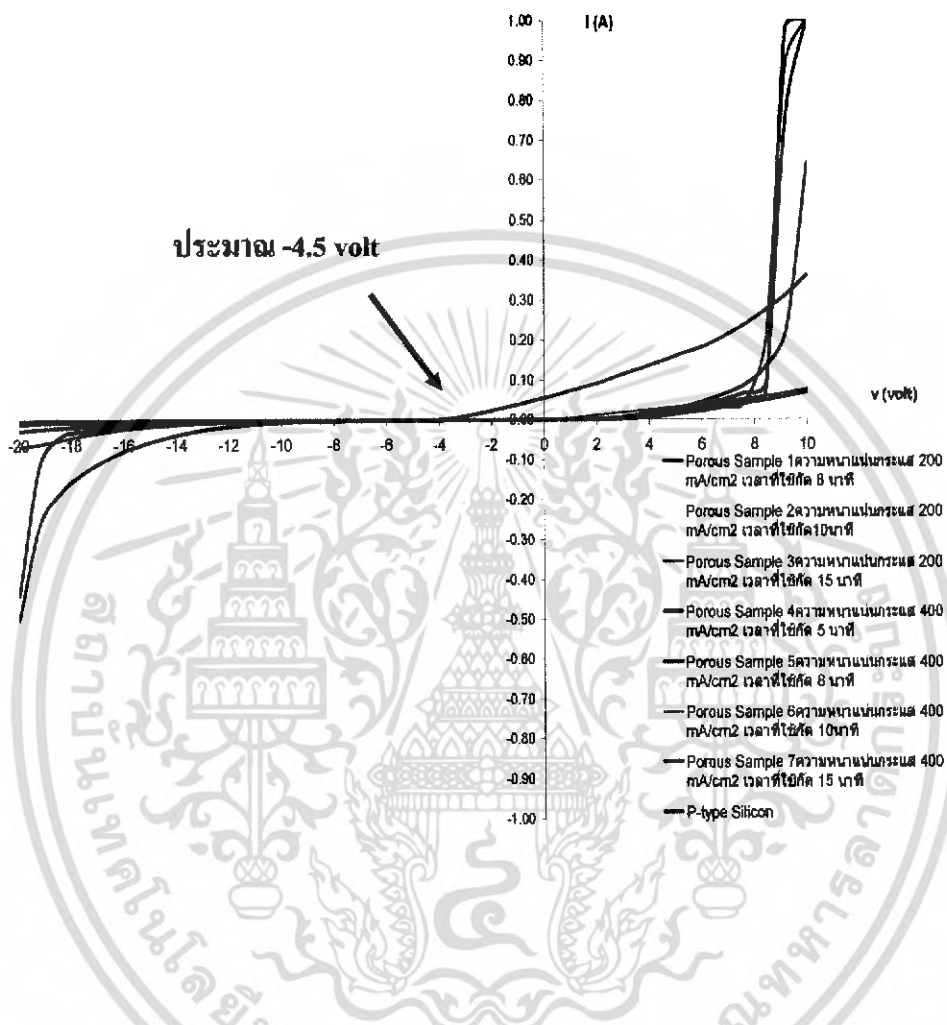
**4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติกระแส-แรงดัน (I-V Characteristics) ของพอร์สซิลิกอนที่ได้จากกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า**



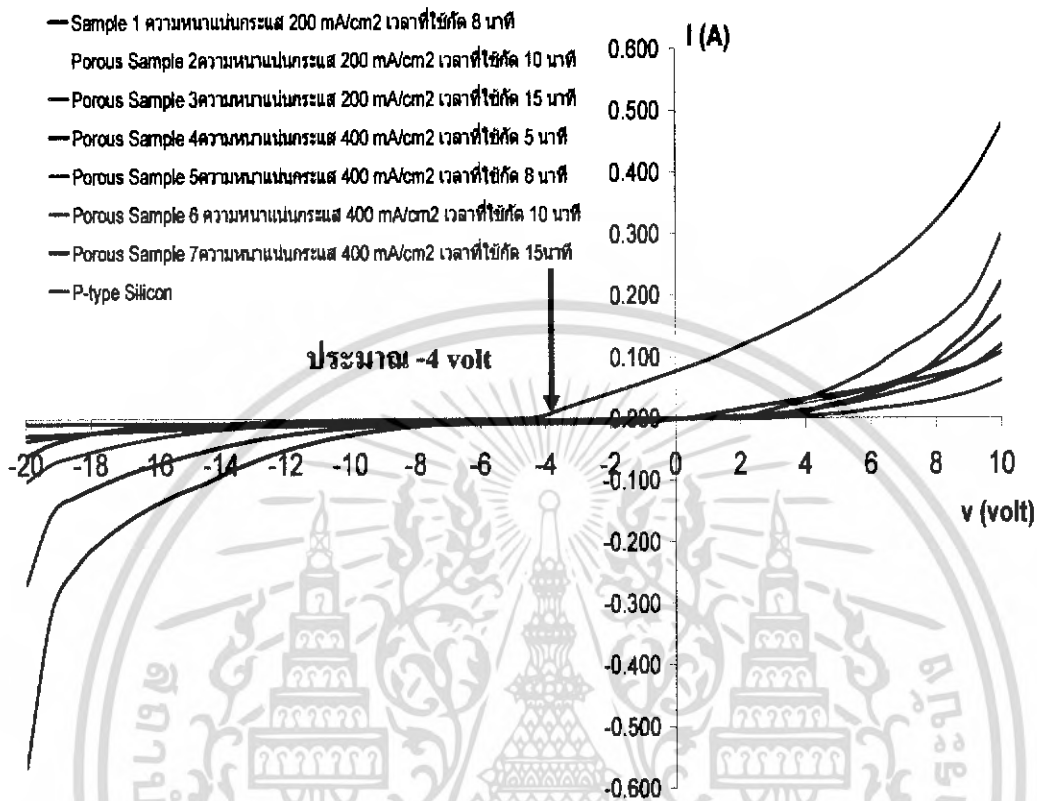
**รูปที่ 4.17** แสดงการวัดวิเคราะห์สมบัติกระแส-แรงดัน (I-V Characteristics) ของพอร์สซิลิกอนที่ได้จาก กระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าขณะอยู่ในแสงสว่างด้วยหลอดไฟทั้งสแตน กำลัง 100 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากการสร้างชั้นพอร์สซิติคอนด้วยการกัดทางไฟฟ้าเคมีและทำการปลูกชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (Indium Tin Oxide; ITO) 200 นาโนเมตร ลงบนผิวหน้าของพอร์สซิติคอนและซิติคอนชนิดพี ด้วยระบบ อาร์เอฟแมกนีตรอน สปีดเตอริง แล้วทำการวัดกระแสที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวอย่างทั้งในที่มืด และสว่างได้ผลดังนี้ จากกราฟรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่า ซิติคอนชนิดพีจะเริ่มมีการตอบสนองต่อแรงดันในด้านลบประมาณ  $-4.5$  volt ส่วนพอร์สซิติคอนนั้นส่วนใหญ่จะเริ่มตอบสนองต่อแรงดันในด้านบวกที่ประมาณ  $4$  volt จึงทำให้เกิดกระแสขึ้น รูปที่ 4.19 ตัวอย่างในแสงสว่างกำลัง  $100$  วัตต์ ทั้งซิติคอนชนิดพีและพอร์สซิติคอนเริ่มมีการตอบสนองต่อแรงดันได้เร็วขึ้นจากซิติคอนในที่มืดตอบสนองที่ประมาณ  $-4.5$  volt มาเป็น  $-4$  volt ในที่มีแสงสว่าง และแรงดันที่ป้อนให้พอร์สซิติคอนเพียงประมาณ  $2$  volt ก็ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.18 แล้วจะเห็นได้ว่าเมื่อป้อนแรงดันให้กับตัวอย่างแล้วตัวอย่างที่อยู่ในที่มืดต้องป้อนแรงดันมากกว่าตัวอย่างที่อยู่ในแสงสว่างกำลัง  $100$  วัตต์ จึงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้า อาจกล่าวได้ว่าแสงเป็นตัวช่วยกระตุ้นให้ตัวอย่างตอบสนองได้ดีมากขึ้น หรือตัวอย่างมีการตอบสนองต่อแสงนั่นเอง โดยสนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันที่ป้อนทำให้พาหะที่เกิดจากแสงซึ่งได้แก่ อิเล็กตรอน และ โฮลเคลื่อนที่ไปยังขั้วได้เร็วขึ้นก่อนที่จะเกิดการรวมตัวกัน นั่นคือปริมาณกระแสเพิ่มขึ้น เป็นลักษณะของโฟโตไดโอด คือเมื่อมีแสงสว่างจะทำให้เกิดกระแสขึ้น และกระแสที่ได้จะมีค่ามากกว่ากระแสในที่มืดด้วย โดยที่ตัวอย่างแต่ละตัวอย่างจะตอบสนองต่อแสงได้ต่างกันขึ้นกับความหนาแน่นกระแสที่ใช้กักและเวลาที่ใช้ด้วย



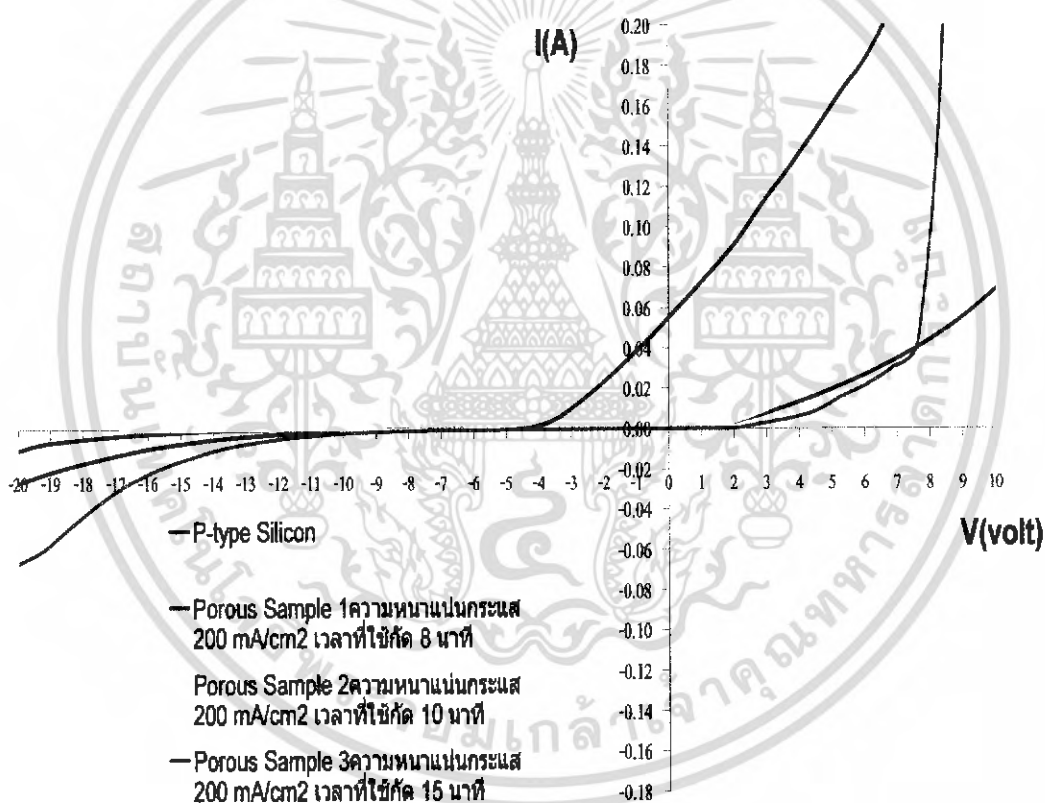
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสขณะอยู่ในที่มืด โดยตัวอย่างที่ 1-3 ใช้ความหนาแน่นกระแส 200 mA/cm<sup>2</sup> ใช้เวลากัก 8, 10, 15 นาทีตามลำดับ และตัวอย่างที่ 4-7 ใช้ความหนาแน่นกระแส 400 mA/cm<sup>2</sup> ใช้เวลากัก 5, 8, 10, 15 นาทีตามลำดับ



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าขณะอยู่ในที่สว่างด้วยหลอดไฟทั้งสแตน กำลัง 100 วัตต์ โดยตัวอย่างที่ 1-3 ใช้ความหนาแน่นกระแส 200 mA/cm<sup>2</sup> ใช้เวลากัด 8, 10, 15 นาทีตามลำดับและตัวอย่างที่ 4-7 ใช้ความหนาแน่นกระแส 400 mA/cm<sup>2</sup> ใช้เวลากัด 5, 8, 10, 15 นาทีตามลำดับ

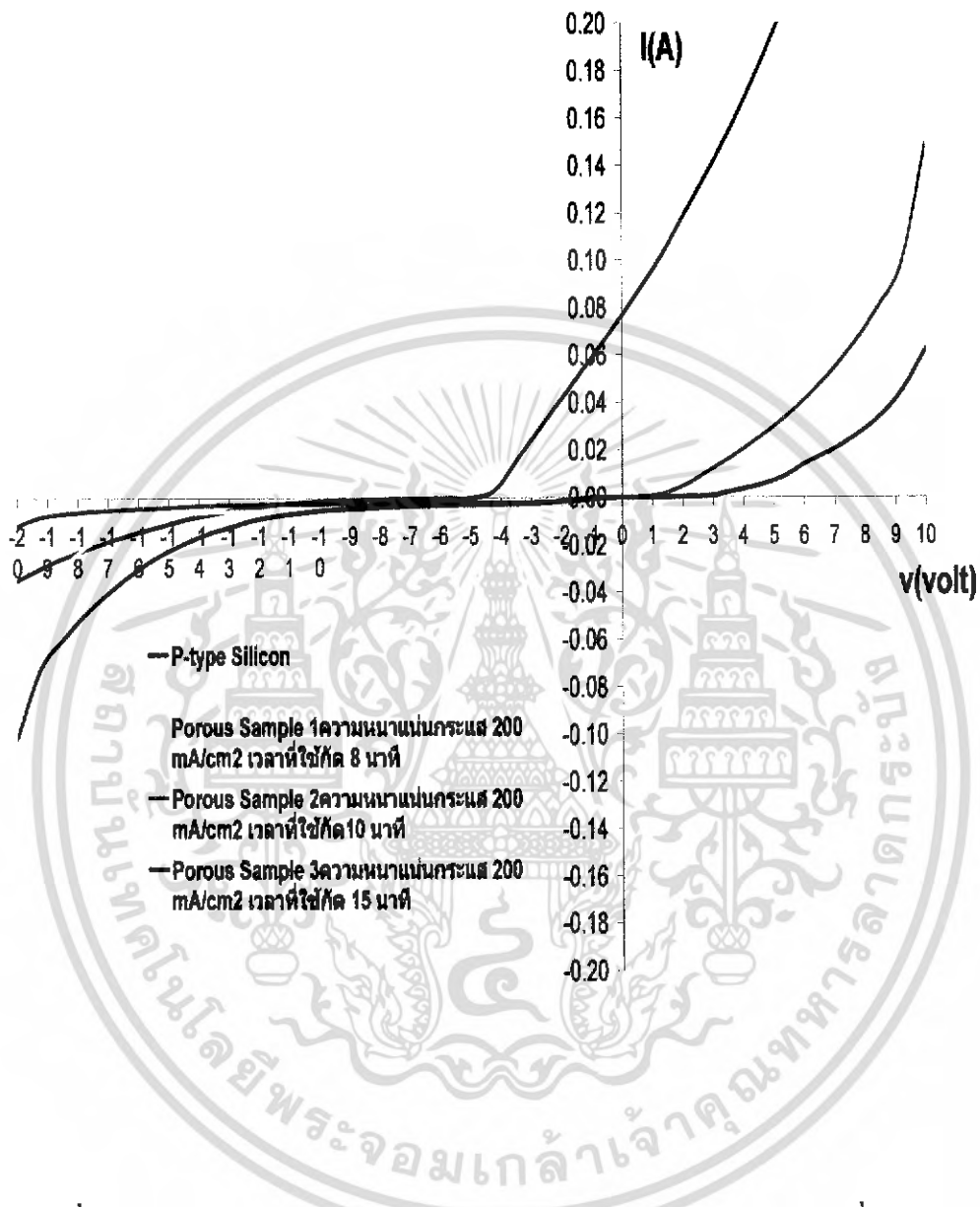
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.20 กับ รูปที่ 4.21 จะเห็นได้ชัดว่าตัวอย่างที่ 1 , 2 และ ตัวอย่างที่ 3 ในที่มีด (รูปที่ 4.18) จะไม่เกิดกระแสจนกว่าจะป้อนแรงดันให้ถึงประมาณ 4 volt จึงจะเริ่มเกิดกระแส ถ้านำมาเปรียบเทียบกับกราฟรูปที่ 4.21 ตัวอย่างที่ 1 กับ 2 ต้องการแรงดันเพียง 2 volt และ ตัวอย่างที่ 3 ต้องการแรงดันประมาณ 3.5 volt ก็จะทำให้เกิดกระแส ไฟฟ้า กล่าวได้ว่า แสงสว่างกำลัง 100 วัตต์ จะช่วยในการกระตุ้นให้เกิดกระแสได้ ซึ่งการตอบสนองต่อแสงของแต่ละตัวอย่างที่ต่างกัน คาดว่า จะเป็นผลมาจากเวลาที่ใช้กัดเมื่อความหนาแน่นกระแสที่ใช้กัดเท่ากันที่ทำให้เกิดพอร์สที่มีลักษณะ ต่างกัน ความลึกของรูพูนต่างกัน สมบัติทางควอนตัมก็จะต่างกันออกไป



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของพอร์สที่กัดด้วยกระแส 0.19A ใน ที่มีด โดยตัวอย่างที่ 1-3 มีความหนาแน่นกระแส 200 mA/cm<sup>2</sup> ใช้เวลากัด 8, 10, 15 นาที ตามลำดับ

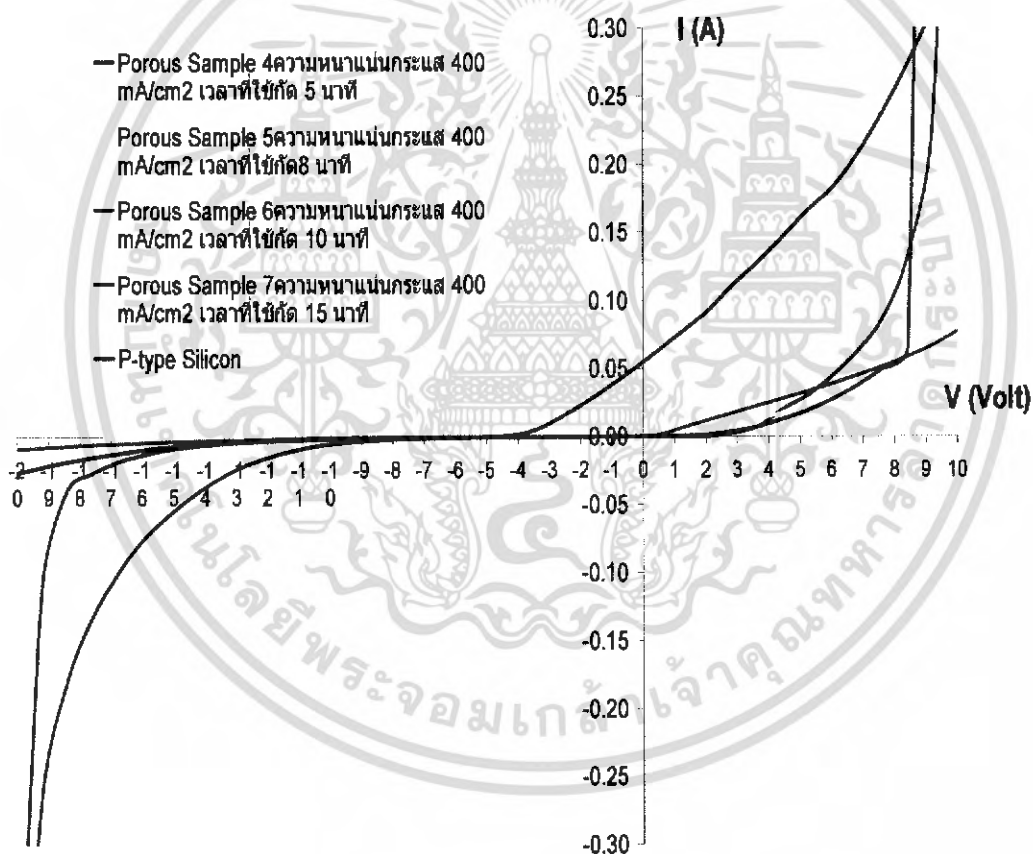
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



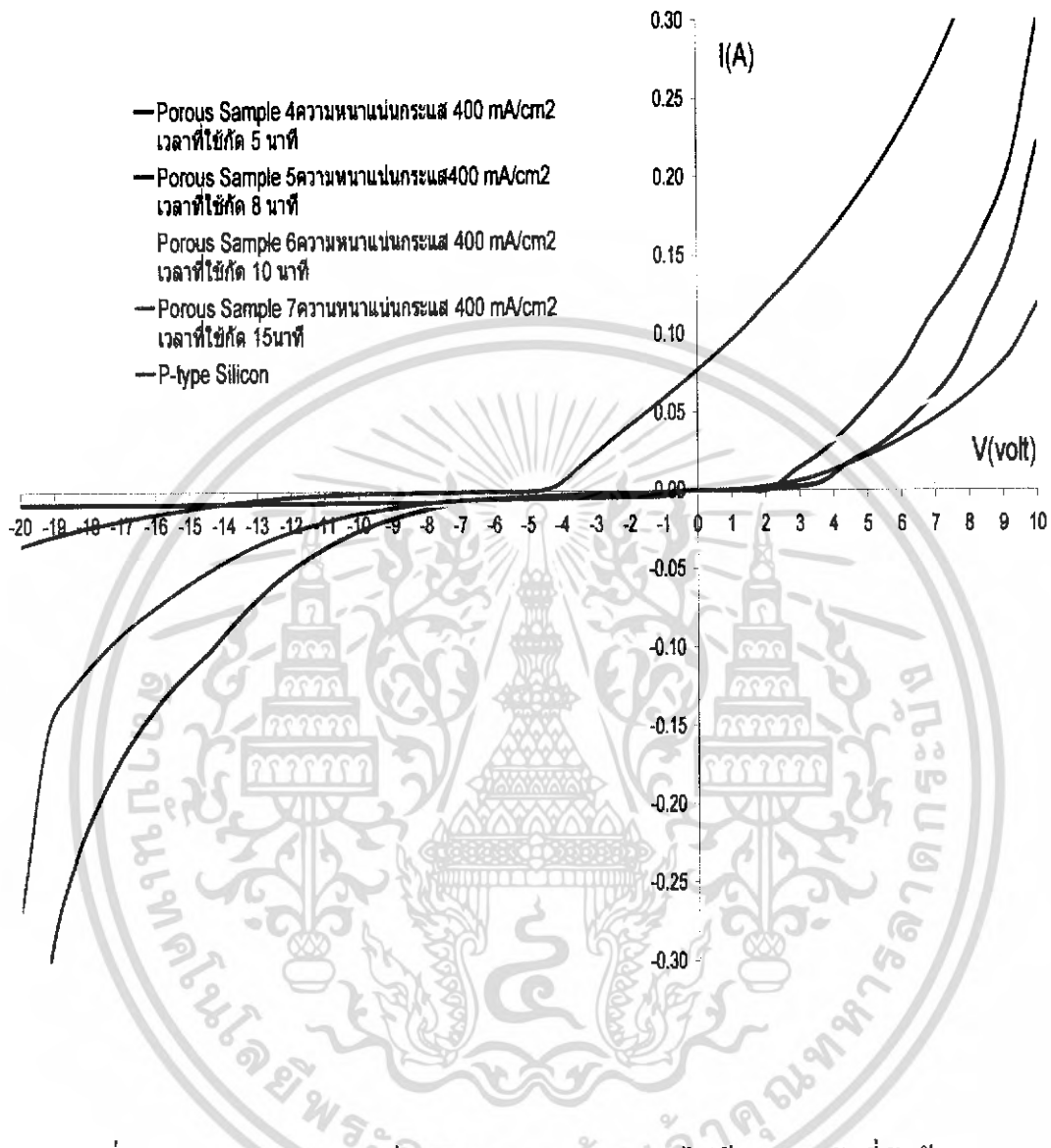
รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของพอร์สที่กัดด้วยกระแส 0.19A ในแสงสว่างกำลัง 100 วัตต์ โดยตัวอย่างที่ 1-3 มีความหนาแน่นกระแส 200 mA/cm<sup>2</sup> ใช้เวลากัด 8, 10, 15 นาทีตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟรูปที่ 4.22 กับ รูปที่ 4.21 พิจารณาเปรียบเทียบกันแล้วในกราฟรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าในที่มีดตัวอย่างต้องการแรงดันป้อนให้ถึงประมาณ 4 volt จึงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแส และกระแสที่เกิดขึ้นมีน้อยมาก เมื่อเทียบกับขณะที่ตัวอย่างอยู่ในแสงสว่างกำลัง 100 วัตต์ (รูปที่ 4.23 ) ตัวอย่างที่ 4 กับ ตัวอย่างที่ 7 จะมีกระแสเกิดขึ้นเมื่อได้รับแรงดันป้อนให้ลดลงเหลือประมาณ 3 volt ตัวอย่างที่ 5 ต้องการแรงดันประมาณ 2 volt และตัวอย่างที่ 6 ต้องการแรงดันประมาณ 1 volt แสดงว่าแสงสว่างกำลัง 100 วัตต์ มีผลต่อการเกิดกระแสของตัวอย่าง ซึ่งการตอบสนองต่อแสงของตัวอย่างมีไม่เท่ากันยิ่งขึ้นกับเวลาที่ใช้กัดเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสเท่ากันอีกด้วย



**รูปที่ 4.22** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของพอร์สที่กัดด้วยกระแส 0.38A ใน ที่มีด โดยตัวอย่างที่ 4-7 มีความหนาแน่นกระแส 400 mA/cm<sup>2</sup> ใช้เวลากัด 5, 8, 10, 15 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสไฟฟ้าของพอร์สที่กัดด้วยกระแส 0.38A ในแสงสว่างกำลัง 100วัตต์ โดยตัวอย่างที่ 4-7 ใช้ความหนาแน่นกระแส 400 mA/cm<sup>2</sup> ใช้เวลากัด 5, 8, 10, 15 นาทีตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

พอร์สซิลิกอน สามารถสร้างได้ด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี โดยการใช้ซิลิกอนชนิดพี เพราะในซิลิกอนชนิดพีมีโฮลซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการทำให้เกิดพอร์สด้วยการกัดทางไฟฟ้าเคมี และทำการควบคุมอัตราส่วนของสารละลาย โดยกำหนดให้อัตราส่วนของสารละลาย ไฮโดรเจนฟลูออริก: เอทานอล: น้ำ เป็น 1:2:1 มีค่าคงที่ และทำการเปลี่ยนแปลง ความหนาแน่น กระแสและเวลาที่ใช้ในการกัด

ผลจากภาพถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด พบว่าลักษณะของ พอร์สซิลิกอน ที่ได้จากแหล่งกำเนิดกระแสมีลักษณะของพอร์สซิลิกอนที่ไม่ดีไม่สม่ำเสมอ เกิดขึ้น เนื่องจากการเกิดออกไซด์ ส่งผลทำให้กระแสที่ไหลในแต่ละตำแหน่งมีความไม่สม่ำเสมอ (Localized inhomogeneous current flow) เป็นผลให้ได้พอร์สซิลิกอนที่ไม่ดี เวลาและความหนาแน่นกระแสที่ใช้กัดมีผลต่อลักษณะและ ขนาด ของรูพรุน ซึ่งมีผลต่อปรากฏการณ์ทางควอนตัม

ผลการวัดโฟโตเคอร์เรนท์สเปกโตรสโคปี พบว่า สำหรับซิลิกอนชนิดพีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะตอบสนองที่พลังงานโฟตอนประมาณ 1.05 eV และผลจากการวัดพอร์สซิลิกอนที่ได้จาก แหล่งกำเนิดกระแส จะมีการตอบสนองต่อพลังงานโฟตอนได้ตั้งแต่ประมาณ 1.1 – 3.0 eV โดยจะมีขีดพิคเค้นชัดที่พลังงานโฟตอน 1.38 eV และ 1.55 eV ซึ่งผลลัพธ์เป็นไปตามแบบจำลองที่ได้ อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.3 และผลที่ได้สองค่าก็เนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างพอร์ส ซิลิกอน

ผลการวัดความยาวคลื่นที่พอร์สตอบสนองจะอยู่ในย่านที่ตามองเห็น (Visible light) ถึงย่าน ที่ตามองไม่เห็น (invisible light) ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ ประมาณ 400 – 1200 นาโนเมตร และ มีการตอบสนองที่ชัดเจนที่ความยาวคลื่น 800 นาโนเมตรและ ประมาณ 900 นาโนเมตร ซึ่งความยาวคลื่นที่ตอบสนองของซิลิกอนชนิดพีอยู่ที่ประมาณ 1050 นาโนเมตร

ผลการวิเคราะห์สมบัติกระแส-แรงดัน (I-V Characteristics) ของพอร์สซิลิกอนที่ได้จาก กระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีด้วยแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า พอร์สที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงของ กระแสเมื่อป้อนแรงดันที่ประมาณ 4 volt ในที่มีมืด เมื่อพอร์สได้รับแสงสว่างกำลัง 100วัตต์ จะช่วย ให้เกิดพาหะจากแสงและเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นก่อนที่จะรวมตัวเกิดเป็นปริมาณกระแสที่เพิ่มขึ้น โดย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันที่ป้อนให้พอร์สในแสงสว่างกำลัง 100 วัตต์ ประมาณ 2 volt ก็ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแส ซึ่งเป็นลักษณะของไดโอด ไดโอดที่มีโครงสร้างเป็นแบบ โลหะ/พอร์ส (Metal/PS diode) จึงมีลักษณะ โครงสร้างเป็นโฟโต ไดโอด ซึ่งในส่วนของซิลิกอนชนิดพีหลังจากที่ทำการปลูกขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (Indium Tin Oxide; ITO) 200 นาโนเมตร ลงบนผิวหน้าแล้วนำมาวิเคราะห์สมบัติกระแส-แรงดัน ( I-V Characteristics) จะแสดงให้เห็นลักษณะที่เป็นไดโอดเป็นผลมาจากขั้วไฟฟ้าที่ปลูกให้กับซิลิกอนชนิดพีทำให้มีลักษณะของรอยต่อแบบขอตต์ก็ การตอบสนองจะเริ่มที่แรงดันในด้านลบเพราะปริมาณโฮลที่มีอยู่มากเมื่อได้รับแรงดันลบก็ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกระแสได้ง่ายกว่าพอร์สซิลิกอนซึ่งปริมาณของโฮลลดลงหลังจากถูกนำไปสร้างเป็นชั้นของพอร์ส

จากผลการวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงรวมทั้งคุณสมบัติทางไฟฟ้าในการวิจัยนี้ อุปกรณ์ตรวจวัดแสงจากพอร์สซิลิกอนมีคุณสมบัติที่ต่างจากอุปกรณ์ตรวจวัดแสงจากซิลิกอนชนิดพี สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่แตกต่างกัน ความยาวคลื่นที่พอร์สตอบสนองมีช่วงที่กว้างมากกว่า และ เปลี่ยนการตอบสนองต่อแรงดัน ไฟฟ้าของซิลิกอนชนิดพีจาก ลบ เป็นตอบสนองในค่าแรงดันด้านบวก

### ข้อเสนอแนะ

1. ซิลิกอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นแบบที่เรียกว่า ดัมมี่ (dummies) คือ ไม่ทราบค่าความต้านทาน ปริมาณสารเจือ ทิศทางของผลึก ทราบแต่เพียงว่า เป็นชนิดพี ซึ่งข้อมูลที่ไม่ทราบดังกล่าว เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน ดังนั้น จึงเป็นเรื่องที่สำคัญมาก ที่เราจำเป็นต้องทราบข้อมูล เบื้องต้นดังกล่าว
2. ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรฟลูออริก เป็นอีกตัวแปรที่สำคัญ ซึ่งในการทำวิจัยควรที่จะมีให้เลือกหลายความเข้มข้น เพื่อเลือกใช้ให้เหมาะสม
3. แผ่นซิลิกอนที่จะใช้สร้างชั้นพอร์สซิลิกอน จะมีค่าความต้านทาน ปริมาณสารเจือ ทิศทางของผลึก ไม่เหมือนกัน ฉะนั้นจำเป็นต้องตรวจสอบความหนาแน่นกระแสที่จะทำให้เกิดพอร์สซิลิกอนอย่างชัดเจน ถ้ากำหนดให้  $J$  คือ ความหนาแน่นกระแสที่จะเลือกใช้ และ  $J_{ps}$  คือ ความหนาแน่นกระแสที่เกิดพอร์สซิลิกอน มีกฏง่ายๆ คือ

ถ้า  $J > J_{ps}$  จะเกิดการขัดผิวหน้าขึ้น (electro polishing)

$J < J_{ps}$  พอร์สซิติคอนจะเริ่มมีการฟอร์มตัวขึ้น

และ  $J = J_{ps}$  จะเกิดสถานะที่เรียกว่า สถานะคงที่ (steady state) ซึ่งจะทำให้ได้

พอร์สซิติคอน ที่มีความสมบูรณ์และสม่ำเสมอที่สุด

4. ในระหว่างการทำปฏิกิริยาจะเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนขึ้น ฟองก๊าซนี้ถ้าถ่ายเทไม่ดีจะทำให้เกิดการสะสมกันที่ขั้วลบด้านบน ส่งผลให้พอร์สซิติคอนที่ได้ไม่มีความสม่ำเสมอ ดังนั้นในการออกแบบระบบจำเป็นต้องหาวิธีการถ่ายเทก๊าซนี้ เช่น การเขย่าอย่างต่อเนื่องตลอดการทดลอง เป็นต้น
5. สาเหตุหลักที่ทำให้ได้พอร์สซิติคอนที่ไม่ดี เนื่องจากการมีออกซิเจนมากเกินไป ซึ่งออกซิเจนนี้มาจากน้ำ แต่เป็นที่ทราบกันว่าระบบสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมจะสร้างพอร์สซิติคอนที่ดีที่สุด คือ ระบบไฮโดรฟลูออริก-น้ำ (HF-H<sub>2</sub>O system) ดังนั้นจำเป็นต้องหาวิธีการลดปริมาณออกซิเจน และเพิ่มไฮโดรเจน (ไม่ใช่สถานะก๊าซ) เข้าไปแทน เนื่องจากไฮโดรเจนซึ่งเกาะที่พื้นผิวจะช่วยนำไฟฟ้าแล้วยังทำให้โสมมีโอกาสทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นด้วย
6. ในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสง สิ่งสำคัญที่สุดที่จะต้องคำนึงถึง คือ การเกิดออกซิเดชัน ภายในรูพรุน ซึ่งนี่จะเป็นสาเหตุหลักในการลดความไวในการตอบสนองต่อแสง จนกระทั่งถึงกับไม่มีการตอบสนองต่อแสงเลย
7. ฤกษ์แจสำคัญอีกประการ ก็คือ เรื่องของ ขั้วไฟฟ้า เนื่องจากพื้นผิวของพอร์สซิติคอนมีลักษณะเป็นรูพรุน เพราะฉะนั้น การเกาะติดหรือสัมผัสที่ไม่ดีระหว่าง ขั้วกับพอร์สซิติคอน จะส่งผลให้ อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมา ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้

## เอกสารอ้างอิง

คู่มือ เครื่องาม, สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน  
เล่ม 1, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542

กาญจน์ปัญญา สุวรรณโช. 2548. การสร้างนาโนพอร์ด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยี  
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

L.T. Canham[ *Appl. Phys. Lett.* (USA)Vol.57(1990)p.1046

A.M. ROSSI AND H.G. BOHN, *Institut für Schichten und  
Grenzflächen, Forschungszentrum Jülich, 52425 Jülich, Germany;*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้