

การศึกษาคูณสมบัติลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิกอน

STUDY OF THE LUMINESCENCE PROPERTIES OF  
POROUS SILICON LAYER



นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

NARIN ATIWONGSANGTHONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

เลขหมู่.....สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขทะเบียน.....32119

พ.ศ. 2542

วัน, เดือน, ปี.....1.6.0.พ. 2542

ISBN 974-622-352-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ลิขสิทธิ์ขาดและสงวนลิขสิทธิ์ไว้โดยตลอดและสงวนไว้เพื่อ

**STUDY OF THE LUMINESCENCE PROPERTIES OF  
POROUS SILICON LAYER**



**NARIN ATIWONGSANGTHONG**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**1999**

**ISBN 974-622-352-6**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 1999**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิติคอน
นักศึกษา	นายนรินทร์ อติวงศ์แสงทอง
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2542

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเสนอผลการวิจัยที่เกี่ยวกับลักษณะ โครงสร้างและคุณสมบัติ โฟโวลูมิเนสเซนซ์ ณ ที่อุณหภูมิต้องของพอร์สซิติคอน โดยชั้นพอร์สซิติคอนที่นำมาศึกษาสามารถ สร้างขึ้นได้จากปฏิกิริยาการกัดทางไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า anodization ของแผ่นผลึกซิติคอนในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก และเมื่อทำการฉายแสงอุลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 365 นาโน เมตร ให้แก่พอร์สซิติคอนก็จะเกิดปรากฏการณ์การเปล่งแสงแบบโฟโวลูมิเนสเซนซ์ขึ้น ซึ่งในการ ทดลองได้ทำการศึกษาถึงโครงสร้างและคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิติคอนในส่วนของ ความยาวคลื่นและความเข้มแสง ที่เงื่อนไขใน anodization ต่างๆ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาถึง ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ ตลอดจนเสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของ พอร์สซิติคอนที่อยู่ภายใต้แสงอุลตราไวโอเล็ตและสภาพบรรยากาศของก๊าซชนิดต่างๆด้วย

จากผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขใน anodization อย่างใดอย่างหนึ่ง เช่น การ เพิ่มค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิติคอนชนิดพี การลดค่าสภาพต้านทานของผลึกซิติคอนชนิด เอ็น การเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส การลดปริมาณความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลู ออริก หรือการเพิ่มเวลาใน anodization มีผลทำให้ขนาดของโครงสร้างในระดับนาโนเมตรและ ความยาวคลื่นแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิติคอนเปลี่ยนแปลงลดลงได้ ทั้งนี้เป็นผลจาก ปรากฏการณ์ quantum size effect ส่วนการศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วงตั้งแต่ 300 เคลวิน ไปจนถึง 20 เคลวิน พบว่าความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อทำการลดอุณหภูมิภายใน ระบบให้มีค่าต่ำลง ในส่วนของการศึกษาผลของแสงอุลตราไวโอเล็ต และผลของก๊าซชนิดต่างๆ อัน ได้แก่ ไนโตรเจน , ออกซิเจน , อากาศ และสูญญากาศ พบว่าการฉายแสงอุลตราไวโอเล็ตให้แก่ พอร์สซิติคอนเป็นเวลานานๆ มีผลทำให้ความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์มีการเปลี่ยนแปลงลดลงได้ และจะลดลงอย่างรวดเร็วมากเมื่อพอร์สซิติคอนอยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซออกซิเจน จากผลการ

ทดลองนี้สนับสนุนว่าการเปล่งแสงแบบโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอน น่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากการรวมตัวแบบเปล่งแสงที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอน สุดท้ายเป็นการนำเอาพอร์สซิลิกอนมาประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง โดยจะถูกนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสงที่สามารถตอบสนองต่อแสงในย่านที่ตามองเห็นได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Titel</b>	Study of The Luminescence Properties of Porous Silicon Layer
<b>Student</b>	Mr. Narin Atiwongsangthong
<b>Thesis Advisor</b>	Assist.Prof.Somsak Cheersirikul
<b>Degree</b>	Master of Engineering in Electrical Engineering
<b>Year</b>	1999

## ABSTRACT

This thesis presents research on structure and photoluminescence properties of a porous silicon performed at a room temperature. The porous silicon layer is formed by electrochemical etching reaction of silicon wafers in hydrofluoric solution which is called anodization. When the porous silicon was excited by 365 nm of ultraviolet light , the photoluminescence was observed. The experiment showed study of structure and photoluminescence properties of a porous silicon under various anodization conditions. Additionally , effect of temperature on photoluminescence was studied as well as stability of photoluminescence under variation of surrounding gases.

It is found that the varying one of anodization conditions such as increasing the resistivity of p-type silicon , decreasing the resistivity of n-type silicon , increasing the current density, decreasing the concentration of hydrofluoric solution or increasing the anodization time. It can decrease nanostructure and photoluminescence wavelength of porous silicon which attributed to the quantum size effect. The study on the effect of ambient temperature in the range from 300 to 20 K. It is found that the photoluminescence intensity increases with decreasing temperature. In addition , the study on the effect of ultraviolet illumination and various ambient gases such as nitrogen , oxygen , air and vacuum. It is found that ultraviolet illumination to porous silicon for a long time causes decrement in its photoluminescence intensity. The photoluminescence intensity decreases rapidly when porous silicon is illuminated in oxygen gas. This experiment supports that the photoluminescence of porous silicon occurs from radiative recombination of carriers at surface of nanoporous silicon. Finally , The porous silicon was applied to be optoelectronic device such as a porous silicon photodetector , which can response to visible light.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล ผู้ให้คำปรึกษาและวางแนวทางในการทำวิจัยครั้งนี้ จนสามารถสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ ขอขอบคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช ที่แนะนำแนวทางในการเรียบเรียงงานวิจัย และให้คำปรึกษาในขณะที่ทำการวิจัย ขอขอบคุณ รศ.โยอิจิ ยาซุมูระ ผู้เชี่ยวชาญพิเศษ ที่ให้คำปรึกษาในด้านเทคนิค ขอขอบคุณอาจารย์สุรศักดิ์ เนียมเจริญ หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือการใช้เครื่องมือและให้กำลังใจมาโดยตลอด

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด , เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มมามานสเปกโตรมิเตอร์ และเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

สุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ผู้ที่ให้ความอุปการะและสนับสนุนในด้านการศึกษามาโดยตลอด

นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
สัญลักษณ์.....	XVIII
ศัพท์เทคนิค.....	XX
คำนำ.....	XXII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 การประยุกต์ใช้พอร์สซilikอนในงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมา.....	3
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	5
<b>บทที่ 2 ทฤษฎี</b>	
2.1 ผลึกซilikอน.....	6
2.1.1 โครงสร้างของผลึกซilikอน.....	6
2.1.2 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซilikอน.....	9
2.1.3 ชนิดของผลึกซilikอน.....	12
2.2 พอร์สซilikอน.....	17
2.2.1 โครงสร้างของพอร์สซilikอน.....	17
2.2.2 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซilikอน.....	18
2.3 เซลไฟฟ้าเคมี.....	21
2.3.1 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	23

## สารบัญ ( ต่อ )

	หน้า
2.3.2 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอนกับ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	26
2.3.3 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	28
2.4 กลไกในการเกิดพอร์สซิลิกอน.....	30
2.4.1 ปฏิริยาเคมีในการกัดที่ผิวของผลึกซิลิกอน.....	30
2.4.2 การเกิดรูพรุนของพอร์สซิลิกอน.....	32
2.4.3 กลไกในการหยุดกัด โครงสร้างของพอร์สซิลิกอน.....	37
2.5 ความพรุนของพอร์สซิลิกอน.....	41
<b>บทที่ 3 พฏิกิริยทางแสง</b>	
3.1 พฏิกิริยทางแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	43
3.1.1 การดูดกลืนแสง.....	44
3.1.2 การเปล่งแสง.....	45
3.2 พฏิกิริยทางแสงของผลึกซิลิกอน.....	49
3.3 พฏิกิริยทางแสงของพอร์สซิลิกอน.....	51
<b>บทที่ 4 กระบวนการสร้าง</b>	
4.1 เทคนิคในการสร้างแบบต่างๆ.....	53
4.1.1 เทคนิควิธีการสร้างแบบ Microwave plasma decomposition ของ ก๊าซไซเรน ( SiH <sub>4</sub> ).....	53
4.1.2 เทคนิควิธีการสร้างแบบ Laser breakdown ของก๊าซไซเรน ( SiH <sub>4</sub> ).....	54
4.1.3 เทคนิควิธีการสร้างแบบ High-frequency spark discharge.....	55
4.2 การสร้างพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี.....	56
<b>บทที่ 5 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และการวัด</b>	
5.1 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอน.....	61
5.1.1 เทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนัก ( Gravimetric method ).....	61
5.1.2 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ( SEM ).....	62

## สารบัญ ( ต่อ )

หน้า

5.1.3 รามานสเปกโทรสโกปีแบบการแปลงฟูเรียร์ ( FT-Raman ).....	64
5.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้วัดปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์.....	66
5.3 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของนาโนพอร์สซิลิกอน.....	67
5.4 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิกอนที่อุณหภูมิต่ำ.....	70

### บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง

6.1 การทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนด้วย SEM.....	72
6.2 การทดลองเพื่อศึกษาค่าความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอนที่เงื่อนไข anodization ต่างๆ.....	77
6.2.1 การศึกษาผลของชนิดและสภาพด้านทานของผลึกซิลิกอนที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน.....	78
6.2.2 การศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของสารละลายกรด ไฮโดรฟลูออริก ที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน.....	80
6.2.3 การศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization ที่มีผลต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน.....	81
6.2.4 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization ที่มีต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน.....	82
6.3 การทดลองเพื่อศึกษาขนาด โครงสร้างพอร์สซิลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ.	84
6.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีต่อคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์.....	89
6.5 การทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอน.....	93
6.6 การทดลองเพื่อศึกษาเสถียรภาพ โฟโตลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิกอน.....	95
6.6.1 การศึกษาเสถียรภาพ โฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนภายใต้แสงอุลตราไวโอเลต.....	95
6.6.2 การศึกษาเสถียรภาพ โฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนที่อยู่ในสภาพบรรยากาศของก๊าซชนิดต่างๆ.....	99

## สารบัญ ( ต่อ )

	หน้า
บทที่ 7 แนวทางการประยุกต์ใช้พอร์สซilikอนเพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจนับแสง.....	101
บทที่ 8 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	
8.1 สรุปผลการทดลอง.....	114
8.2 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	118
เอกสารอ้างอิง.....	120
ภาคผนวก.....	122
ภาคผนวก ก 1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์.....	123
2. คุณสมบัติของผลึกซิลิกอน.....	123
ภาคผนวก ข 1. ลำดับภาพขั้นตอนในกระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน.....	124
2. ภาพแสดงการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองทางแสง ของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโตรีเซเตอร์.....	127
ภาคผนวก ค ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์ทาง วิชาการ.....	128
ประวัติผู้เขียน.....	129

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สรุปลักษณะสำคัญที่เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่แตกต่างกัน.....	24
3.1	แสดงการเปล่งแสงชนิดต่างๆแบ่งตามวิธีการกระตุ้น.....	47
6.1	แสดงเงื่อนไขในการ anodization เพื่อสร้างชั้นพอร์สซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนค่าต่างๆ.....	86
6.2	แสดงข้อมูลต่างๆของสเปกตรัมรามานของชั้นพอร์สซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนค่าต่างๆ.....	88
6.3	แสดงชนิดและลักษณะพันธะที่ตำแหน่งเลขคลื่นต่างๆของพอร์สซิติคอน.....	98
7.1	แสดงข้อมูลการตอบสนองทางแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆของอุปกรณ์พอร์สซิติคอน โฟโวลต์เทคเตอร์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิติคอน ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ซิติคอน โฟโวลต์ไดโอด.....	111
8.1	แสดงข้อมูลปริมาณความเข้มแสงของพอร์สซิติคอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลา กับพอร์สซิติคอนที่ถูกจัดเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลต ในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง.....	117
8.2	แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนและค่าความยาวคลื่นแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างขึ้น โดยใช้เงื่อนไขในการ anodization แบบเดียวกัน.....	118

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แสดงขั้นตอนในกระบวนการสร้าง SOI โดยใช้เทคนิคพอร์สซิลิกอน โดย ( ก ) เป็นรอยต่อพี-เอ็น ในแผ่นผลึกซิลิกอน ( ข ) ทำการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนปกคลุมผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ( ค ) ทำการออกซิเดชันชั้นพอร์สซิลิกอนเพื่อทำให้เป็นชั้นฉนวน.....	4
1.2	แสดงภาพตัดขวาง โครงสร้างของ SOI ที่ใช้เทคนิคพอร์สซิลิกอน.....	4
2.1	แสดงแบบจำลองง่ายๆของอะตอมซิลิกอน.....	6
2.2	แสดงแบบจำลองพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมซิลิกอน.....	7
2.3	แสดงโครงผลึกหนึ่งหน่วยของ โครงสร้างรูปเพชร.....	7
2.4	แสดง โครงสร้างแบบ Tetrahedral Structure ที่อยู่ภายใน Unit Lattice ของ โครงสร้างเพชร.....	8
2.5	แสดงส่วนต่างๆของ Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร โดย ( ก ) แสดง ส่วนครึ่งล่างของ Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร ( ข ) แสดงส่วนครึ่ง บนของ Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร.....	8
2.6	แสดงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในกรณีที่ 7 อะตอมถูกนำเข้ามาใกล้ ชิดกัน.....	10
2.7	แสดงการแตกแยกของระดับพลังงาน 3s และ 3p ของผลึกซิลิกอน ที่ ตำแหน่งระยะห่างระหว่างอะตอมค่าต่างๆ.....	11
2.8	แสดงแผนภูมิแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนในมิติของ k-space.....	12
2.9	แสดงลักษณะ โครงสร้างพลังงานของผลึกซิลิกอนบริสุทธิ์.....	13
2.10	แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและ โฮลภายใน โครงสร้างแถบพลังงานของ ซิลิกอนบริสุทธิ์.....	13
2.11	แสดง ( ก ) ลักษณะผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ( ข ) โครงสร้างแถบพลังงาน ของผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น.....	16
2.12	แสดง ( ก ) ลักษณะผลึกซิลิกอนชนิดพี ( ข ) โครงสร้างแถบพลังงาน ของผลึกซิลิกอนชนิดพี.....	16
2.13	แสดงภาพจำลองโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอน.....	17
2.14	แสดงลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ.....	18

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่		หน้า
2.15	แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆ และทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะภายใน.....	19
2.16	แสดงลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิติคอนเปรียบเทียบกับผลึกซิติคอน.	20
2.17	แสดงลักษณะการไบอัสเซตไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่างๆ.....	22
2.18	แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างผลึกซิติคอน ( ก ) ชนิดพี และ ( ข ) ชนิดเอ็น ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก...	23
2.19	แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ในส่วนที่มีการไบอัสแบบ anodic bias.....	25
2.20	แสดงลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิติคอน ( ก ) ชนิดพี และ ( ข ) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	27
2.21	แสดงแผนภาพการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่างๆภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยที่ $d$ เป็นความหนาของผลึกซิติคอน , $W$ เป็นความกว้างของบริเวณปลดพาหะนำกระแส (Space Charge Region : SCR) ส่วน $d_1$ เป็นความกว้างของบริเวณ diffusion layer ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	28
2.22	แสดงขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิติคอน.....	30
2.23	แสดงแบบจำลองการกัดเนื้อของผลึกซิติคอนทั้งสองลักษณะ โดยที่ ( ก ) ลักษณะการกัดแบบ electropolishing ( ข ) ลักษณะการกัดแบบ porous etching.....	33
2.24	แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะ โฮลที่ถูกดึงมารวมกันที่บริเวณก้นหลุมเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า.....	34
2.25	แสดงบริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นรอบๆผนังของรูหรือหลุมที่บริเวณผิวของผลึกซิติคอน.....	35
2.26	แสดงการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน.....	36
2.27	แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน.....	36
2.28	แสดงการกระจายตัวของกระแสรอบๆผนังของรูพรุน.....	37
2.29	แสดงกลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของชั้นพอร์สซิติคอนชนิดพี โดยที่ ( ก ) แสดงโครงสร้างของพอร์สซิติคอนและทิศทางการเคลื่อนที่ของโฮล	

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
( ข ) แสดงลักษณะแถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของพาหะ โสตรจากผลึกซิลิกอนผ่านเข้าไปใน โครงสร้างของพอร์สซิลิกอน	
( ค ) แสดงลักษณะแถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของพาหะ โสตรจากผลึกซิลิกอนผ่านไปยังสารละลายกรด HF ที่บริเวณผิวสัมผัสที่กั้นหลุมของรูพรุน.....	38
2.30 แสดงแผนภาพบริเวณปลอดพาหะนำกระแส ( SCR ) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์สซิลิกอนที่สร้างจากผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น โดยที่	
( ก ) โครงสร้างของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดมากกว่า 2W	
( ข ) โครงสร้างของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดน้อยกว่า 2W.....	40
2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อผลึกซิลิกอน ( q ) กับขนาดของรูพรุน ( d ) ที่มีต่อความพรุนของพอร์สซิลิกอน.....	41
2.32 แสดงแผนภาพจำลองด้านบนของ โครงสร้างพอร์สซิลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ.....	42
3.1 แสดงการกระจายตัวของระดับพลังงาน ( ก ) localized state และ ( ข ) surface state ภายในช่องว่างพลังงาน.....	43
3.2 แสดงกระบวนการรวมตัวของพาหะแบบเปล่งแสงในสารกึ่งตัวนำ	
( ก ) Band-to-Level emission ( ข ) Donor-Acceptor emission	
( ค ) Band-to-Band emission.....	46
3.3 แสดงแผนภาพสีของแสงที่ความยาวคลื่นและค่าพลังงานต่างๆ.....	48
3.4 แสดงแผนภาพ โครงสร้างของแถบพลังงานแบบ direct band gap.....	49
3.5 แสดงแผนภาพ โครงสร้างของแถบพลังงานแบบ indirect band gap.....	50
3.6 แสดงแบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้งสามระดับภายในพอร์สซิลิกอน.....	52
4.1 แสดงอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการ microwave plasma decomposition ของก๊าซไซเรน ( SiH <sub>4</sub> ).....	54
4.2 แสดงการ Spark ที่เกิดขึ้นระหว่างปลายลวดทั้งสแตนกับแผ่นผลึกซิลิกอน.	55
4.3 แสดงภาคตัดขวางของอุปกรณ์ เซลล์ไฟฟ้าเคมี ที่ ใช้ ในกระบวนการ anodization.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XII๒ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่		หน้า
4.4	แสดงภาคตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น.....	59
4.5	แสดงภาคตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิกอนที่ผ่านการเคลือบโลหะอลูมิเนียมที่บริเวณด้านหลังของแผ่นแล้ว.....	59
4.6	แสดงภาคตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิกอนที่เกิดชั้นพอร์ซซิลิกอนที่บริเวณผิวหน้าด้านบน.....	59
4.7	แสดงรูปถ่ายของพอร์ซซิลิกอนที่ได้ทำการสร้างจนเสร็จสมบูรณ์.....	60
5.1	แสดงภาพถ่ายของเครื่องชั่งน้ำหนักของบริษัท Sartorius รุ่น 1602 MP ที่มีความละเอียดสูง.....	61
5.2	แสดงแผนภาพหลักการการทำงานของเครื่อง SEM.....	62
5.3	แสดงภาพถ่ายเครื่อง SEM ของ JEOL รุ่น JSM-6301F.....	63
5.4	แสดงการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานที่ทำให้เกิด Raman Scattering...	64
5.5	แสดงภาพถ่ายของเครื่อง FT-Raman Spectrometer ของ Renishaw รุ่น System 2000.....	65
5.6	แสดงส่วนประกอบต่างๆของเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	66
5.7	แสดงภาพถ่ายของเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ของ Nikon รุ่น G250.....	67
5.8	แสดงแผนภาพองค์ประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์..	68
5.9	แสดงภาพถ่ายของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น System 2000.....	69
5.10	แสดงภาพถ่ายของเครื่อง Cryostat ของ LEYBOLD.....	71
6.1	แสดงภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์ซซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพด้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร.....	72
6.2	แสดงภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์ซซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพด้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร.....	73
6.3	แสดงภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์ซซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพด้านทาน 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร.....	73
6.4	แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นที่มีสภาพด้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป ( ต่อ )

รูปที่		หน้า
6.5	แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซซิติคอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิติคอนชนิดเอ็นทีที่มีสภาพด้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร.....	74
6.6	แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซซิติคอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิติคอนชนิดเอ็นทีที่มีสภาพด้านทาน 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร.....	75
6.7	แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซซิติคอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิติคอนชนิดพีทีที่มีสภาพด้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร.....	76
6.8	แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซซิติคอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิติคอนชนิดพีทีที่มีสภาพด้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร.....	76
6.9	แสดงภาพตัดขวางจำลองของแผ่นผลึกซิติคอนลักษณะต่างๆที่ถูกทำการวัดน้ำหนัก เพื่อนำไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์ซซิติคอน โดยที่ ( ก ) เป็นน้ำหนักของแผ่นผลึกซิติคอนเริ่มต้น ( $m_1$ ) ( ข ) เป็นน้ำหนักของแผ่นผลึกซิติคอนหลังจากผ่านกระบวนการสร้างชั้นพอร์ซซิติคอน ( $m_2$ ) ( ค ) เป็นน้ำหนักของแผ่นผลึกซิติคอนหลังจากทำการลอกชั้นพอร์ซซิติคอนทิ้งแล้ว ( $m_3$ ).....	77
6.10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์ซซิติคอนกับค่าสภาพด้านทานของแผ่นผลึกซิติคอนชนิดพี.....	79
6.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์ซซิติคอนกับค่าสภาพด้านทานของแผ่นผลึกซิติคอนชนิดเอ็น.....	79
6.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์ซซิติคอนกับปริมาณความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ที่ใช้ในการ anodization.....	81
6.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์ซซิติคอนกับค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization.....	82
6.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์ซซิติคอนกับเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization.....	83
6.15	แสดงสเปกตรัมรามานของผลึกซิติคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรต่างๆ.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา XIV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่		หน้า
6.16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกว้างที่ครึ่งของความสูง และค่าการเปลี่ยนแปลงลดลงของความถี่สัญญาณสเปกตรัมรามาน กับขนาดของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตร.....	85
6.17	แสดงสเปกตรัมรามานของพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนค่าต่างๆ	87
6.18	แสดงสีที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนค่าต่างๆ.....	89
6.19	แสดงสีของแสงไฟโฟลลูมิเนสเซนซ์ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ซึ่งได้จากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่แตกต่างกัน.....	90
6.20	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอนกับความยาวคลื่นแสงไฟโฟลลูมิเนสเซนซ์.....	91
6.21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอนกับความเข้มแสงไฟโฟลลูมิเนสเซนซ์.....	92
6.22	แสดงภาพถ่ายของ Free standing porous silicon ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด โดยที่ ( ก ) ก่อนทำการฉายแสงด้วยแสงอุลตราไวโอเลต ( ข ) ขณะทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลต.....	93
6.23	แสดงสเปกตรัมแสงไฟโฟลลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนที่อุณหภูมิต่างๆ.	94
6.24	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงไฟโฟลลูมิเนสเซนซ์กับอุณหภูมิ..	94
6.25	แสดงสเปกตรัมแสงไฟโฟลลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนที่เวลาในการฉายแสงอุลตราไวโอเลตต่างๆ.....	95
6.26	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงไฟโฟลลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอุลตราไวโอเลต.....	96
6.27	แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของชั้นพอร์สซิลิกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตเป็นเวลาต่างๆ ในสภาพแวดล้อมของอากาศ.....	97
6.28	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงไฟโฟลลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอุลตราไวโอเลตให้แก่พอร์สซิลิกอน ในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ.....	99

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่		หน้า
6.29	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์กับเวลาในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ.....	100
7.1	แสดงแบบจำลองโครงสร้างของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโวลูมิเนสเซนซ์.....	102
7.2	แสดงภาพถ่ายของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโวลูมิเนสเซนซ์ที่สร้างขึ้นได้.....	103
7.3	แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโวลูมิเนสเซนซ์ โดย ( ก ) อุปกรณ์ถูกจี้คเก็บเอาไว้ในที่มืด ไม่ได้รับการฉายแสง ( ข ) อุปกรณ์ได้รับการฉายแสง.....	103
7.4	แสดงแผนภาพของอุปกรณ์เครื่องมือวัดการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอน โฟโวลูมิเนสเซนซ์.....	104
7.5	แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะทำการไบอัสแบบย้อนกลับของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 65% ซึ่งได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มแสงค่าต่างๆ.....	105
7.6	แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะทำการไบอัสแบบย้อนกลับของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 70% ซึ่งได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มแสงค่าต่างๆ.....	106
7.7	แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะทำการไบอัสแบบย้อนกลับของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 80% ซึ่งได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มแสงค่าต่างๆ.....	107
7.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโวลูมิเนสเซนซ์กับความเข้มแสงในขณะทำการไบอัสแบบย้อนกลับที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ -15 โวลต์ ของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอน โฟโวลูมิเนสเซนซ์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 65% , 70% และ 80% ตามลำดับ ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ.....	108
7.9	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโวลูมิเนสเซนซ์กับเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ.....	109
7.10	แสดงผลการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโวลูมิเนสเซนซ์ ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ซิลิกอนโฟโวลูมิเนสเซนซ์.....	110

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่		หน้า
7.11	แสดงผลการตอบสนองเชิงเวลาของอุปกรณ์พอร์สซิติคอนโฟโตดีเทคเตอร์ ที่สร้างขึ้นจาก ( ก ) ชั้นพอร์สซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 65 % ( ข ) ชั้นพอร์สซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 70 % ( ค ) ชั้นพอร์สซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 80 %.....	112
7.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการตอบสนองของอุปกรณ์พอร์สซิติคอนโฟโตดีเทคเตอร์กับเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอน.....	113
1ข	แสดงแผ่นผลึกซิติคอนเริ่มต้นที่มีผิวค้ำหน้าชัดเจนเป็นกระจกเงา.....	124
2ข	แสดงการทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกซิติคอน.....	124
3ข	แสดงการเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง vacuum evaporator	125
4ข	แสดงการฉินเตอร์ริง โลหะอลูมิเนียมด้านหลังแผ่นผลึกซิติคอน.....	125
5ข	แสดงการบรรจุแผ่นผลึกซิติคอนเข้าสู่ชุดกักทางไฟฟ้าเคมี.....	126
6ข	แสดงกระบวนการกักทางไฟฟ้าเคมีเพื่อสร้างชั้นพอร์สซิติคอน.....	126
7ข	แสดงการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์พอร์สซิติคอน.....	127
8ข	แสดงการวัดการตอบสนองทางแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของอุปกรณ์พอร์สซิติคอน โฟโตดีเทคเตอร์.....	127

## สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
a	ค่าคงที่โครงสร้างผลึก	$^{\circ}\text{A}$
c	ความเร็วแสง	m/s
d	ขนาดความกว้างของรูพรุน	nm
E	พลังงานอิเล็กตรอน	eV
$E_a$	พลังงานของอะตอมสารเจือผู้รับ	eV
$E_c$	พลังงานแถบความนำ	eV
$E_d$	พลังงานของอะตอมสารเจือผู้ให้	eV
$E_f$	พลังงานระดับเฟอร์มิ	eV
$E_g$	พลังงานแถบต้องห้าม	eV
$E_i$	พลังงานระดับอินทรีนซิก	eV
$E_p$	พลังงานโฟนอน	eV
$E_{PS}$	พลังงานแถบต้องห้ามของพอร์สซิลิกอน	eV
$E_q$	พลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์ quantum size effect	eV
$E_s$	สนามไฟฟ้ารอบๆผนังรูพรุนของพอร์สซิลิกอน	V/m
$E_s/$	สนามไฟฟ้ารอบๆกันหลุมของรูพรุน	V/m
$E_v$	พลังงานแถบวาเลนซ์	eV
FWHM	ความกว้างที่ครึ่งของความสูงสเปกตรัม	$\text{cm}^{-1}$
h	ค่าคงที่ของพลังค์	J.s
I	ค่ากระแสไฟฟ้า	mA
$I_{PS}$	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดพอร์สซิลิกอน	mA
J	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	$\text{mA}/\text{cm}^2$
$J_{PS}$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดพอร์สซิลิกอน	$\text{mA}/\text{cm}^2$
k	เวฟนัมเบอร์	$\text{cm}^{-1}$
$k_p$	เวฟนัมเบอร์ของโฟนอน	$\text{cm}^{-1}$
L	ขนาดของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตร	nm
n	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ	$\text{cm}^{-3}$

## สัญลักษณ์ ( ต่อ )

$p$	ความหนาแน่นของโฮล	$\text{cm}^{-3}$
$P$	ค่าความพรุน	%
$q$	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	C
$q$	ขนาดโครงสร้างของเนื้อผลึกซิลิกอน	nm
$T$	อุณหภูมิ	K
$V$	ศักดาไฟฟ้า	V
$V_{\text{con}}$	ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับผลึกซิลิกอน	V
$V_d$	ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ diffusion layer	V
$V_{\text{elec}}$	ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโตรดกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก	V
$V_{\text{SCR}}$	ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะนำกระแส	V
$W$	ความกว้างบริเวณปลอดพาหะนำกระแส	$\mu\text{m}$
$\Delta E_c$	พลังงานที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำ	eV
$\Delta E_v$	พลังงานที่เปลี่ยนแปลงลดลงจากระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์	eV
$\Delta\omega$	การเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณสเปกตรัมรามาน	$\text{cm}^{-1}$
$\epsilon_0$	ค่าเพอร์มิตติวิตีของสูญญากาศ	F/cm
$\epsilon_{\text{Si}}$	ค่าเพอร์มิตติวิตีของซิลิกอน	F/cm
$\rho$	สภาพต้านทาน	$\Omega\text{-cm}$
$\lambda$	ค่าความยาวคลื่น	nm
$\nu$	ค่าความถี่	Hz
$\eta$	ประสิทธิภาพของการรวมตัวแบบเปล่งแสง	-
$\tau_R$	เวลาอายุเฉลี่ยของพาหะที่นับตั้งแต่ถูกกระตุ้นจนถึงการรวมตัวแบบเปล่งแสง	$\mu\text{s}$
$\tau_N$	เวลาอายุเฉลี่ยของพาหะที่นับตั้งแต่ถูกกระตุ้นจนถึงการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง	$\mu\text{s}$

## ศัพท์เทคนิค

การกัดทางไฟฟ้าเคมี	electrochemical etching
การกัดแบบพอร์ส	porous etching
การขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า	electropolishing
การเปลี่ยนระดับพลังงาน	level transition
การดูดกลืน	absorbance
การรวมตัวแบบเปล่งแสง	radiative recombination
การรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง	non-radiative recombination
กระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมี	anodization
แกเลียมอาร์เซไนด์	gallium arsenide
ความพรุน	porosity
ความกว้างที่ครึ่งของความสูงสเปกตรัม	full width half maximum ( FWHM )
โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์	electron configuration
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด	scanning electron microscopy ( SEM )
จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน	transmission electron microscopy ( TEM )
ชั้นผู้เสียสละ	sacrificial layer
ชั้นหน้ากาก	masking layer
ไดโอดเปล่งแสง	light emitting diode ( LED )
ฐานรอง	substrate
นาโนโฟโตลิโธกราฟี	nanophotolithography
บริเวณปลดพาหะนำกระแส	space charge region ( SCR )
แบบจำลองสถานะระดับพลังงานสามระดับ	three-level luminescent state model
ผลึกในระดับนาโนเมตร	nanocrystallites
พอร์สซิลิกอน	porous silicon
พันธะแขวนขาด	dangling bond
เพอมีทิวิตี	permittivity
ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มรามาเนสเปกโทรสโกปี	FT-Raman
ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	FTIR

## ศัพท์เทคนิค ( ต่อ )

โฟโตดีเทกเตอร์	photodetector
โฟโตลูมิเนสเซนซ์	photoluminescence
ระดับพลังงานกระตุ้น	excited state
ระดับพลังงานที่ผิว	surface state
ระดับพลังงานของสารเจือปน	impurity level
เรกติไฟร์	rectifying
ลูมิเนสเซนซ์	luminescence
เลขคลื่น	wave number
วงจรรวม	integrated circuit
วงจรรวมชนิดออปโตอิเล็กทรอนิกส์	optoelectronic integrated circuit
เวลาอายุ	life time
สถานะพื้น	ground state
สารเจือผู้ให้	donor
สารเจือผู้รับ	acceptor
แสงในช่วงที่ตามองเห็น	visible light
อิเล็กทรอนิกส์ลูมิเนสเซนซ์	electroluminescence
อิเล็กทรอนิกส์แสง	optoelectronic

## คำนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำได้ถูกพัฒนาไปอย่างมากและมีบทบาทสำคัญในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆมากมาย ซึ่งอุปกรณ์ทั้งหมดส่วนมากจะถูกสร้างขึ้นบนฐานรองที่เป็นผลึกซิลิกอน ทำให้ผลึกซิลิกอนกลายมาเป็นวัสดุพื้นฐานที่มีความสำคัญ สำหรับนำไปใช้สร้างเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกซิลิกอน อันได้แก่ วงจรรวม ( IC ) ชนิดต่างๆ และคุณสมบัติทางกลของผลึกซิลิกอน อันได้แก่ ทรานซิสเซอร์ความดัน เป็นต้น แต่อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางแสงของผลึกซิลิกอน กับไม่ค่อยนิยมนำเอาผลึกซิลิกอนมาใช้สร้าง ทั้งนี้เนื่องจากผลึกซิลิกอนเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานแบบ Indirect-band gap นั่นเอง

แต่จากการค้นพบคุณสมบัติในการเปล่งแสงได้ ณ ที่อุณหภูมิ เมื่อไม่นานมานี้ของผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ ( พอร์ตซิลิกอน ) จึงทำให้ทางศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งมีศักยภาพในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำบนฐานรองที่เป็นผลึกซิลิกอน เกิดความสนใจและมีแนวความคิดที่จะทำการสร้างและศึกษาคุณสมบัติในการเปล่งแสงของพอร์ตซิลิกอน ทั้งนี้ก็เพื่อนำผลการศึกษามาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์แสงต่อไป

สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอการทำวิจัยเรื่องการศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ตซิลิกอน โดยเริ่มต้นเนื้อหาจากบทนำ ทฤษฎีพื้นฐาน พฤติกรรมทางแสง กระบวนการสร้าง เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และการวัด การทดลองและผลการทดลอง แนวทางการประยุกต์ใช้พอร์ตซิลิกอนเพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสง ที่เรียกว่า อุปกรณ์พอร์ตซิลิกอนโฟโวลูมิเตอร์ และท้ายสุดเป็นบทสรุป ซึ่งรายละเอียดของขั้นตอนการวิจัยสามารถสรุปได้เป็นบท ดังต่อไปนี้คือ

บทที่ 1 เป็นบทนำจะกล่าวถึง ความเป็นมาของงานวิจัย และการนำเอาพอร์ตซิลิกอนไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมา ตลอดจนวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

บทที่ 2 เนื้อหาจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างและลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนและพอร์ตซิลิกอน ทฤษฎีทางเซลล์ไฟฟ้าเคมี กลไกในการเกิดพอร์ตซิลิกอน และความพรุนของชั้นพอร์ตซิลิกอน

บทที่ 3 เนื้อหาจะกล่าวถึง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมทางแสงของสารกึ่งตัวนำ ของผลึกซิลิกอน และของพอร์ตซิลิกอน ตามลำดับ

บทที่ 4 เนื้อหาจะกล่าวถึง กระบวนการสร้างชั้นพอร์ซซิติคอนด้วยเทคนิคต่างๆ อันได้แก่ เทคนิค Microwave plasma decomposition ของก๊าซไซเรน (  $\text{SiH}_4$  ) เทคนิค Laser breakdown ของก๊าซไซเรน และเทคนิค High-frequency spark discharge ตลอดจนวิธีการทางไฟฟ้าเคมีที่ได้มีการนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

บทที่ 5 เนื้อหาจะกล่าวถึง เทคนิคและเครื่องมือต่างๆสำหรับการวิเคราะห์และการวัด ที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

บทที่ 6 เป็นการทดลองและผลการทดลองที่เกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซิติคอน ที่เงื่อนไข anodization ต่างๆ การศึกษาถึงผลของโครงสร้างพอร์ซซิติคอนที่มีต่อคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ ตลอดจนศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและเสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซิติคอนอีกด้วย ทั้งนี้ก็เพื่อนำผลการทดลองมาสนับสนุนและอธิบายกลไกในการเปล่งแสงได้ของพอร์ซซิติคอน

บทที่ 7 เป็นแนวทางการประยุกต์และพัฒนางานวิจัยทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง โดยใช้พอร์ซซิติคอน ด้วยการสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสงทั้งนี้ก็นำไปพัฒนาเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณแสง ( Photodetector ) ที่สามารถแปลงสัญญาณแสงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ต่อไป

บทที่ 8 เป็นบทสรุปท้ายซึ่งเป็นบทสรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในการพัฒนาทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ในปัจจุบัน จะเห็นได้ว่าผลึกซิลิกอน นั้นเป็นวัสดุพื้นฐานที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก สำหรับการนำไปใช้สร้างเป็นอุปกรณ์ทาง อิเล็กทรอนิกส์และวงจรรวม (IC) ชนิดต่างๆ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีราคาถูก อีกทั้งยังสามารถทำการ สร้างและพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆลงบนแผ่นผลึกซิลิกอน ได้เป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ก็เพื่อที่จะนำเอา ซิลิกอนชิพเหล่านี้ไปทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆที่ใช้อำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันของมนุษย์ นับตั้งแต่เครื่องใช้ไฟฟ้าโดยทั่วไปจนถึงเครื่องคอมพิวเตอร์ ส่วนบุคคล แต่สำหรับอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง (Optoelectronics) นักวิทยาศาสตร์ หลากๆท่านได้คาดการณ์ไว้ว่าในอนาคตจะเข้ามามีบทบาทแทนที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กันอยู่ ในปัจจุบัน กับไม่ค่อยนิยมนำเอาผลึกซิลิกอน มาใช้เป็นวัสดุพื้นฐานแต่อย่างไร ทั้งนี้ก็เนื่องมาจาก ผลึกซิลิกอนนั้นเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นแบบ Indirect-band gap มี ขนาดของช่องว่างพลังงานเพียง 1.14 eV ซึ่งไม่สามารถให้แสงในช่วงที่สามารถมองเห็นได้ (Visible Light) ด้วยเหตุผลนี้เองทำให้ในปัจจุบันจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหันไปทำการสร้าง อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์แสงนี้บนวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นแทน เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากสารประกอบแกลเลียมอาร์เซไนด์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอน พบว่ามีข้อได้เปรียบเกี่ยวกับคุณสมบัติทางแสง เช่นมีค่าความกว้างของช่องว่างพลังงานที่มากกว่า ผลึกซิลิกอน คือมีค่าเท่ากับ 1.4 eV และมีลักษณะของช่องว่างพลังงานเป็นแบบ Direct-band gap ทำให้แกลเลียมอาร์เซไนด์จึงมีศักยภาพในการนำไปใช้สร้างเป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง แสงต่างๆ เช่น เซลแสงอาทิตย์, อุปกรณ์วัดแสง และอุปกรณ์ Light Emitting Diode (LED) เป็นต้น

โดยในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นด้วยเทคโนโลยีของแกลเลียมอาร์เซไนด์ จะต้องทำการปลูกชั้นผลึกของแกลเลียมอาร์เซไนด์ ด้วยเทคนิคลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องอาศัยเทคนิคและเครื่องมือในการปลูกผลึกที่มีความแม่นยำสูง บนแผ่นผลึกฐานรองชนิดเดียวกัน คือ แกลเลียมอาร์เซไนด์นั่นเอง ซึ่งมีราคาที่สูงมาก และเมื่อจบกระบวนการสร้างแผ่นผลึกฐานรองจะถูกทำให้บางลงเพื่อผลในการลดความต้านทานลง ซึ่งเป็น

เอกสารที่สูญเสียบ่อยครั้งเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีที่ทุ่มเทเพื่อให้ได้ผลึกฐานรองที่มีคุณภาพดี ดังนั้น ค่าไม่อาจกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ทางแสงที่สร้างจากเทคโนโลยีของแกลเลียมอาร์เซไนด์เหล่านี้จึงมีราคาที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากเทคโนโลยีซิลิกอน

ด้วยเหตุผลข้างต้น จึงได้มีความพยายามที่จะทำการวิจัยและพัฒนาการปลูกแกลเลียมอาร์เซไนด์บนผลึกฐานรองซิลิกอน จุดประสงค์ก็เพื่อลดต้นทุนในการผลิตลงและให้สามารถสร้างอุปกรณ์เปล่งแสงรวมอยู่กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นๆบนฐานรองซิลิกอนเดียวกันได้ แต่ปัญหาการปลูกแกลเลียมอาร์เซไนด์บนผลึกฐานรองซิลิกอนนั้นมีอยู่หลายประการด้วยกัน เช่น การที่ค่าคงที่ของโครงผลึก (Lattice Constant) ระหว่างแกลเลียมอาร์เซไนด์กับซิลิกอนมีความแตกต่างกันถึง 4 % ซึ่งทำให้เกิดจุดบกพร่องมากมายในเนื้อผลึกที่ปลูกขึ้นมา นอกจากนี้ยังมีผลของความแตกต่างของลักษณะโมเลกุลโดยโมเลกุลของแกลเลียมอาร์เซไนด์เป็นแบบมีขั้ว แต่ผลึกซิลิกอนเป็นแบบไม่มีขั้ว ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดจุดบกพร่องขึ้นเช่นกัน และผลของการขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่แตกต่างกัน ยังมีผลทำให้สามารถเกิดการแตกร้าวเนื่องจากความเครียดภายในชั้นผลึกได้ จุดบกพร่องเหล่านี้เองที่เป็นอุปสรรคสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ลดลงได้

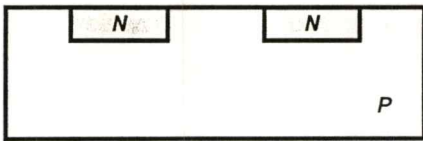
แต่จากการค้นพบคุณสมบัติในการเปล่งแสง (ลูมิเนสเซนซ์) ณ.ที่อุณหภูมิห้องเมื่อไม่นานมานี้ของผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆจำนวนมาก เรียกผลึกซิลิกอนที่มีโครงสร้างในลักษณะเช่นนี้ว่า พอร์สซิลิกอน จึงทำให้เกิดแนวทางที่สามารถจะนำเอาผลึกซิลิกอนมาใช้เป็นวัสดุพื้นฐานในการสร้างอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์แสงได้ โดยพอร์สซิลิกอนนั้นเป็นวัสดุที่ได้ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1956 ในระหว่างกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีของผลึกซิลิกอนในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดย Uhler [1] ซึ่งในขณะนั้นได้ทำงานอยู่ที่ Bell Laboratories ในประเทศสหรัฐอเมริกา ทั้งสองได้พยายามที่จะทำการพัฒนาเทคนิคในการขัดผิวหน้าวัสดุสารกึ่งตัวนำสองชนิด ได้แก่ เยอรมันเนียมและซิลิกอน ซึ่งในขณะนั้นได้มีความพยายามที่จะนำวัสดุสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด มาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการพัฒนาเทคนิคในการขัดผิวหน้าของวัสดุทั้งสองให้เรียบ ซึ่งเทคนิคและวิธีการขัดผิวหน้าวัสดุด้วยไฟฟ้าของ Uhler นี้ ผลที่ได้ส่วนมากจะออกมาเป็นที่น่าพอใจ แต่ในบางครั้งหลังจากการขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้าแล้ว พบว่าบนผิวหน้าของวัสดุเหล่านี้จะปรากฏฟิล์มที่มีลักษณะสีดำ แดงหรือน้ำตาลเกิดขึ้น ซึ่งฟิล์มเหล่านี้เป็นสิ่งที่พวกเขาไม่ต้องการให้เกิดขึ้นบนผิวหน้าของวัสดุ ดังนั้นจึงได้มีความพยายามที่จะแก้ไขปัญหาลำนี้ โดยมีการปรับเปลี่ยนใจในการทดลอง โดยไม่ทราบว่าเป็นฟิล์มที่พวกเขาไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในขณะนั้น ในอนาคตอีก 40 ปีข้างหน้าจะกลายมาเป็นวัสดุที่มีบทบาทและมีความสำคัญต่องานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ โดยได้มีการนำเอาพอร์สซิลิกอนไปประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีทางด้าน electronic isolation และงานทางด้าน micromachining เป็นต้น

จนมาถึงในปี 1990 ได้มีการรายงานการค้นพบคุณสมบัติเปล่งแสง ณ ที่อุณหภูมิห้องของ พอร์สซิติคอนเป็นครั้งแรกโดย Canham [2] การค้นพบคุณสมบัติเปล่งแสงของพอร์สซิติคอนใน ครั้งนี้เอง ได้ทำให้เกิดแนวทางและความเป็นไปได้ที่สามารถจะนำเอาวัสดุสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม 4 ที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานแบบ Indirect-band gap โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลึกซิติคอน มาใช้เป็นวัสดุ พื้นฐานในการสร้างเป็นอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง ซึ่งจะมีผลทำให้สามารถทำการพัฒนา สร้างอุปกรณ์เปล่งแสงและอุปกรณ์รับแสง ให้รวมอยู่กันกับอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นๆ บน ฐานรองซิติคอนเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลที่กระบวนการในการสร้างชั้นของพอร์สซิติคอน ก่อน ช่างจะง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน และสามารถเข้ากันได้กับกระบวนการสร้างวงจรรวม (IC) มาตรฐาน ทำให้ภายในขนาดอันใกล้กับการติดต่อรับส่งข้อมูลต่างๆภายในวงจรรวมหรือระหว่างวงจรรวมด้วย กัน จะมีการเปลี่ยนแปลงมาใช้สัญญาณแสงแทนการใช้สัญญาณไฟฟ้า (photon data transmission) ทั้งนี้เนื่องจากการติดต่อรับส่งข้อมูลโดยใช้สัญญาณแสงนั้นสามารถที่จะติดต่อรับส่งข้อมูลได้ครว ละมากๆในเวลาเดียวกันได้ โดยไม่มีการรบกวนกันของสัญญาณเกิดขึ้นเหมือนกับสัญญาณไฟฟ้า ด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้การประมวลผลของคอมพิวเตอร์ในอนาคตจะมีการทำงานที่รวดเร็วกว่าใน ปัจจุบันมาก

## 1.2 การประยุกต์ใช้พอร์สซิติคอนในงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมา

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นแล้วว่าพอร์สซิติคอนนั้นไม่ใช่วัสดุชนิดใหม่แต่อย่างไร โดยได้ ถูกค้นพบมาเป็นเวลากว่า 40 ปีแล้ว และในช่วงเวลาที่ผ่านมาได้มีการนำเอาพอร์สซิติคอนไป ประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่างๆมากมาย ตัวอย่างเช่น ในงานทางด้าน electronic isolation [3,4] โดยมีการ นำเอาพอร์สซิติคอนมาใช้งานสร้างเป็นชั้นฉนวนในงานวิจัยทางด้าน silicon-on-insulator (SOI) ทั้งนี้ก็เพื่อแยกอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ในวงจรรวมออกจากกัน หรือแยกออกจากฐานรอง ทำให้ พลังงานที่ใช้ในวงจรรวมมีค่าลดลงได้ โดยกระบวนการสร้างชั้นฉนวนดังกล่าวด้วยเทคนิคพอร์ส ซิติคอนจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 1.1

นอกจากตัวอย่างที่ได้ยกมาข้างต้นนี้แล้ว พอร์สซิติคอนยังถูกนำไปประยุกต์ใช้งานสร้าง เป็นอุปกรณ์ชนิดต่างๆอีก เช่น เซอร์คูเลชันแก๊ส และ เซ็นเซอร์ก๊าซ อีกด้วย



( ก )



( ข )

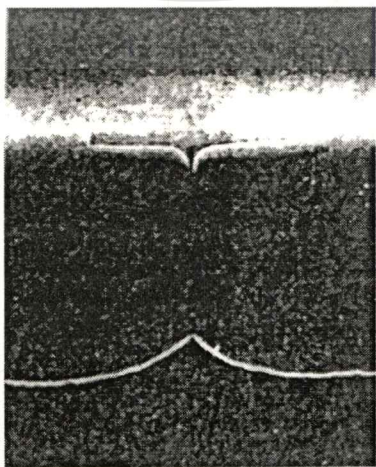


( ค )

รูปที่ 1.1 แสดงขั้นตอนในกระบวนการสร้าง SOI โดยใช้เทคนิคพอลิซิลิกอน โดยที่

- ( ก ) เป็นรอยต่อพี-เอ็น ในแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพีเริ่มต้น
- ( ข ) ทำการสร้างชั้นพอลิซิลิกอนปกคลุมผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น
- ( ค ) ทำการออกซีเดชันชั้นพอลิซิลิกอนเพื่อทำให้เป็นชั้นฉนวน

ซึ่งภายหลังจากกระบวนการสร้างเสร็จสมบูรณ์ ก็จะได้ชั้นของซิลิกอนที่ถูกแยกออกจากผลึกซิลิกอนฐานรอง โดยชั้นของพอลิซิลิกอนที่ถูกออกซีไดซ์จนกลายเป็นชั้นฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 1.2



- ชั้นซิลิกอนที่ถูกแยกออกมา
- ชั้นพอลิซิลิกอนที่ถูกออกซีไดซ์
- ผลึกซิลิกอนฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ระบบเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 1.2 แสดงภาพตัดขวาง โครงสร้างของ SOI ที่ใช้เทคนิคพอลิซิลิกอน [4]  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

จากอดีตที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า พอร์สซาลิกอนมีความสำคัญและประโยชน์เป็นอย่างมาก สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่างๆตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น และนับตั้งแต่ได้มีการค้นพบคุณสมบัติในการเปล่งแสงได้ของชั้นพอร์สซาลิกอนอีกด้วยแล้ว จึงทำให้พอร์สซาลิกอนกลายมาเป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่ง ที่ได้รับความสนใจว่าน่าจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสงได้

โดยการทำวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์ เพื่อ

1. ศึกษาโครงสร้างของชั้นพอร์สซาลิกอน ที่เงื่อนไขในการสร้างต่างๆ
2. ศึกษาคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซาลิกอน ที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ
3. ศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้พอร์สซาลิกอน เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์แสง โดยในงานวิจัยนี้นำมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสง

## บทที่ 2

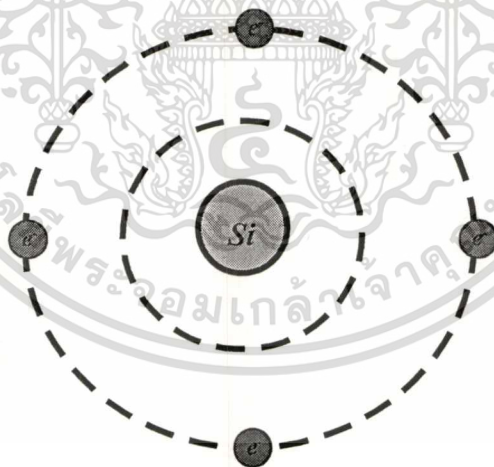
### ทฤษฎี

#### 2.1 ผลึกซิลิกอน

##### 2.1.1 โครงสร้างของผลึกซิลิกอน

ซิลิกอนเป็นสารกึ่งตัวนำที่ประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุซิลิกอนหลายๆอะตอมมาอยู่ใกล้ชิดกัน โดยอะตอมดังกล่าวจะมีการยึดเกาะเกี่ยวซึ่งกันและกันเพื่อความมั่นคงของอะตอม การเกาะเกี่ยวกันระหว่างอะตอมซิลิกอนเหล่านี้เรียกว่า พันธะ (bond) กลไกในการเกาะเกี่ยวหรือการเกิดพันธะนี้มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะพันธะที่เกิดขึ้นในผลึกซิลิกอนเท่านั้น

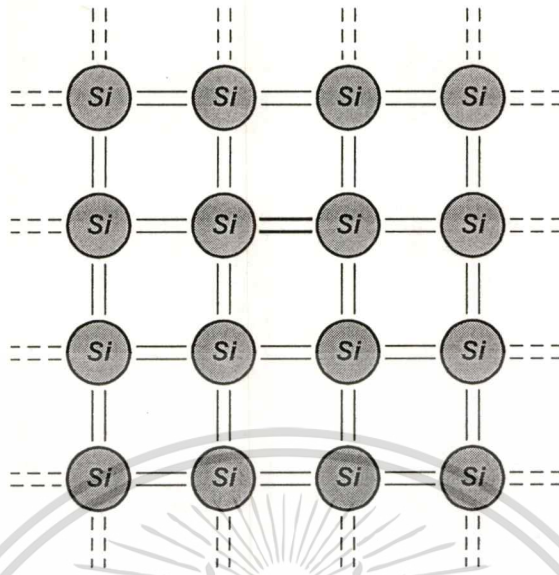
ในผลึกซิลิกอนเมื่ออะตอมของซิลิกอนเข้ามาอยู่ใกล้ชิดกันจะทำให้วงโคจรชั้นนอกสุดของแต่ละอะตอมซึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอนวงนอกสุด (valence electrons) อยู่ถึง 4 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองง่าย ๆ ของอะตอมซิลิกอน

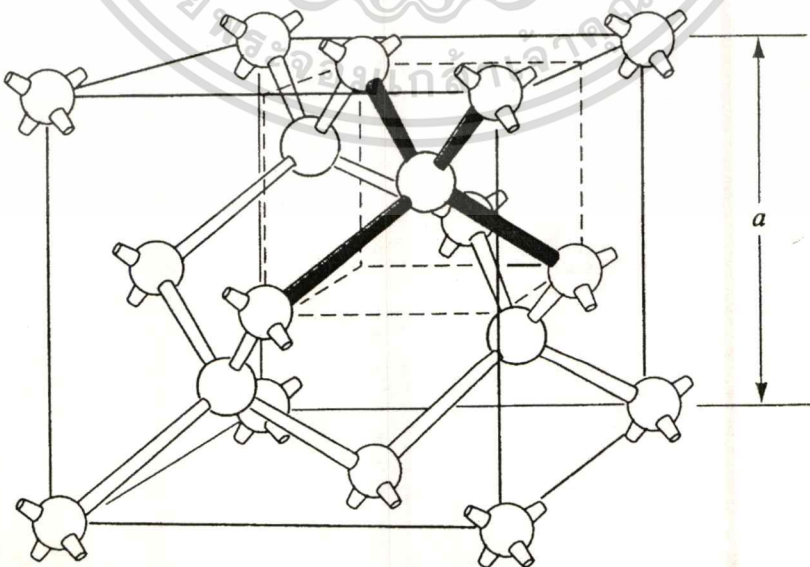
เกิดการทับซ้อนกัน อันจะทำให้เกิดพันธะแบบที่เรียกว่า พันธะโควาเลนต์ (covalent bond) เกิดขึ้น โดยพันธะดังกล่าวนี้เกิดจากอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดร่วมกัน ทั้งนี้เพื่อให้อะตอมอยู่ในภาวะที่มั่นคง ดังแสดงในรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงแบบจำลองพันธะโควาเลนต์ระหว่างอะตอมซิลิกอน

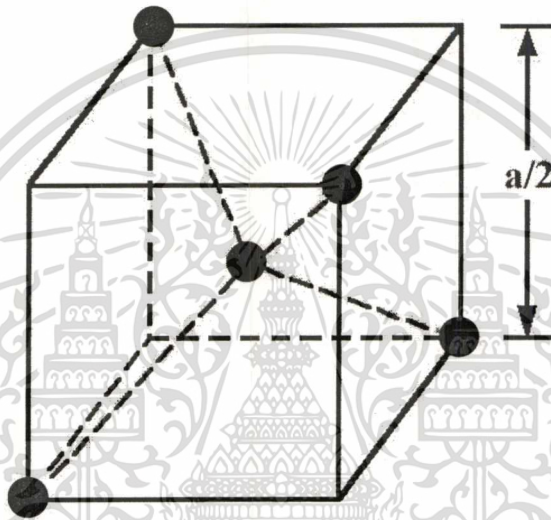
จากรูปข้างต้นจะเป็นโครงสร้างของผลึกซิลิกอนบริสุทธิ์ในแบบสองมิติ โดยแต่ละอะตอมจะมีการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดทั้ง 4 ร่วมกันกับอิเล็กตรอนวงนอกสุดของอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม เกิดพันธะโควาเลนต์ขึ้น 4 พันธะด้วยกัน การใช้อิเล็กตรอนร่วมกันนี้เองทำให้อะตอมของซิลิกอนต่างมีความมั่นคง และสามารถประกอบรวมกันเป็นโครงสร้างของผลึกได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



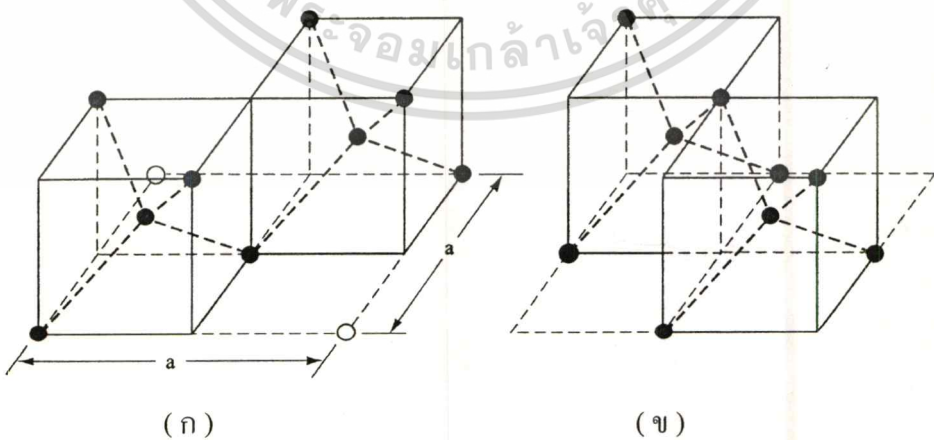
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกหนึ่งหน่วยของโครงสร้างรูปเพชร [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแสดงโครงสร้างโครงผลึกหนึ่งหน่วยของผลึกซิลิกอนในแบบ 3 มิติ โดยมีลักษณะโครงสร้างของผลึกเป็นแบบ รูปเพชร (Diamond Structure) ซึ่งภายในโครงผลึกหนึ่งหน่วยของโครงสร้างรูปเพชรนี้จะประกอบไปด้วยโครงสร้างแบบ Tetrahedral Structure อยู่ภายใน โดยโครงสร้างแบบนี้เป็นโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกันกับโครงสร้างของ Body-Centered Cubic แต่จะมีข้อแตกต่างอยู่ตรงที่โครงสร้างแบบ Tetrahedral Structure นั้นจะขาดอะตอมที่อยู่ทีมุมของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์อยู่ถึง 4 อะตอมด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างแบบ Tetrahedral Structure ที่อยู่ภายใน Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร



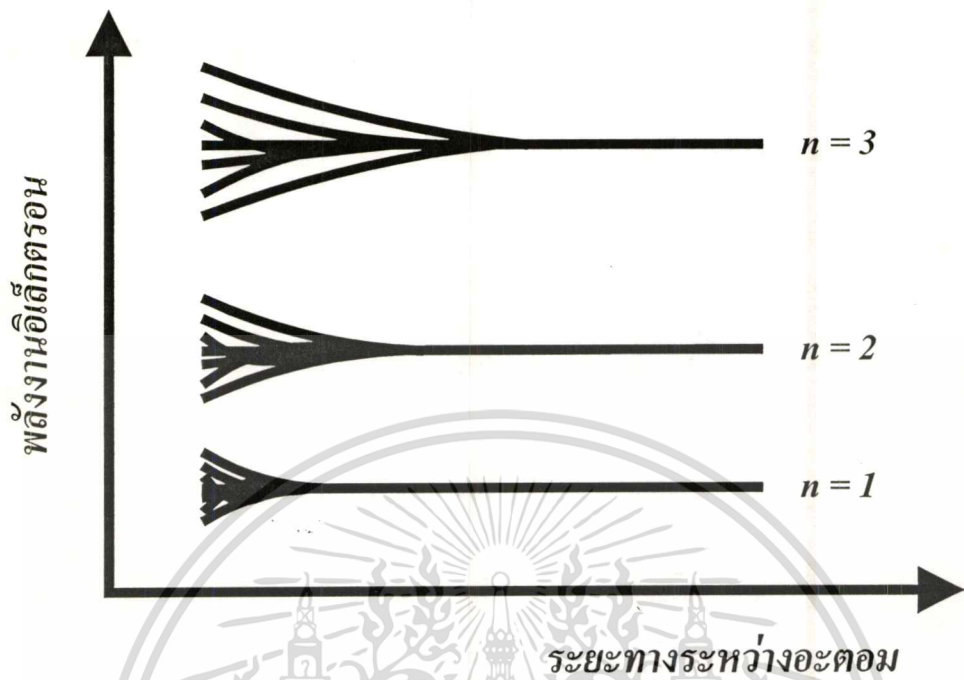
รูปที่ 2.5 แสดงส่วนต่างๆของ Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร โดย (ก) แสดงส่วนครึ่งล่างของ Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร (ข) แสดงส่วนครึ่งบนของ Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปข้างต้นแสดงให้เห็นถึงส่วนต่างๆของโครงผลึกหนึ่งหน่วยของโครงสร้างรูปเพชร โดยในรูปที่ 2.5 ( ก ) เป็นโครงสร้างของ Tetrahedral สองส่วนที่มาเชื่อมต่อกันเป็นส่วนครึ่งล่างของโครงผลึกหนึ่งหน่วยของโครงสร้างรูปเพชร โดยวงกลมสีขาวในรูปจะเป็นอะตอมของซิลิกอนในโครงผลึก ซึ่งจะปรากฏให้เห็นก็ต่อเมื่อมีโครงสร้าง Tetrahedral ในลักษณะแบบเดียวกันมาต่ออยู่ทั้งทางด้านซ้ายและขวาของรูป ส่วนในรูปที่ 2.5 ( ข ) จะเป็นโครงสร้างของ Tetrahedral สองส่วนที่มาเชื่อมต่อกันเป็นส่วนครึ่งบนของโครงผลึกหนึ่งหน่วยของโครงสร้างรูปเพชร และเมื่อนำโครงสร้างในรูปที่ 2.5 ( ก ) และ 2.5 ( ข ) ทั้งสองมาประกอบรวมกันก็จะกลายเป็นโครงผลึกหนึ่งหน่วยของโครงสร้างรูปเพชรขึ้นมา

### 2.1.2 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอน [6]

ในอะตอมเดี่ยวๆของวัสดุทุกชนิด จะประกอบด้วยอิเล็กตรอน โคจรอยู่ที่ระดับพลังงานต่างๆ โดยระดับพลังงานเหล่านี้เป็นระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่อง และจากกฎการแยกตัว (exclusion principle) ซึ่งได้บอกไว้ว่า แต่ละระดับพลังงานที่ถูกกำหนดไว้ด้วยตัวเลขควอนตัม 3 ตัว ( $n, l, m$ ) นั้น จะมีอิเล็กตรอนอยู่ได้เพียงสองตัว โดยที่อิเล็กตรอนสองตัวนี้ต้องมีการหมุนที่ไม่เหมือนกัน แต่เมื่อพิจารณาในรูปของผลึก ซึ่งประกอบด้วยอะตอมจำนวนมากมาอยู่ใกล้ชิดกัน จึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงกลุ่มของอิเล็กตรอนที่โคจรอยู่ในแถบพลังงาน ซึ่งหมายถึงระดับพลังงานจำนวนมากมาที่อยู่ใกล้ชิดกันมากจนเกิดเป็นแถบพลังงานขึ้นมา โดยแถบพลังงานเหล่านี้เกิดขึ้นจากการที่วงโคจรของอิเล็กตรอนของแต่ละอะตอมเดิมเกิดการทับซ้อน และเหลื่อมล้ำกันกับวงโคจรของอิเล็กตรอนของอะตอมข้างเคียง ทำให้วงโคจรหรือก็คือระดับพลังงานเดิมของแต่ละอะตอมมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น กรณีอะตอมที่เหมือนกันสองอะตอมถูกนำเข้ามาใกล้ๆกันทีละน้อยๆ จนกระทั่งวงโคจรชั้นนอกสุดของแต่ละอะตอมเกิดการทับซ้อนกันขึ้น อิเล็กตรอนต่างๆซึ่งแต่เดิมมีพลังงานเท่ากันในแต่ละอะตอมเดิม จะเกิดมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานไปอีกเล็กน้อย ทั้งนี้ก็เพราะหลักความจริงของกฎการแยกตัว ซึ่งกล่าวว่าแต่ละระดับพลังงานจะมีอิเล็กตรอนเกินสองตัวไม่ได้ ทำให้ระดับพลังงานเดิมเกิดการแตกแยกออกเป็นระดับพลังงานสองระดับ ซึ่งอยู่ใกล้กันมากและถ้าหากอะตอมทั้งสองดังกล่าวยังคงถูกทำให้เข้ามาใกล้กันมากขึ้นไปอีก อิเล็กตรอนต่างๆในระดับวงโคจรถัดต่อไปข้างในของแต่ละอะตอมก็จะมีปฏิกิริยาต่อกันอีก ทำให้ระดับพลังงานเดิมเกิดการแตกแยกออกเป็นสองระดับพลังงานอีกเช่นกัน ซึ่งจำนวนการแตกแยกของระดับพลังงานเหล่านี้จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนของอะตอมที่ถูกนำเข้ามาให้อยู่ใกล้ชิดกัน ดังนั้นถ้าหากมีอะตอมจำนวน  $n$  อะตอมถูกนำเข้ามาให้อยู่ใกล้ชิดกันแล้ว ระดับพลังงานแต่ละระดับของอะตอมเดิมจะแตกแยกออกเป็นจำนวน  $n$  ระดับซึ่งอยู่ใกล้กันมาก เช่นในกรณีมี 7 อะตอมถูกนำเข้ามาใกล้ชิดกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

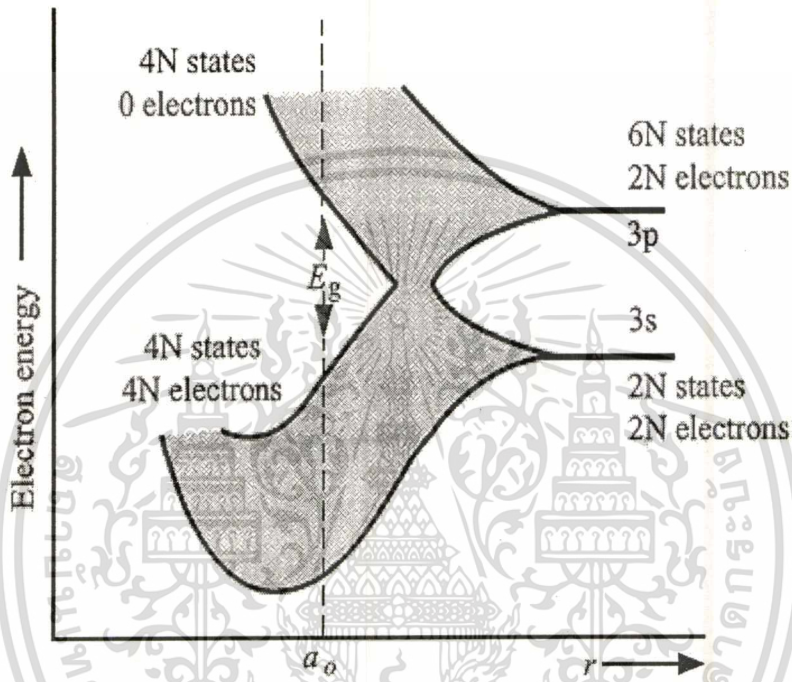


รูปที่ 2.6 แสดงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในกรณีที่มี 7 อะตอมถูกนำเข้ามาใกล้ชิดกัน [6]

และจากความเป็นจริงสำหรับผลึกของแข็งแล้ว จำนวนอะตอมที่มีปฏิกิริยาต่อกันนั้นมีค่ามากกว่า 2 หรือ 7 อะตอมตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นอยู่มาก เช่นอาจเป็น  $10^{22}$  อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และช่องว่างของแถบพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้มีค่าราวๆ 1 eV ดังนั้นระดับพลังงาน  $10^{22}$  ระดับเหล่านี้จะอยู่ใกล้ชิดกันมากจนคล้ายกับติดกันเป็นแถบพลังงาน ระดับพลังงานภายในแถบพลังงานนี้อาจเรียกว่า ระดับพลังงานต่อเนื่องได้

ในผลึกของแข็งระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนจะมีได้ จะปรากฏอยู่ในลักษณะเป็นแถบของพลังงาน (energy bands) ที่แยกจากกันด้วยบริเวณต้องห้าม ซึ่งหมายถึงระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนจะอยู่ไม่ได้ โดยในกรณีของผลึกซิลิกอน (Si) ซึ่งมีโครงรูปอิเล็กตรอน (electron configuration) คือ  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$  เมื่อนำอะตอมของซิลิกอนเข้ามาใกล้กันเพื่อก่อรูปเป็นผลึก ระดับพลังงาน  $3s$  และ  $3p$  ซึ่งเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกสุดก็จะเกิดการแตกแยกของระดับพลังงานขึ้น ดังที่ได้เคยกล่าวมาแล้ว เกิดเป็นแถบพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้ขึ้น และขณะที่ระยะห่างระหว่างอะตอมลดลงแถบพลังงานทั้งสองจะซ้อนกัน จนในที่สุดถ้าระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าลดลงต่อไปอีก แถบพลังงานที่ซ้อนกันอยู่ก็จะแยกออกเป็นสองแถบ โดยแถบพลังงานทั้งสองนี้จะอยู่แยกออกจากกันด้วยแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden gap) แต่โดยความเป็นจริงแล้วเราไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอะตอมได้อย่างต่อเนื่องตามที่เรากล่าวไว้ ที่เป็นเช่นนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

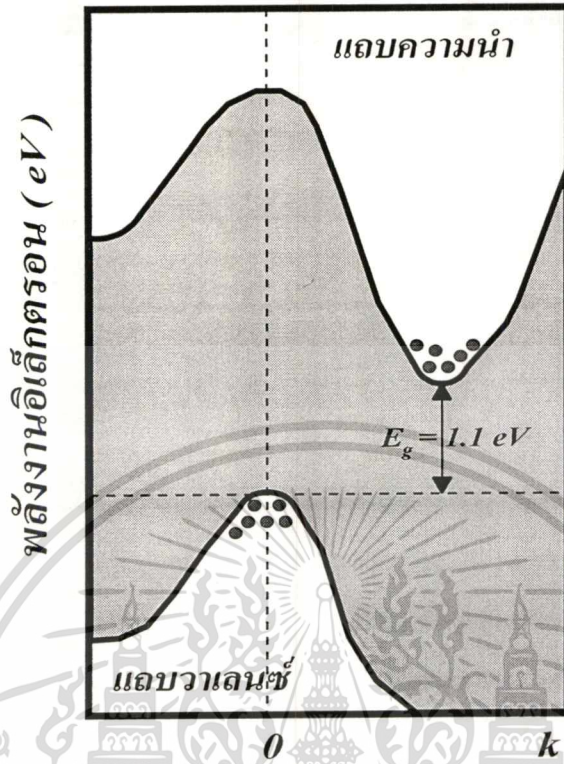
ก็เพราะว่าในผลึกของแข็งแต่ละชนิดจะมีค่าคงตัวแลตทิซ (lattice constant) ที่คงที่เปลี่ยนแปลงไม่ได้ ดังนั้น โครงสร้างของแถบพลังงานของผลึกของแข็งชนิดหนึ่งๆ ก็คือตำแหน่งหนึ่งๆบนแกน  $r$  นั้นเอง โดยสำหรับผลึกซิลิกอนแล้วค่าคงตัวแลตทิซที่  $r = a_0$  จะมีค่าเท่ากับ  $5.43 \text{ \AA}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการแตกแยกของระดับพลังงาน 3s และ 3p ของผลึกซิลิกอน ที่ตำแหน่งระยะห่างระหว่างอะตอมค่าต่างๆ [5]

พิจารณาจากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าโครงสร้างของแถบพลังงานจะประกอบด้วยแถบยินยอม (allowed band) ซึ่งเป็นแถบพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้อยู่ถึงสองแถบ ที่ถูกคั่นระหว่างกลางด้วยแถบต้องห้าม (forbidden gap) ซึ่งเป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนไม่สามารถอยู่ได้ โดยในสารกึ่งตัวนำ แถบยินยอมแถบล่างนี้จะเรียกว่า แถบวาเลนซ์ (valence band) ซึ่งเป็นแถบพลังงานที่มีอิเล็กตรอนอยู่เกือบเต็มทุกสถานะพลังงาน ส่วนแถบบนจะเรียกว่า แถบความนำ (conduction band) ซึ่งจะเป็นแถบพลังงานที่มีอิเล็กตรอนอยู่เพียงเล็กน้อย ส่วนแถบพลังงานต้องห้ามจะถูกเรียกว่า ช่องว่างพลังงาน (energy gap) โดยในผลึกซิลิกอนค่าของช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) จะมีค่าเท่ากับ  $1.14 \text{ eV}$  และมีโครงสร้างของแถบพลังงานในมิติของโมเมนตัม ( $k$ -space) จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงแผนภูมิแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนในมิติของ k-space [5]

จากภาพจะเห็นได้ว่าระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะอยู่ที่ตำแหน่ง wave number ที่  $k=0$  แต่ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำกลับอยู่ที่ตำแหน่ง  $k \neq 0$  เรียกว่าสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานในลักษณะเช่นนี้ว่า สารกึ่งตัวนำแบบ indirect-band gap ซึ่งการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงาน (transition) ของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบความนำ สำหรับสารกึ่งตัวนำแบบ indirect-band gap จะต้องอาศัยโฟนอนเข้าช่วย ทั้งนี้ก็เพื่อรักษาเงื่อนไขในการอนุรักษ์โมเมนตัมไว้ ซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติทางแสงของผลึกซิลิกอน โดยจะได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.2 ต่อไป

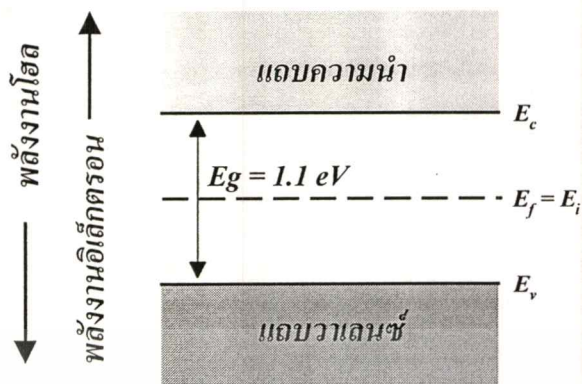
### 2.1.3 ชนิดของผลึกซิลิกอน

ผลึกซิลิกอนนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดใหญ่ๆ ได้คือ

#### 2.1.3.1 ซิลิกอนบริสุทธิ์ (Intrinsic Silicon)

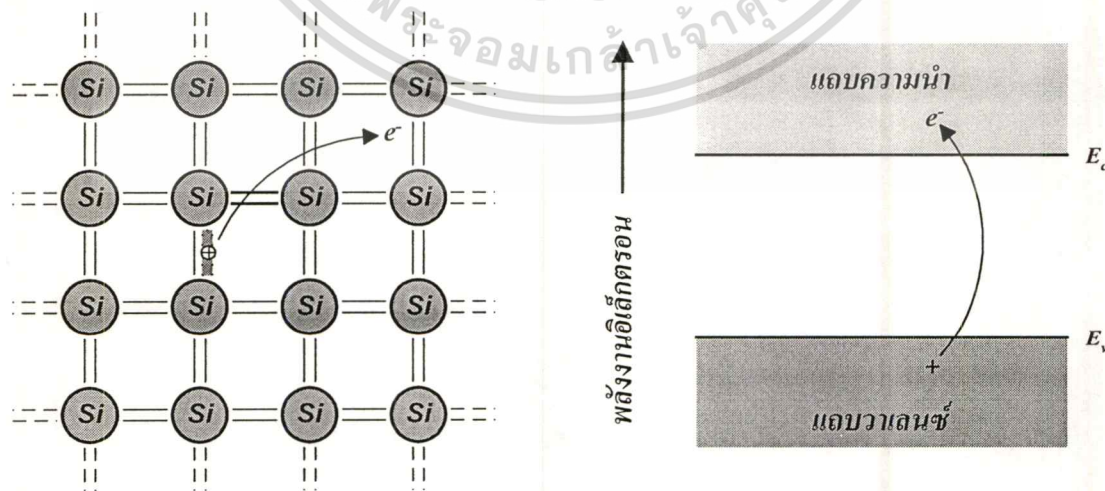
ผลึกซิลิกอนซึ่งไม่ได้ถูกเติมหรือเจือปนด้วยอะตอมของธาตุอื่น ที่ในบางครั้งนิยมเรียกว่า

อะตอมสารเจือ (impurity atom) จะมีลักษณะแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.9 ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะ โครงสร้างพลังงานของผลึกซิลิกอนบริสุทธิ์

จากภาพเป็นลักษณะ โครงสร้างพลังงานของซิลิกอนบริสุทธิ์ ที่ประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบความนำ และแถบพลังงานต้องห้าม โดยระดับพลังงานซึ่งแสดงเป็นเส้นตรงที่อยู่ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบความนำ คือ ระดับพลังงานเฟอร์มี โดยสำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิกอนบริสุทธิ์แล้ว ระดับพลังงานนี้จะถูกเรียกเป็นระดับพลังงานอินทรินซิก และเมื่อทำการพิจารณาแถบพลังงานของซิลิกอนบริสุทธิ์ การที่พันธะ โคเวเลนต์ถูกแตกออกเนื่องจากกระตุ้นด้วยพลังงานจากภายนอก นั่นก็คือการที่อิเล็กตรอนภายในแถบวาเลนซ์ ได้รับพลังงานจากภายนอกเพิ่มขึ้นมากพอที่จะเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในระดับพลังงานในแถบความนำ และจะทำให้เกิดที่ว่าง (โฮล) ขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายใน โครงสร้างแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของซิลิกอนบริสุทธิ์ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสภาพนำไฟฟ้าของซิลิกอนบริสุทธิ์จะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับจำนวนของอิเล็กตรอนในแถบความนำและโฮลในแถบวาเลนซ์ ซึ่งการเกิดประจุพาหะในซิลิกอนบริสุทธิ์จะเกิดได้เฉพาะในกรณีเท่านั้น และจำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นในแถบความนำ จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนจำนวนของโฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์ สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$n = p = n_i \quad (2.1)$$

โดยที่  $n$  = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ  
 $p$  = ความหนาแน่นของโฮล  
 $n_i$  = ความหนาแน่นอินทรินซิก

### 2.1.3.2 ซิลิกอนเจือปน (Extrinsic Silicon)

ซิลิกอนบริสุทธิ์หรือที่เรียกว่าอินทรินซิกซิลิกอนนั้น ตามความเป็นจริงแล้วจะถูกนำไปใช้งานเพื่อการสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้น้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกอนบริสุทธิ์มีสภาพความนำไฟฟ้าต่ำและมีค่าจำกัด โดยค่าความนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงได้ก็เฉพาะในกรณีที่ได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอกเช่น ความร้อนหรือแสง เป็นต้น ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มสภาพความนำไฟฟ้าให้แก่ผลึกซิลิกอนจึงมีการเติมอะตอมของธาตุอื่นเข้าไปในผลึกด้วย ผลึกซิลิกอนที่ถูกเจือปนด้วยอะตอมของธาตุเจือปน (impurity atom) ถูกเรียกว่า ซิลิกอนเจือปน หรือ เอ็กทรินซิกซิลิกอน ทำให้ผลึกซิลิกอนดังกล่าวมีคุณสมบัติที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการนำไปใช้สร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ

สำหรับอะตอมของธาตุที่นำมาใช้เป็นสารเจือปน (impurity) เติมลงไปในผลึกซิลิกอนบริสุทธิ์นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

#### 1. อะตอมธาตุเจือปนชนิดเอ็น (n-type impurity atom)

ได้แก่อะตอมของธาตุในกลุ่มที่ 5 ของตารางธาตุ เช่น ฟอสฟอรัส สารหนู พลวง เป็นต้น เมื่อเติมเข้าไปในผลึกซิลิกอนบริสุทธิ์แล้วจะทำให้ได้ผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น สามารถนำไฟฟ้าได้ดี โดยมีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากมาย อะตอมสารเจือชนิดเอ็นนี้จะถูกเรียกว่า อะตอมผู้ให้ (donor atom)

#### 2. อะตอมธาตุเจือปนชนิดพี (p-type impurity atom)

ได้แก่อะตอมของธาตุในกลุ่มที่ 3 ของตารางธาตุ เช่น โบรอน อะลูมิเนียม อินเดียม เป็นต้น เมื่อเติมเข้าไปในผลึกซิลิกอนบริสุทธิ์แล้ว จะทำให้ได้ผลึกซิลิกอนชนิดพี สามารถนำไฟฟ้าได้ดี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกจำนวนมากมาย อะตอมสารเจือชนิดพีนี้จะถูกเรียกว่า อะตอมผู้รับ (acceptor atom)

ส่วนซิลิกอนเจือปนที่ได้หลังจากการเติมอะตอมสารเจือแล้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

### 1. ผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น (n-type silicon)

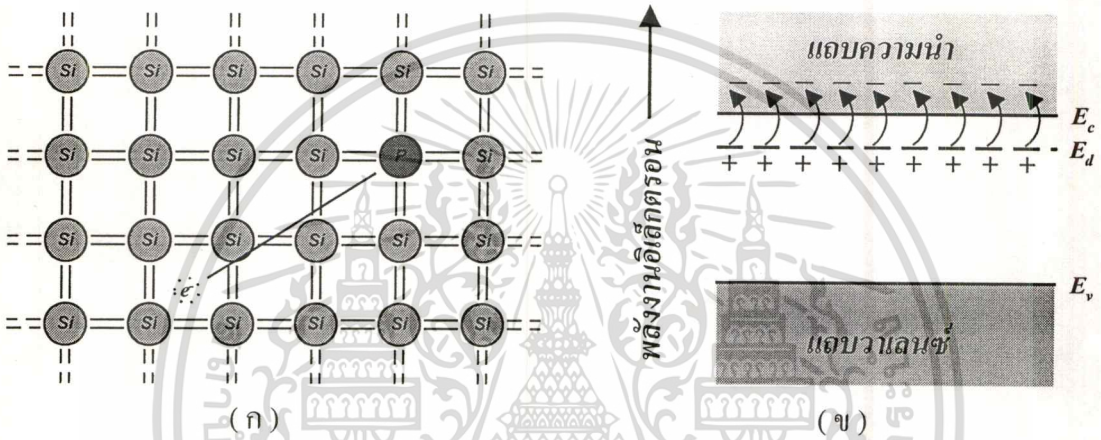
ได้แก่ผลึกซิลิกอนที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดเอ็น หรืออะตอมผู้ให้ เช่น อะตอมของ ฟอสฟอรัสซึ่งเป็นธาตุในกลุ่มที่ 5 ดังนั้นจึงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว เมื่ออะตอมถูกเติมเข้าไปในผลึกซิลิกอนก็จะไปเกาะเกี่ยวกับอะตอมข้างเคียงอีก 4 อะตอม ซึ่งอยู่รอบๆ เกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ขึ้น 4 พันธะ ดังนั้นจึงเหลือวาเลนซ์อิเล็กตรอนอีก 1 ตัว ซึ่งไม่มีพันธะจับอยู่ อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้จะอยู่ในอิทธิพลของนิวเคลียสด้วยแรงยึดเหนี่ยวเพียงเล็กน้อยเกือบจะเป็นอิสระ ดังนั้นที่อุณหภูมิห้องปกติพลังงานจากความร้อนก็สามารถทำให้อิเล็กตรอนดังกล่าวได้รับพลังงานและหลุดออกมาเป็นอิสระได้ เคลื่อนที่ไปมาได้อย่างเสรีกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระอยู่ในแถบความนำ และสามารถนำไฟฟ้าได้ ในสภาพเช่นนี้อะตอมของฟอสฟอรัสซึ่งสูญเสียอิเล็กตรอนไปก็จะกลายเป็นไอออนบวก นอกจากนี้ปรากฏการณ์พันธะแตกเนื่องจากพลังงานความร้อนก็จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในพันธะโควาเลนต์หลุดออกมาเป็นอิสระได้เช่นกัน และทิ้งให้เกิดโฮล ซึ่งเป็นประจุไฟฟ้าชนิดบวกเกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์ แต่ปริมาณโฮล และอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากพันธะแตกนี้จะมีจำนวนน้อย ดังนั้นในผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นนี้ จึงมีปริมาณของประจุพาหะอิเล็กตรอนที่มากกว่าโฮล ทำให้ผลึกซิลิกอนชนิดนี้จึงเสมือนนำไฟฟ้าได้ด้วยประจุพาหะชนิดลบ (Negative charge) ดังนั้นเราจึงเรียกผลึกซิลิกอนชนิดนี้ว่า ผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น (n : ย่อมาจาก negative) การเกิดอิเล็กตรอนอิสระเนื่องจากอะตอมสารเจือผู้ให้ และลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น แสดงได้ดังในรูปที่ 2.11 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

### 2. ผลึกซิลิกอนชนิดพี (p-type silicon)

ได้แก่ผลึกซิลิกอนที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดพี หรือที่เรียกว่า อะตอมผู้รับ เช่น อะตอมของโบรอน ซึ่งเป็นธาตุในกลุ่มที่ 3 ดังนั้นจึงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเพียง 3 ตัว เมื่ออะตอมสารเจือผู้รับถูกเติมเข้าไปในผลึกซิลิกอนก็จะไปเกาะเกี่ยวกับอะตอมของผลึกซิลิกอนที่อยู่ข้างเคียงอีก 4 อะตอม แต่อะตอมสารเจือชนิดนี้มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ดังนั้นจึงสามารถเกาะเกี่ยวและเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ได้เพียง 3 พันธะเท่านั้น ส่วนอีกหนึ่งพันธะไม่มีความสมบูรณ์เนื่องจากขาดอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในพันธะโควาเลนต์ใกล้ๆ มีโอกาสที่จะเข้าไปอยู่ในที่ดังกล่าวเพื่อทำให้เป็นพันธะที่สมบูรณ์ เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกไปจากพันธะโควาเลนต์ก็จะทิ้งให้เกิดโฮลขึ้นมา ดังนั้นแต่ละอะตอมของสารเจือผู้รับจะทำให้เกิดโฮลขึ้นมา โฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกสามารถนำไฟฟ้าได้ และอะตอมของสารเจือชนิดนี้ เมื่อได้รับอิเล็กตรอนเพิ่มเข้ามาก็จะเปลี่ยน

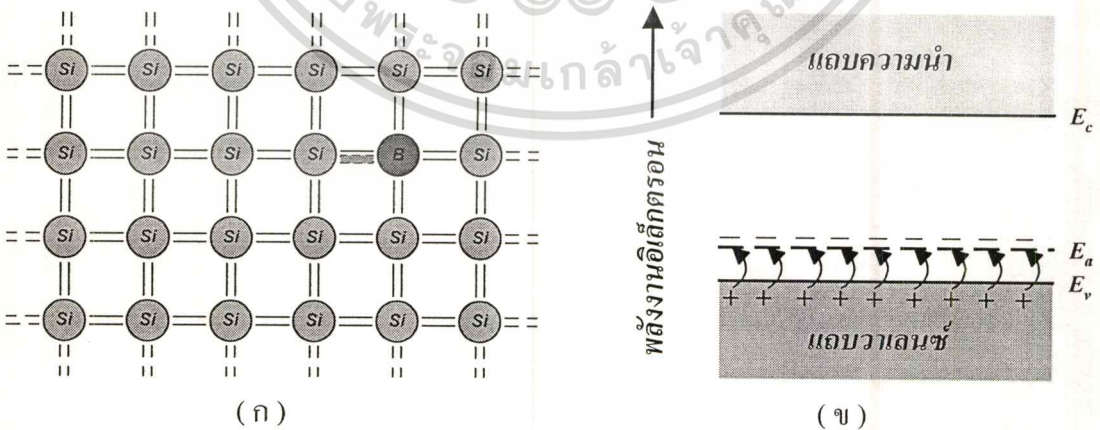
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพไปเป็นไอออนลบ และขณะเดียวกันอิเล็กตรอนและโฮลจำนวนเล็กน้อยก็สามารถเกิดขึ้นได้เช่นกัน เนื่องจากพลังงานจากความร้อนซึ่งทำให้พันธะแตกออก ดังนั้นในผลึกซิลิกอนชนิดพีจึงมีปริมาณของประจุพาหะโฮลมากกว่าจำนวนของอิเล็กตรอน และสามารถนำไฟฟ้าได้ด้วยประจุพาหะชนิดบวก (positive charge) เราจึงเรียกผลึกซิลิกอนชนิดนี้ว่า ผลึกซิลิกอนชนิดพี (p : ย่อมาจาก positive) การเกิดโฮลเนื่องจากอะตอมสารเจือผู้รับและลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนชนิดพีแสดงได้ดังในรูปที่ 2.12 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



รูปที่ 2.11 แสดง (ก) ลักษณะผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น

(ข) โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น



รูปที่ 2.12 แสดง (ก) ลักษณะผลึกซิลิกอนชนิดพี

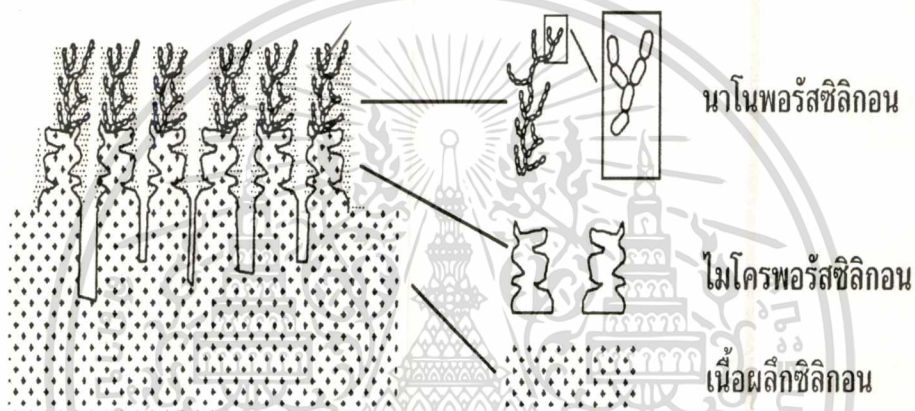
(ข) โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 พอร์สซิลิกอน

### 2.2.1 โครงสร้างของพอร์สซิลิกอน

พอร์สซิลิกอนนั้นคือผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยในชั้นความพรุนนี้ จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของผลึกซิลิกอนเล็กๆที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร อยู่ถึง 2 ชั้นด้วยกันโดยในแต่ละชั้นจะมีขนาดของโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงภาพจำลองโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอน [7]

จากภาพจะเห็นได้ว่าชั้นของพอร์สซิลิกอนจะประกอบไปด้วย

1. โครงสร้างของชั้นไมโครพอร์สซิลิกอน เป็นชั้นของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดของโครงสร้างที่ใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร ขึ้นไป โดยโครงสร้างในชั้นนี้จะเป็นส่วนที่อยู่ติดกับเนื้อของผลึกซิลิกอน
2. โครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน เป็นชั้นของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 10 นาโนเมตร ลงไป

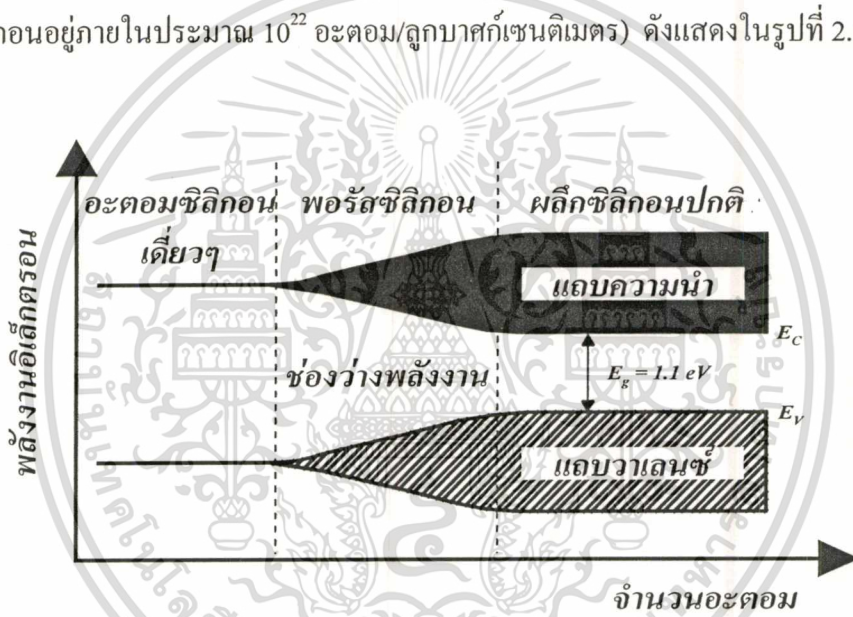
โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนทั้งสองนี้ เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี (electrochemical etching) ซึ่งได้ทำการอธิบายเอาไว้ ในหัวข้อกลไกในการเกิดโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอน นอกจากนี้แล้วจากการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน โดยเฉพาะในส่วนของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนยังพบต่อไปอีกว่า ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอนนั้นยังประกอบไปด้วยพันธะของ ซิลิกอนไฮไดรด์ (Si : H) หรือ ซิลิกอนออกซิไฮไดรด์ (Si : O : H)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิกอน

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อที่ 2.1.2 ถึงการเกิดแถบพลังงานของผลึกซิลิกอน เมื่ออะตอมของผลึกซิลิกอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จนเกิดการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงานภายในอะตอม ทำให้เกิดการแตกแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แตกแยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนของอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน ดังที่ได้แสดงมาแล้วในรูปที่ 2.6 จากหลักการนี้เองถ้าเราสามารถทำการลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ ก็จะทำให้ปฏิริยาระหว่างอะตอมที่มีต่อกันนั้นมีจำนวนลดลงด้วย ซึ่งจะไม่มีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนช่องว่างพลังงาน (band gap energy) ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิลิกอนเดิม (ซึ่งมีจำนวนอะตอมซิลิกอนอยู่ภายในประมาณ  $10^{22}$  อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 2.14



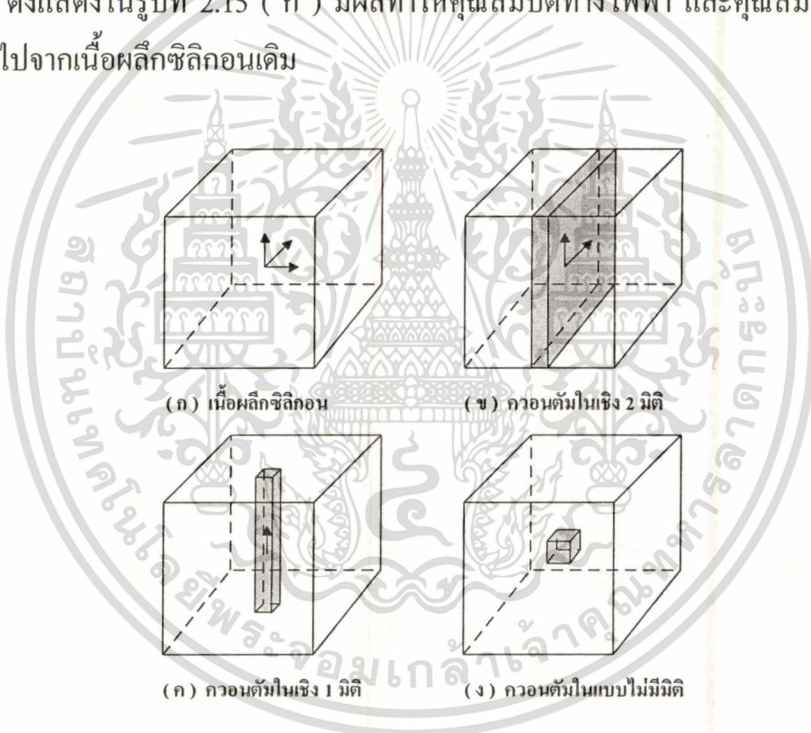
รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ [11]

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนมีค่าลดลง จะมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนลงนั้นสามารถทำได้โดยการลดหรือบีบขนาดโครงสร้างของผลึกซิลิกอนให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับของนาโนเมตร จนสามารถเกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม อันจะมีผลทำให้ลักษณะโครงสร้างทางช่องว่างพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกซิลิกอนเดิม เรียกปรากฏการณ์ลักษณะเช่นนี้ว่า Quantum size effect หรือ Quantum confinement effect ซึ่งค่าพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์นี้จะมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งาน  $\Delta E_{\text{การเคลื่อนที่}} + \text{ค่าเท่ากับ } \Delta E_{\text{ไม่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ (2:2) ค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้$

โดยที่	$E_q$	เป็นพลังงานที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ quantum confinement effect
	$\Delta E_c$	เป็นพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำเดิมของผลึกซิลิกอน
	$\Delta E_v$	เป็นพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงลดลงจากระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์เดิมของผลึกซิลิกอน

พาหะนำกระแสที่อยู่ภายใน โครงสร้างเล็กๆเหล่านี้ จะเสมือนว่าได้ถูกกักขังให้อยู่ภายในบริเวณที่มีเนื้อที่จำกัด ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาอย่างอิสระในแบบ 3 มิติ ได้เหมือนกับอยู่ในเนื้อผลึกซิลิกอนปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ( ก ) มีผลทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางแสงจะแตกต่างออกไปจากเนื้อผลึกซิลิกอนเดิม



รูปที่ 2.15 แสดงแบบจำลองลักษณะ โครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆ และทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะภายใน

ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมของพาหะนำกระแสจะถูกบีบหรือบังคับด้วยลักษณะและขนาดของโครงสร้างผลึก ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ปรากฏการณ์ quantum size effect หรือ quantum confinement effect สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ด้วยกันคือ

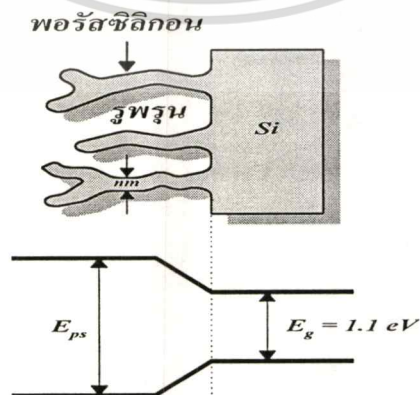
1. ควอนตัมในเชิง 2 มิติ (quantum well) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นชั้นที่มีความบางมากๆในระดับชั้นของโมเลกุล เช่น 30 - 50 ชั้นโมเลกุล ( $< 100 \text{ nm}$ ) พาหะนำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

กระแสที่ถูกกักขังให้อยู่ภายในโครงสร้างลักษณะเช่นนี้ จะถูกบีบหรือจำกัดทิศทางในการเคลื่อนที่โดยรวมให้สามารถเคลื่อนที่ไปมาใน โครงสร้างแบบ 2 มิติ เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ( ข )

2. ควอนตัมในเชิง 1 มิติ (quantum wire) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นเส้นหรือเสาแคบๆที่มีความหนาอยู่ในระดับของนาโนเมตร ( $< 10 \text{ nm}$ ) พาหะนำกระแสที่ถูกกักขังอยู่ใน โครงสร้างลักษณะเช่นนี้ จะถูกจำกัดทิศทางในการเคลื่อนที่โดยรวมให้สามารถเคลื่อนที่ไปมาใน โครงสร้างแบบ 1 มิติ หรือเพียงทิศทางเดียวตามความยาวของโครงสร้างที่เป็นเส้นหรือเสานี้เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ( ค ) ซึ่งลักษณะช่องว่างพลังงานของโครงสร้าง 1 มิติแบบนี้ จะมีขนาดที่กว้างกว่าช่องว่างพลังงานของโครงสร้างแบบ 2 มิติ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างในลักษณะแบบนี้จะมีขนาดที่เล็กกว่า และมีจำนวนอะตอมที่อยู่ภายในที่น้อยกว่าในโครงสร้างแบบ 2 มิติ นั่นเอง

3. ควอนตัมในแบบไม่มีมิติ (quantum dot) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นจุดที่มีขนาดเล็กมากๆ ( $< 1 \text{ nm}$ ) โดยพาหะนำกระแสที่ถูกกักขังให้อยู่ภายในโครงสร้างลักษณะแบบนี้ ในทางอุดมคติแล้วจะถูกจำกัดทิศทางในการเคลื่อนที่อย่างสมบูรณ์ ให้อยู่ภายในโครงสร้างในแบบที่ไม่มีมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ( ง ) อะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างจุดเล็กๆเหล่านี้จะมีจำนวนที่น้อยกว่าในโครงสร้างสองแบบแรก มีผลทำให้ขนาดช่องว่างพลังงานของโครงสร้างที่เป็นจุดนี้จะมีค่าที่กว้างที่มากกว่าในโครงสร้างสองแบบแรกด้วย

เมื่อย้อนกลับมาพิจารณาถึง โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอน เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเส้นหรือเสาแคบๆที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2.1 ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน จึงจัดอยู่ในประเภทควอนตัม 1 มิติ หรือ Quantum wire นั่นเอง โดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งความกว้างของช่องว่างพลังงาน ( $E_{ps}$ ) มีค่าขึ้นอยู่กับขนาด โครงสร้างนาโนเมตรของพอร์สซิลิกอน



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิกอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

การกักร่อนของสสารใดๆสามารถนิยามได้ว่าเป็นความเสื่อมโทรมของสสาร เนื่องจากการทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นการเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และมักจะเริ่มจากผิวนอกของสสารนั้นเสมอ โดยขบวนการทางไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่มีการถ่ายเทของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นภายในระบบ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) เป็นปฏิกิริยาที่อะตอมของสสารมีการสูญเสียอิเล็กตรอนเกิดขึ้น ดังตัวอย่างเช่น สาร M มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ n คือมีอิเล็กตรอน n อนุภาค โคจรอยู่ในวงนอกสุดของอะตอม สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดังนี้คือ



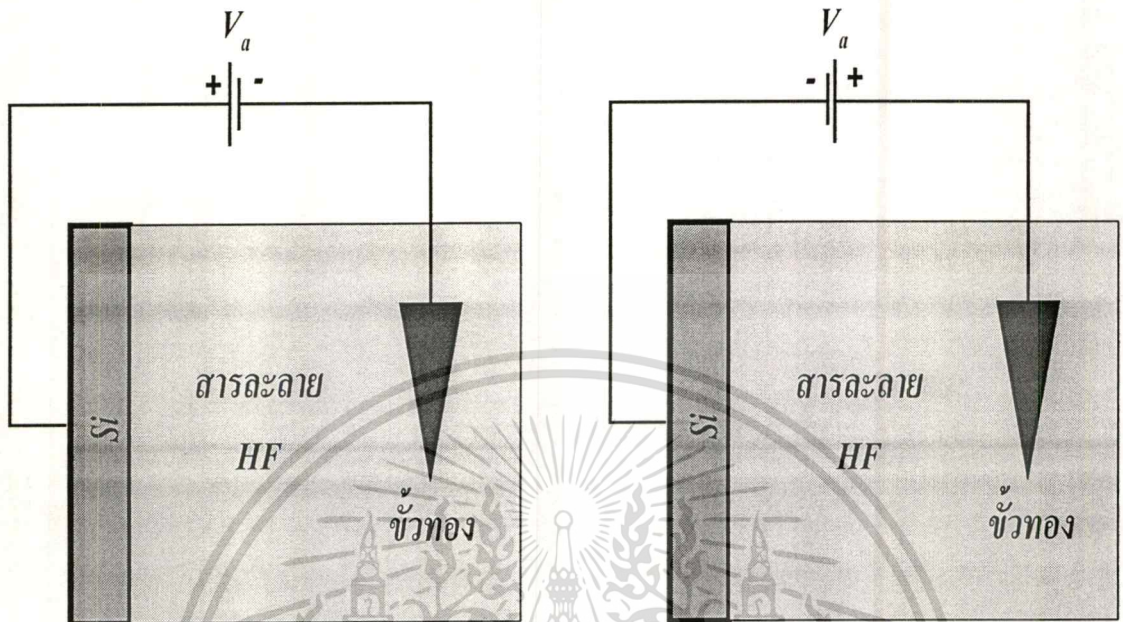
โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แอโนด (anode) ดังนั้นปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงอาจเรียกเป็นปฏิกิริยาแอโนดิก (anodic reaction) ได้

2. ปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) เป็นปฏิกิริยาที่อิเล็กตรอนที่เกิดจากแต่ละอะตอมของสสารชนิดหนึ่งถูกถ่ายเทและเข้าร่วมเป็นส่วนหนึ่งของสสารอีกชนิดหนึ่ง ดังตัวอย่างเช่น ไอออนของโลหะในสารละลาย ปฏิกิริยารีดักชันสามารถเกิดขึ้นได้ดังนี้คือ



โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แคโทด (cathode) ดังนั้นปฏิกิริยารีดักชันจึงอาจเรียกเป็นปฏิกิริยาแคโทดิก (cathodic reaction) ได้

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปฏิกิริยาทั้งระบบแล้ว ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะต้องประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันอย่างละหนึ่งปฏิกิริยาเป็นอย่างน้อย ดังเช่นในระบบของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ประกอบด้วยสาร 2 ชนิด ที่ต่อกันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยสารอันหนึ่งจะเป็นแอโนด หรือสารที่ถูกกัด ส่วนสารอีกชนิดหนึ่งจะเป็นแคโทด



(ก) anodic bias

(ข) cathodic bias

รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่างๆ

พิจารณาเซลล์ไฟฟ้าเคมีในรูปที่ 2.17 ทางด้านซ้ายจะเป็นขั้วไฟฟ้าของผลึกซิลิกอน (Si) ซึ่งจะถูกจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยในที่นี้ได้แก่สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ส่วนทางด้านขวาจะเป็นขั้วไฟฟ้าของทอง (Au) ซึ่งเป็นขั้วอิเล็กโทรดที่ถูกจุ่มอยู่ในสารละลายกรดเช่นกัน จากรูปจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกันคือ

#### 1. การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิก (anodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของผลึกซิลิกอนจะอยู่ทางขั้วบวก ส่วนขั้วไฟฟ้าของทองจะอยู่ทางขั้วลบ การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ผลึกซิลิกอนจะเป็นขั้วแอโนด มีผลทำให้ผลึกซิลิกอนสามารถถูกกัดได้

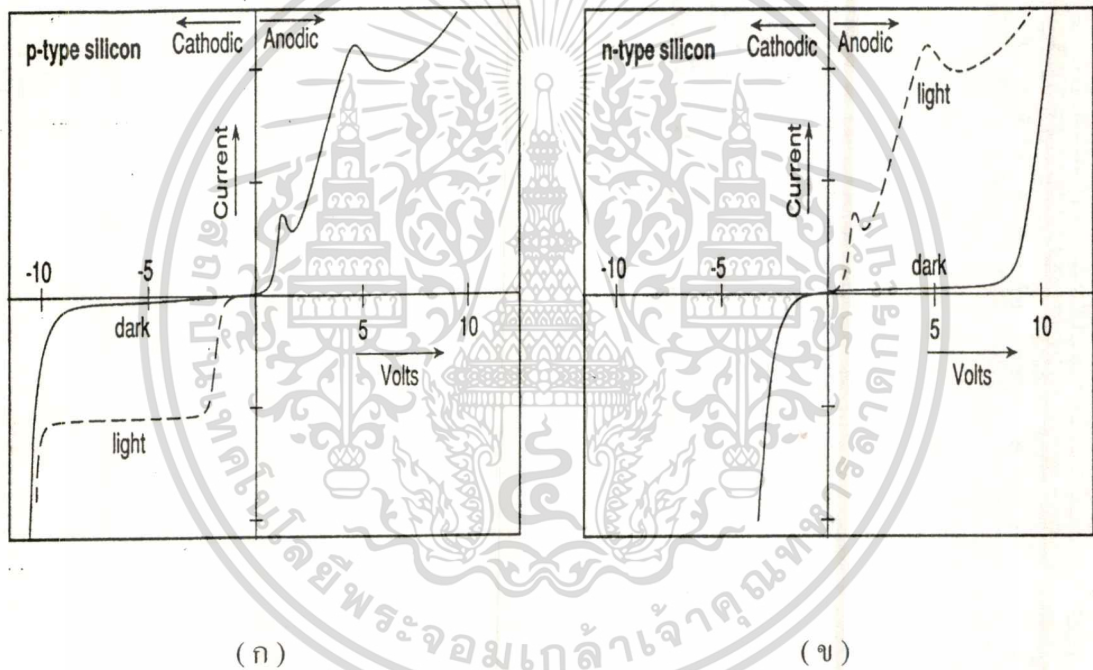
#### 2. การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแคโทดิก (cathodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของผลึกซิลิกอนจะอยู่ทางขั้วลบ ส่วนขั้วไฟฟ้าของทองจะอยู่ทางขั้วบวก การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ผลึกซิลิกอนจะเป็นขั้วแคโทด ทำให้ไม่เกิดการกัดผลึกซิลิกอนขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้สำหรับสร้างชั้นพอร์ตซิติคอนมีลักษณะและพฤติกรรมเป็นแบบชอตต์กีไดโอด (Schottky diode) ที่เกิดขึ้นจากการสัมผัส (interface) กันระหว่างวัสดุสองชนิด คือ ผลึกซิติคอนกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งในที่นี้ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ระหว่างผลึกซิติคอนชนิดพีและเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ที่ภายใต้เงื่อนไขในการถูกฉายแสงและไม่ถูกฉายแสง ว่ามีลักษณะความสัมพันธ์แตกต่างกันอย่างไร



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างผลึกซิติคอน (ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก [12]

จากรูปข้างต้นจะแสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ระหว่างผลึกซิติคอนชนิดพีและเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีอยู่สองลักษณะด้วยกัน คือ การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ anodic bias และแบบ cathodic bias สำหรับผลึกซิติคอนชนิดพี การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ anodic bias ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้ จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการไบอัสแบบไปหน้า (forward bias) ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบ cathodic bias ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะเหมือนกับการไบอัสแบบไปหลัง (reverse bias) ไม่พียงเท่านั้น แต่ยังมีความสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีอีกด้วย ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบย้อนกลับ (reverse bias) โดยจะมีกระแสรั่วซึ่งเกิดขึ้นจากผลของพาหะส่วนน้อยภายในผลึกซิลิกอนชนิดพี และจากผลของการฉายแสง (photocurrents) เช่นเดียวกันกับไดโอดทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ( ก ) ส่วนในผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับผลึกซิลิกอนชนิดพี โดยการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ anodic bias สำหรับผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ cathodic bias ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเดียวกันกับการไบอัสแบบไปหน้า (forward bias) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ( ข )

จากลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันไฟฟ้าทั้งสองแบบ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้ถูกทำการสรุปลักษณะที่สำคัญๆเอาไว้ในตารางที่ 2.1

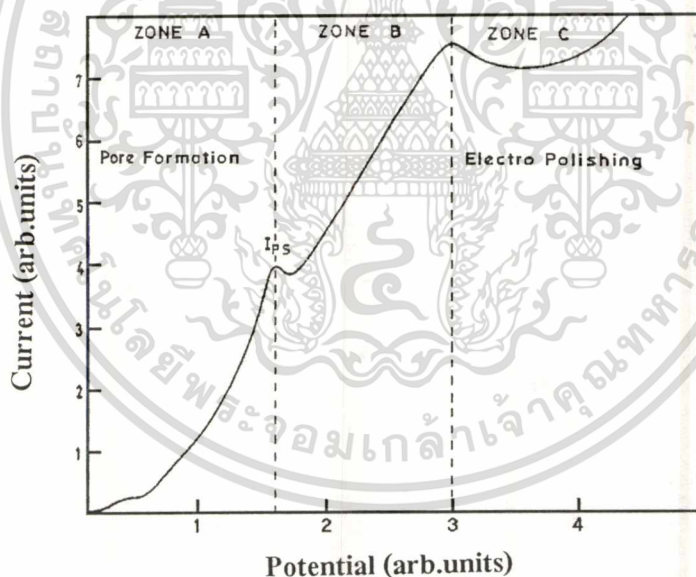
ตารางที่ 2.1 สรุปลักษณะสำคัญๆที่เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน [12]

ชนิดของผลึกซิลิกอน	ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมี	
	แบบ Cathodic bias	แบบ Anodic bias
ชนิดพี	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ เนื้อของผลึกซิลิกอนจะไม่ถูกกัด</li> <li>■ ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Reverse-biased Schottky</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ เนื้อของผลึกซิลิกอนถูกกัด โดย               <ul style="list-style-type: none"> <li>- จะเกิด โครงสร้างของพอร์ตซิลิกอนที่ สักดาไฟฟ้าต่ำๆ</li> <li>- จะเกิดการกัดผิวหน้าของผลึกซิลิกอน ที่สักดาไฟฟ้ามีค่าสูงๆ</li> </ul> </li> <li>■ ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Forward-bias Schottky</li> </ul>
ชนิดเอ็น	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ เนื้อของผลึกซิลิกอนจะไม่ถูกกัด</li> <li>■ ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Forward-biased Schottky</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ เนื้อของผลึกซิลิกอนจะถูกกัดก็ต่อเมื่อทำการฉายแสง โดย               <ul style="list-style-type: none"> <li>- จะเกิด โครงสร้างของพอร์ตซิลิกอน ที่สักดาไฟฟ้าต่ำๆ</li> <li>- จะเกิดการกัดผิวหน้าของผลึกซิลิกอน ที่สักดาไฟฟ้ามีค่าสูงๆ</li> </ul> </li> <li>■ ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Reverse-biased Schottky</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั้งสองลักษณะมีพฤติกรรมเป็น rectifying เหมือนกัน โดยในการเกิดพอร์ซิลิกอนจะเกิดขึ้นเฉพาะเงื่อนไขในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบ anodic bias เท่านั้น ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ cathodic bias จะไม่เกิดพอร์ซิลิกอนขึ้นไม่ว่าชนิดของผลึกซิลิกอนจะเป็นชนิดพีหรือชนิดเอ็นก็ตาม โดยในส่วนของผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ anodic bias นั้น เป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) ดังนั้นในระหว่างการ anodic bias จึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงลงบนผิวด้านหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นด้วย ทั้งนี้ก็เพื่อทำให้เกิดพาหะส่วนน้อย (โฮล) ขึ้นภายในผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น โดยโฮลจะเป็นตัวการที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในกลไกในการเกิดพอร์ซิลิกอน ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.4 ต่อไป

จากการพิจารณาลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี เฉพาะในส่วนที่มีการไบอัสแบบ anodic bias ของทั้งผลึกซิลิกอนชนิดพี และชนิดเอ็น (ที่ได้ทำการฉายแสงขณะไบอัส) พบว่ามีลักษณะความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี  
ในส่วนที่มีการไบอัสแบบ anodic bias [12]

จากรูปข้างต้นลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวจะประกอบไปด้วยยอดกราฟอยู่ 2 จุด ด้วยกัน โดยยอดกราฟทั้งสองจุดนี้จะเป็นตัวชี้และแบ่งแยกบริเวณที่มีลักษณะการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณ A , B และ C ตามลำดับ โดยในบริเวณ A (Porous Silicon Formation Regions) จะเป็นบริเวณที่เนื้อของผลึกซิลิกอนจะถูกกัดเป็น  
แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูพรุนขนาดเล็กๆ ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนขึ้นมาก็ต่อเมื่อค่ากระแส (I) ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าของกระแสสูงสุดที่ยอดกราฟแรก (Ips) ส่วนในบริเวณ B (Transition Regions) ที่อยู่ถัดมาจะเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน จากลักษณะการกัดที่ทำให้เกิดโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนไปสู่ลักษณะการกัดแบบขัดผิวหน้า ซึ่งอยู่ในบริเวณ C (Electropolishing Regions) โดยโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนที่เกิดขึ้นในบริเวณ B นี้จะมีลักษณะเป็นรูพรุนเช่นเดียวกับพอร์สซิลิกอนที่เกิดขึ้นในบริเวณแรก แต่จะมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนที่ใหญ่กว่าและสามารถเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนเข้าสู่การกัดในลักษณะแบบขัดผิวหน้า (Electropolishing) ณ ตำแหน่งที่ค่าของกระแสมีค่าสูงสุดที่ยอดกราฟที่สอง และเมื่อพิจารณาจากยอดกราฟทั้งสองจุดในรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มค่าความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีให้มีค่ามากขึ้นจนกระแสภายในเซลล์ไฟฟ้ามีค่าสูงสุดแล้ว หลังจากนั้นกระแสก็จะเริ่มมีค่าลดลงทั้งนี้ก็เนื่องมาจากเกิดปรากฏการณ์ Negative Impedance ขึ้น โดย

#### ในส่วนนของยอดกราฟแรก

สำหรับผลึกซิลิกอนชนิดพี จะเป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์ Quantum Size Effect ขึ้นภายในโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน มีผลทำให้ช่องว่างพลังงานภายในมีความกว้างมากขึ้นกว่าเดิมได้ จนกระทั่งทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างส่วนนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในของชั้นพอร์สซิลิกอนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งนำไปสู่การที่กระแสมีค่าลดลง

สำหรับผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น จะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นรอบๆ โครงสร้างของพอร์สซิลิกอน และเมื่อโครงสร้างของพอร์สซิลิกอนมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนบริเวณปลอดพาหะนำกระแส สามารถครอบคลุมโครงสร้างของพอร์สซิลิกอนได้ทั้งหมด มีผลทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในชั้นพอร์สซิลิกอนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยกลไกทั้งหมดนี้จะทำการกล่าวถึงอย่างละเอียดในหัวข้อ 2.4.3 ต่อไป

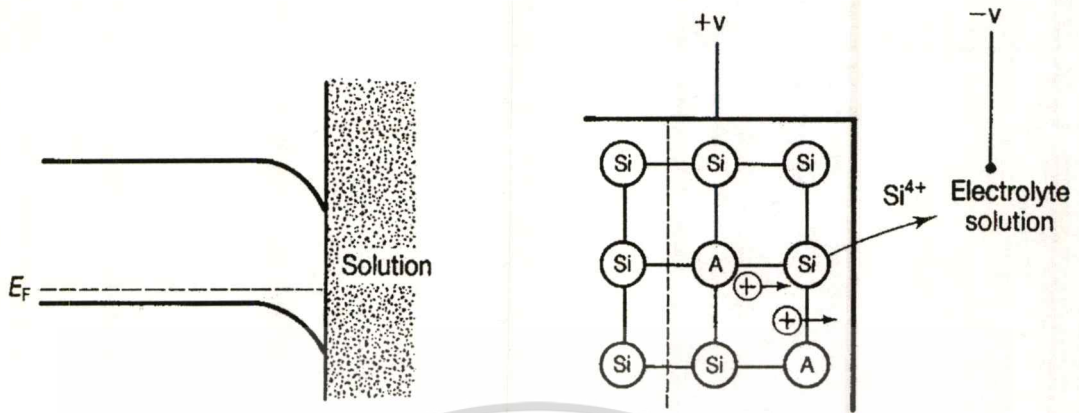
#### ส่วนในยอดกราฟที่สอง

ซึ่งอยู่ระหว่างบริเวณ transition region กับ electropolishing region การที่กระแสมีค่าลดลงเป็นผลมาจากการเกิดอ็อกไซด์ขึ้นที่บริเวณผิวของพอร์สซิลิกอนในระหว่างกระบวนการกัดนั่นเอง

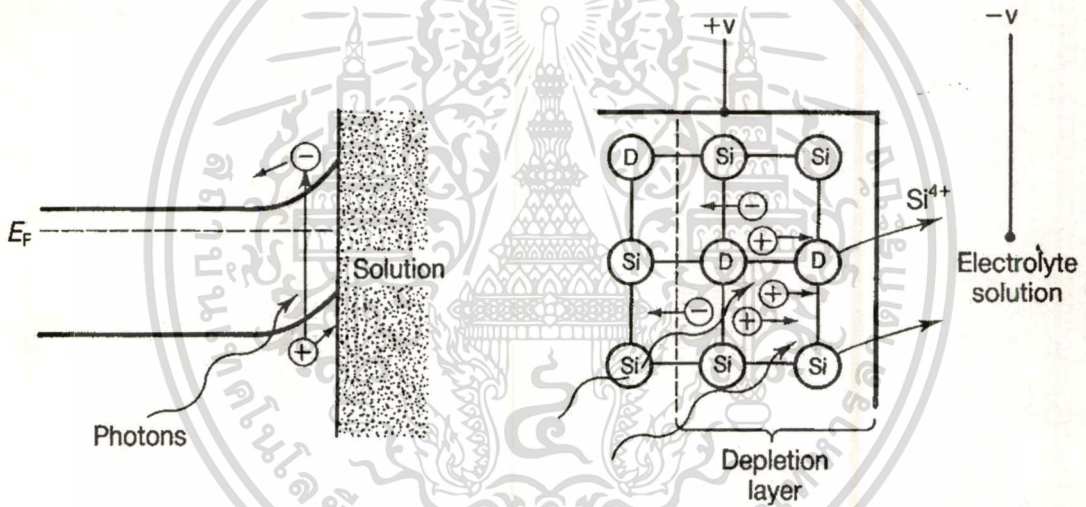
### 2.3.2 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

จากที่ได้กล่าวมาในหัวข้อข้างต้น เป็นที่ทราบกันแล้วว่าที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี จะมีลักษณะเป็นแบบ Schottky interface โดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



( ก )



( ข )

รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอน  
( ก ) ชนิดพี และ ( ข ) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก [13]

จากรูปภาพข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีการโค้งงอของแถบพลังงานเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดย

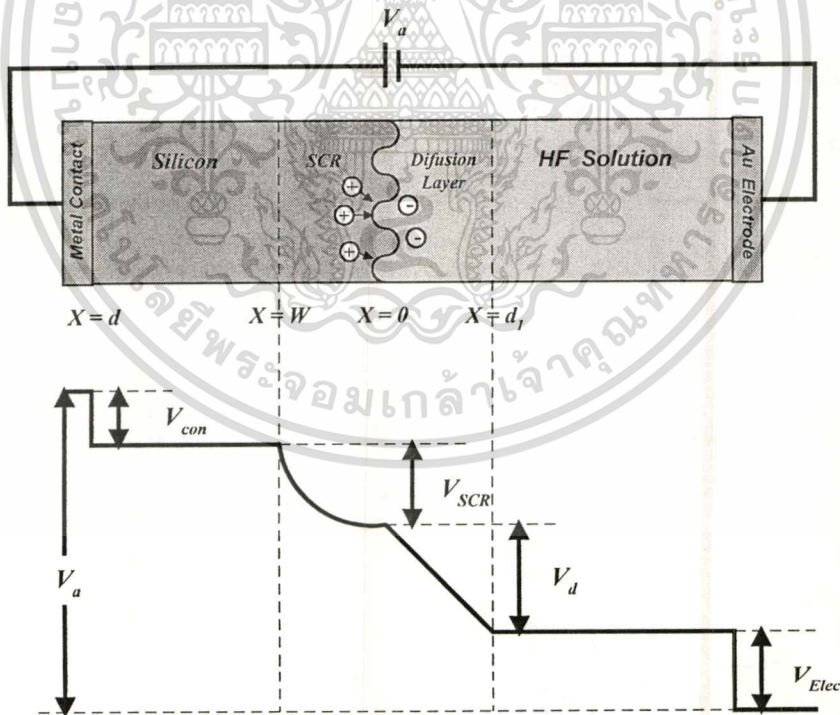
ในผลึกซิลิกอนชนิดพี การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ.บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอลง ซึ่งภายใต้การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ anodic bias กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านผิวสัมผัสได้ เนื่องจากการไบอัสแบบไปหน้า ทำให้เกิดกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนอย่างต่อเนื่องขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ( ก )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอขึ้น โดยการโค้งงอจะมีค่ามากขึ้นกว่าเดิมเมื่อผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นอยู่ภายใต้การไบอัสแบบ anodic bias ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านกำแพงศักย์ไปที่ผิวสัมผัสได้ ทำให้ไม่เกิดกระบวนการการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ดังนั้นในระหว่างการ anodization จึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงให้แก่ผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ทั้งนี้ก็เพื่อเพิ่มจำนวนพาหะนำกระแสขึ้นภายในผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ข)

2.3.3 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี [14]

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดแบบ porous etching จะประกอบด้วยผลึกซิลิกอน ซึ่งถูกจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยมีการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะ anodic bias ซึ่งมีผลทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสต่างๆภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะมีศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกัน และมีการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่างๆภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยที่  $d$  เป็นความหนาของผลึกซิลิกอน ,  $W$  เป็นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (Space Charge Region : SCR) ส่วน  $d_1$  เป็นความกว้างของบริเวณ diffusion layer ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก [14]

จากภาพจะเห็นได้ว่ามีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณต่างๆภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังนี้คือ

■ ในเนื้อของผลึกซิลิกอน จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

1. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณข้อสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับผลึกซิลิกอน ( $V_{con}$ )
2. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณปลดพาหะนำกระแส ( $V_{SCR}$ )

■ ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

3. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณข้อสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ( $V_{Elec}$ )
4. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ diffusion layer ( $V_d$ )

ถ้าให้  $V_a$  เป็นศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมี เราสามารถเขียนสมการศักดาไฟฟ้าวรวมของระบบได้ดังนี้คือ

$$V_a = V_d + V_{SCR} + V_{con} + V_{Elec} \quad (2.5)$$

ศักดาไฟฟ้า  $V_{con}$  กับ  $V_{Elec}$  ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีเงื่อนไขในการสร้างชั้นของพอร์ตซิลิกอนแบบเดียวกัน จะมีค่าคงที่เสมอ ดังนั้นจึงทำให้สมการที่ (2.5) สามารถเขียนได้เป็น

$$V_a = V_d + V_{SCR} + \text{Constant} \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.6) จะเห็นได้ว่าศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ diffusion layer ( $V_d$ ) กับศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ Space-charge region ( $V_{SCR}$ ) จะเป็นตัวแปรที่สำคัญภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมพาหะและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดย

ในผลึกซิลิกอนชนิดพี เนื่องจากการไบอัสแบบไปหน้า (forward bias) ทำให้ไม่เกิดบริเวณ Space charge region ขึ้นในผลึกซิลิกอน ดังนั้นศักดาไฟฟ้าหลักที่ตกคร่อมอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีก็คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ diffusion layer ( $V_d$ ) นั่นเอง โดย  $V_d$  นี้จะควบคุมอิออนลบของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกตรงบริเวณ diffusion layer

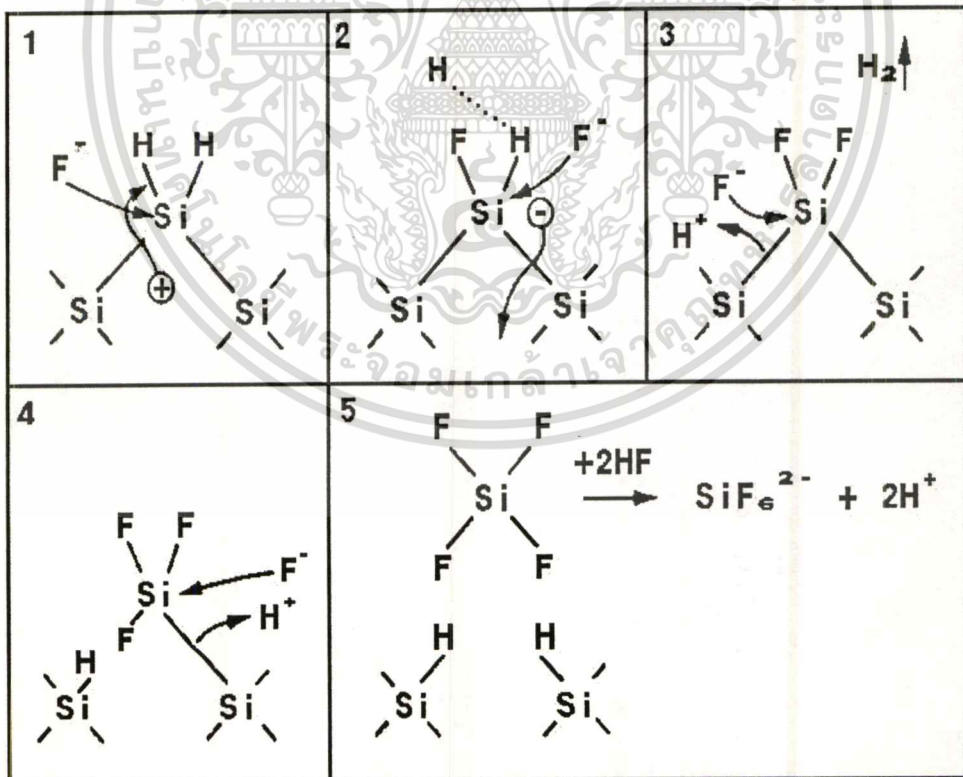
ในผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น เนื่องจากการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) ทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นเกิดบริเวณ Space charge region (SCR) ขึ้น และเกิดศักดาไฟฟ้า ( $V_{SCR}$ ) ตกคร่อมบริเวณนี้ โดย Space charge region นี้จะเป็นตัวควบคุมพาหะนำกระแสภายในผลึกซิลิกอน ซึ่งจะมีผลต่อปฏิกิริยาเคมีในการกัดและ โครงสร้างของพอร์ตซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 กลไกในการเกิดพอร์สซิลิกอน

### 2.4.1 ปฏิริยาเคมีในการกัดที่ผิวของผลึกซิลิกอน

เพื่อที่จะเข้าใจถึงกลไกในการเกิดพอร์สซิลิกอน ก่อนอื่นจำเป็นที่จะต้องทราบถึงปฏิริยาเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน ที่อยู่ภายใต้การไบอัสแบบ anodic bias ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าในสภาวะปกติเมื่อทำการจุ่มผลึกซิลิกอนลงไป ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกผิวหน้าของผลึกซิลิกอนจะไม่ถูกสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกกัดแต่อย่างใด แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ผลึกซิลิกอนถูกนำมาอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีการไบอัสแบบ anodic bias แล้ว ผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ เกิดเป็นชั้นของพอร์สซิลิกอนขึ้นมา โดยปฏิริยาเคมีและขั้นตอนในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปข้างต้นแสดงให้เห็นถึงกลไกในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน ที่ทำให้เกิดชั้นของ พอร์ซซิลิกอนขึ้นมา เริ่มต้นจากชั้นตอนแรกเมื่อยังไม่มีกระแสไบอัสแบบ anodic bias ซึ่งเป็นกระบวนการในการป้อนศักดาไฟฟ้าขั้วบวกให้กับขั้วแอโนด (Si) ที่บริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิกอนจะมี อะตอมของไฮโดรเจนปกคลุมอยู่เต็ม มีผลทำให้อิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไม่สามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอมได้ (Si - H) แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่มีการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบ anodic bias โดยมีการป้อนศักดาไฟฟ้าขั้วบวกให้แก่ขั้วแอโนด (Si) จนพาหะโฮลสามารถเคลื่อนที่มาถึงบริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายกรด ไฮโดรฟลูออริก จะมีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่ผิวสามารถถูกทำลายได้โดยอิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรด เกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับฟลูออรีน (Si - F) ขึ้นมาแทนดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 1 และเนื่องจากอิทธิพลในการ polarizing ของพันธะฟลูออรีนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรก ส่งผลทำให้อิออนของฟลูออรีน (F<sup>-</sup>) อีกตัวที่อยู่ในสารละลายกรดสามารถที่จะเข้าทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอม (Si - H) ที่ยังคงเหลืออยู่อีกข้างหนึ่งได้ พร้อมกับเกิดโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และมีการปล่อยพาหะอิเล็กตรอน 1 ตัวไปยังขั้วแอโนด ดังแสดงในขั้นตอนที่ 2 และ 3 ต่อจากนั้นก็เกิดการเหนี่ยวนำวาเลนซ์อิเล็กตรอน (polarization induced) โดยกลุ่มของพันธะเคมีซิลิกอนกับฟลูออรีน (Si - F groups) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 และ 3 มีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับซิลิกอนที่อยู่ถัดเข้ามา มีความแข็งแรงลดลง ทำให้พันธะเคมีดังกล่าวสามารถที่จะถูกทำลายได้โดยอิออนของฟลูออรีน เกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับฟลูออรีนขึ้นมาแทน ดังแสดงในขั้นตอนที่ 3 และ 4 จากขั้นตอนนี้เองจะเห็นได้ว่าอะตอมของซิลิกอนจะถูกดึงให้หลุดออกมาจากผิวหน้าของผลึกซิลิกอน พร้อมกับการเกิดพันธะเคมีระหว่างไฮโดรเจนกับซิลิกอนอะตอมที่อยู่ถัดเข้ามา ดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 5

ส่วนปฏิกิริยาเคมีในการกัดที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้คือ [15]



จากสมการที่ (2.8) และ (2.9) สามารถเขียนสมการปฏิกิริยาเคมีรวม ใหม่ได้เป็น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการปฏิกิริยาเคมีที่แสดงข้างต้น เริ่มต้นจากปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ ( 2.7 ) ที่มีผลึกซิลิกอน (Si) เป็นสารเริ่มต้น อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดยในปฏิกิริยาเคมีนี้จำเป็นที่จะต้องอาศัยไฮดรอกซิลในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจะทำให้เกิด  $\text{SiF}_2$  ขึ้นที่บริเวณผิวของผลึกซิลิกอน ต่อจากนั้นก็เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง  $\text{SiF}_2$  กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ดังแสดงในสมการที่ ( 2.8 ) ได้ผลลัพธ์เป็น  $\text{SiF}_4$  หลุดออกมาจากผิวของผลึกซิลิกอน ในระหว่างกระบวนการกัดขั้นตอนนี้เอง สังเกตดูได้ว่าจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) ขึ้นที่ผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่ถูกกัด ท้ายสุดก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง  $\text{SiF}_4$  กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะได้ผลลัพธ์สุดท้ายก็คือสารละลาย  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกนั่นเอง ดังแสดงในสมการที่ ( 2.9 )

#### 2.4.2 การเกิดรูพรุนของพอร์สซิลิกอน

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ผลึกซิลิกอนเมื่ออยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) จะไม่ถูกสารละลายกัดแต่อย่างใด แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ทำการป้อนกระแสไฟฟ้าในลักษณะแบบ anodic bias แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมี ให้กระแสไหลผ่านรอยสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดทางไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้น โดยลักษณะการกัดทางไฟฟ้าเคมีจะมีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกันคือ

##### ■ แบบ electropolishing

##### ■ แบบ porous etching

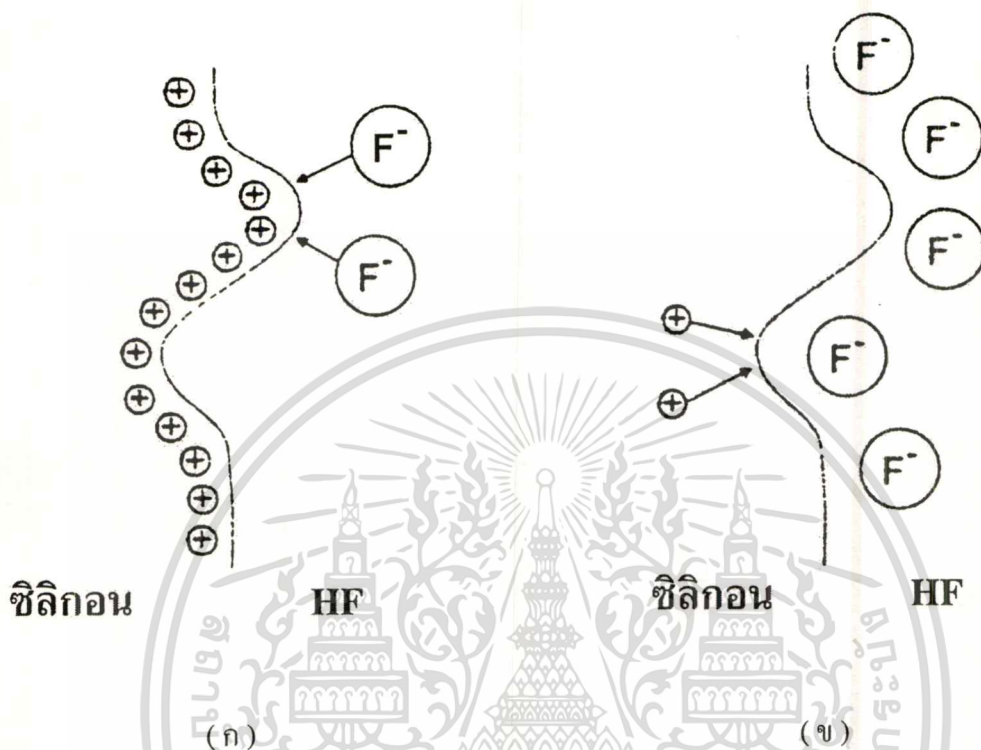
ทั้งสองแบบมีลักษณะการกัดที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในระหว่างการ anodization โดยประจุพาหะชนิดบวก (โฮล) จะเป็นตัวที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อกระบวนการกัดทั้งสองลักษณะ กล่าวคือ

##### 2.4.2.1 การกัดแบบ electropolishing

การกัดในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำการป้อนความหนาแน่นกระแสให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมีในปริมาณสูงๆ ( $J > J_{ps}$ ) ซึ่งจะทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิกอนมีปริมาณของพาหะโฮลสะสมอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้การกัดที่เกิดขึ้นจะถูกจำกัดโดยอ็อกซิเจนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรด โดยอ็อกซิเจนฟลูออรีนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า ดังนั้นถ้าผิวของผลึกซิลิกอนมีส่วนที่ยื่นออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.23 (ก) จะมีผลทำให้ที่บริเวณปลายสุดของส่วนที่ยื่นออกมามีปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะดึงเอาอ็อกซิเจนของฟลูออรีนเข้ามาทำปฏิกิริยาเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนที่บริเวณปลายสุดที่ยื่นออกมาเป็นจำนวนมาก มีผลทำให้ส่วนที่ยื่นออกมาถูกกัดจนเรียบ ดังนั้นจึงเรียกการกัดในลักษณะเช่นนี้ว่า การขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า (electropolishing) นั่นเอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นกระแสสูงๆ

ความหนาแน่นกระแสต่ำๆ



รูปที่ 2.23 แสดงแบบจำลองการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนทั้งสองลักษณะ โดยที่ [15]

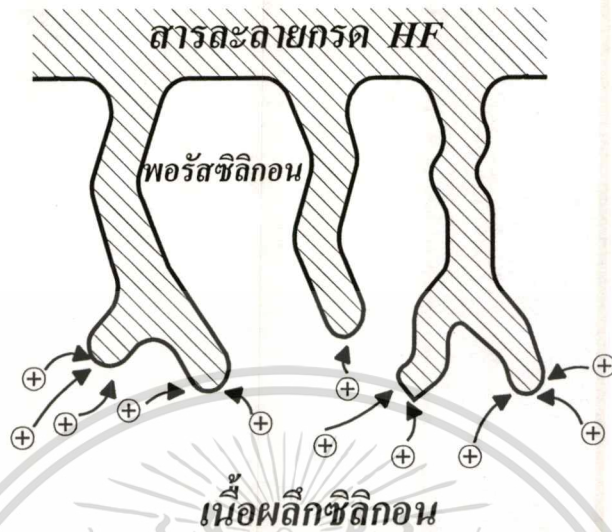
( ก ) ลักษณะการกัดแบบ electropolishing

( ข ) ลักษณะการกัดแบบ porous etching

#### 2.4.2.2 การกัดแบบ porous etching

ส่วนลักษณะการกัดแบบ porous etching จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำการป้อนความหนาแน่นกระแสในปริมาณต่ำๆ ( $J < J_{ps}$ ) ซึ่งจะทำให้ปริมาณไอออนของฟลูออรีนในสารละลายกรดมีจำนวนที่มากกว่าจำนวนโฮล ที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิกอน ทำให้การกัดในลักษณะนี้จะถูกจำกัดโดยจำนวนโฮล ดังนั้นถ้าผิวของผลึกซิลิกอนมีลักษณะเป็นหลุมหรือรอยซึ่งเกิดจากความไม่เรียบของพื้นผิวหรือจุดบกพร่องต่างๆในผลึกซิลิกอน ดังแสดงในรูปที่ 2.23 ( ข ) เมื่อทำการไบอัสแบบ anodic bias ให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมีจะมีผลทำให้ที่บริเวณก้นหลุมหรือจุดบกพร่องเหล่านี้ มีปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงกว่าที่บริเวณอื่นๆซึ่งจะดึงเอาพาหะโฮลเข้ามายังจุดนี้กันมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนที่บริเวณก้นหลุมจนเกิดเป็นรูพรุนลึกลงไปใ้เนื้อของผลึกซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น, อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



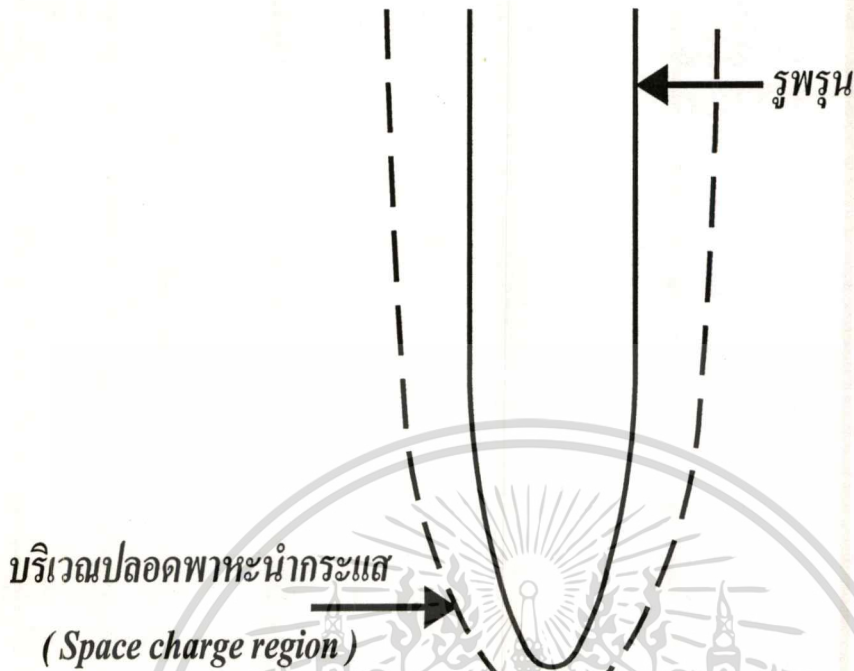
รูปที่ 2.24 แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลที่ถูกดึงมารวมกันที่บริเวณก้นหลุม เนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นกลไกในการเกิดรูพรุนภายในผลึกซิลิกอนทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นอย่างง่าย ๆ ซึ่งถ้าจะพิจารณาโดยละเอียดแล้วพบว่าผลึกซิลิกอนทั้งสองชนิดจะมีกลไกในการเกิดโครงสร้างของพอร์สซิลิกอนที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะ anodic bias

สำหรับผลึกซิลิกอนชนิดพี จะเป็นการไบอัสแบบไปหน้า (forward bias) ซึ่งการไบอัสในลักษณะเช่นนี้จะไปลดสนามไฟฟ้าภายในบริเวณที่เรียกว่า Space Charge Region (SCR) ลง โดยบริเวณ Space Charge Region นี้เป็นบริเวณที่ปลอดภัยจากพาหะนำกระแส (โฮล) เกิดขึ้นตามผิวสัมผัสของผลึกซิลิกอน อันเป็นผลมาจากการสัมผัสกันระหว่างผิวหน้าของผลึกซิลิกอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก มีผลทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านรอยสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกได้ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน เกิดเป็นรูพรุนได้อย่างต่อเนื่องตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น

แต่สำหรับผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะ anodic bias จะเป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ (revers bias) ซึ่งจะมีผลทำให้บริเวณ Space Charge Region มีความกว้างเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิมในขณะที่ยังไม่ทำการไบอัส ดังนั้นถ้าบริเวณผิวของผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นมีลักษณะเป็นหลุมซึ่งเกิดจากความไม่เรียบของพื้นผิว จะมีผลทำให้บริเวณผนังรอบๆหลุมเหล่านั้นเกิดบริเวณ Space Charge Region ขึ้นรอบๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.25

นอกจากนี้เมื่อเวลาผ่านไปนานๆ ไม่นานนักให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



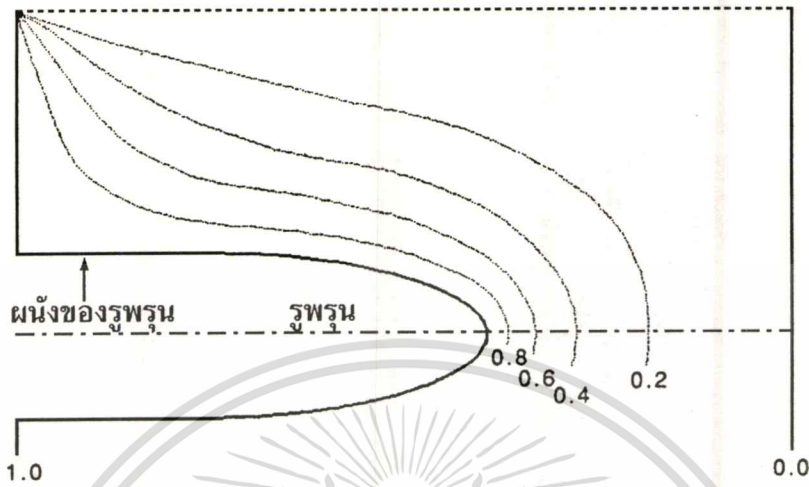
รูปที่ 2.25 แสดงบริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นรอบๆผนังของรูหรือหลุม  
ที่บริเวณผิวของผลึกซิลิกอน [15]

โดยความกว้างของบริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ [15]

$$W = (2\epsilon_s \epsilon_0 V_{SCR} / qN_D)^{1/2} \quad (2.11)$$

โดยที่	$W$	=	ความกว้างของบริเวณ Space Charge Region
	$\epsilon_s$	=	Permittivity ของผลึกซิลิกอน
	$\epsilon_0$	=	Permittivity ของสูญญากาศ
	$V_{SCR}$	=	ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบริเวณ SCR
	$q$	=	ประจุของอิเล็กตรอน
	$N_D$	=	จำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้

จากสมการที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าความกว้างของบริเวณ Space Charge Region จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบริเวณ Space Charge Region ( $V_{SCR}$ ) และจำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้ ( $N_D$ ) ในผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ซึ่งการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 แสดงการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน [15]

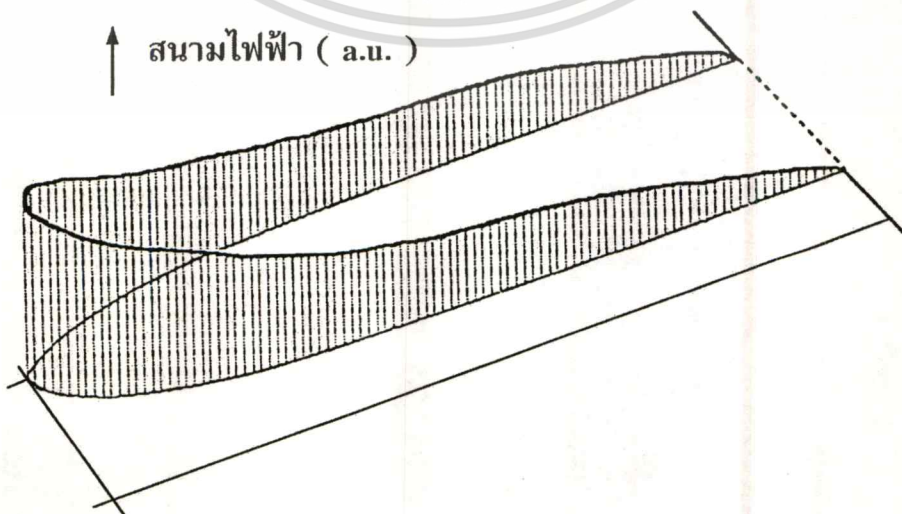
ซึ่งบริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นรอบๆรูพรุน จะมีการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าเป็นไปตามรูปที่ 2.26 โดยมีปริมาณของสนามไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน ( $E_s$ ) มีค่าเท่ากับ

$$E_s = \frac{2V_{SCR}}{W} \tag{2.12}$$

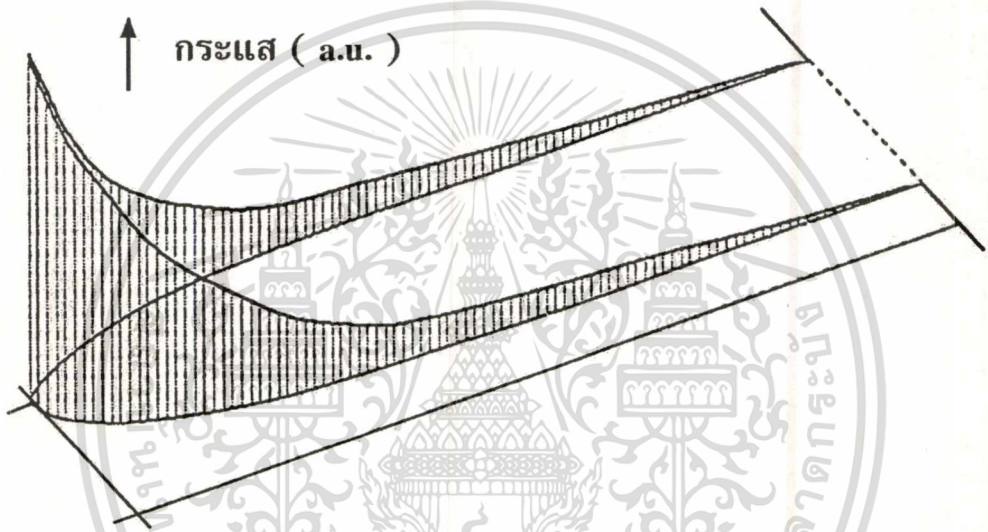
ส่วนสนามไฟฟ้าที่เกิดรอบๆกันหุ้มของรูพรุน ( $E'_s$ ) จะมีค่า

$$E'_s = \frac{V_{SCR}}{r} \tag{2.13}$$

โดยที่  $r$  = รัศมีของกันหุ้มของรูพรุน



จากรูปที่ 2.27 จะเห็นได้ว่าขนาดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบๆผนังของรูพรุนจะมีขนาดที่แตกต่างกัน กล่าวคือผนังบริเวณก้นหลุมของรูพรุนจะมีปริมาณของสนามไฟฟ้าที่สูงกว่าบริเวณผนังรอบๆของรูพรุนอยู่ถึงประมาณ 2-3 เท่า ส่วนผนังบริเวณปากรูจะมีค่าต่ำสุดจนเกือบมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งจากการที่ก้นหลุมของรูพรุนมีขนาดของสนามไฟฟ้าในปริมาณสูงนั้น มีผลทำให้สามารถดึงพาหะนำกระแส (โฮล) มาที่บริเวณนี้กันได้มาก ส่งผลทำให้ที่บริเวณก้นหลุมจะมีปริมาณกระแสที่สูงกว่าบริเวณอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.28



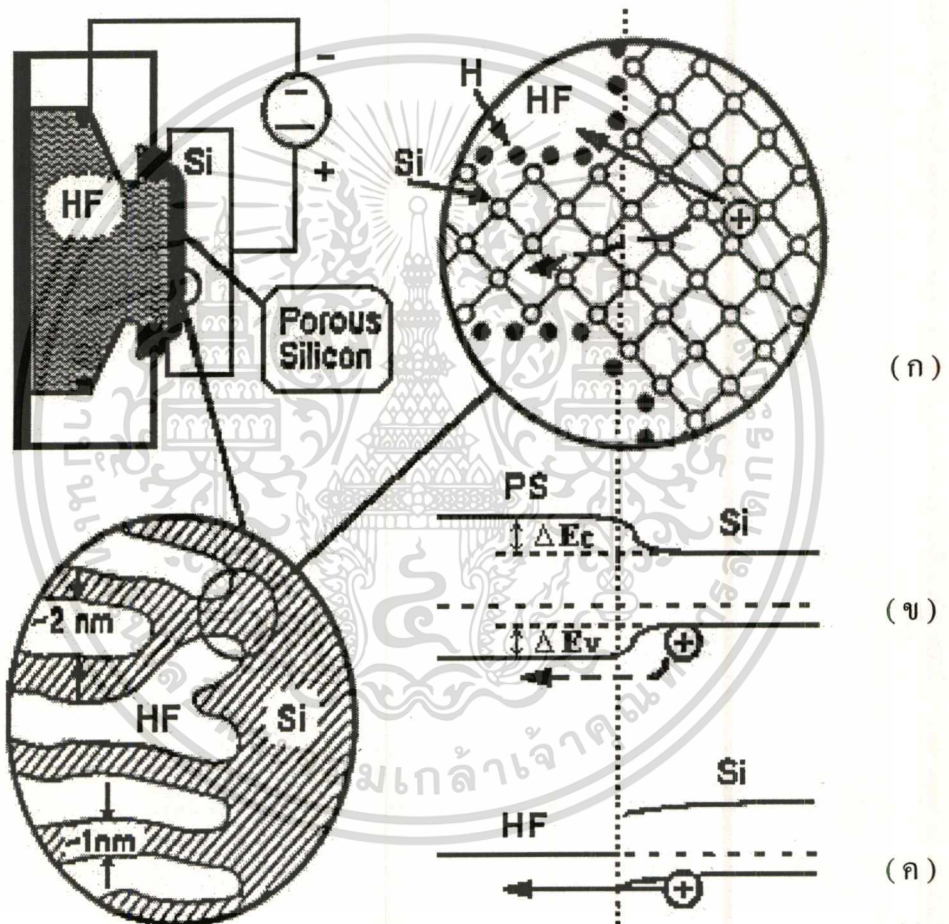
รูปที่ 2.28 แสดงการกระจายตัวของกระแสรอบๆผนังของรูพรุน [15]

#### 2.4.3 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้เราทราบถึงกลไกในการเกิดโครงสร้างของพอร์สซิลิกอนขึ้นมา โดยพาหะนำกระแสชนิดบวกหรือโฮลในผลึกซิลิกอนจะเป็นตัวการที่มีบทบาทและความสำคัญต่อกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนในแบบ porous etching หรือ anodic etching ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งเป็นกระบวนการกัดที่สามารถลดขนาดโครงสร้างของพอร์สซิลิกอนให้มีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆจนสามารถเข้าสู่อันดับนาโนเมตรได้ ด้วยกระบวนการที่เรียกว่า self aligned process ซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถทำให้โครงสร้างของพอร์สซิลิกอนมีขนาดตั้งแต่ในระดับไมโครเมตรจนถึงโครงสร้างในระดับ 2-3 นาโนเมตรได้ โดยไม่จำเป็นต้องอาศัย masking layer หรือ วิธีการทาง nanolithography แต่อย่างไร แต่กระบวนการนี้จะอาศัยกลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน โดยในหัวข้อนี้พิจารณาถึงกลไกในการหยุดกัดที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่าพอร์สซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นมาจากผลึกซิลิกอนชนิดพีและชนิดเอ็นจะมีกลไกในการหยุดกัดที่แตกต่างกัน กล่าวคือไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### พอร์สซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิกอนชนิดพี

สำหรับผลึกซิลิกอนชนิดพี การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะ anodic bias จะทำให้บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิกอนชนิดพีไม่เกิดบริเวณ space charge region ขึ้น ทำให้สามารถทำการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนได้อย่างต่อเนื่อง โดยกลไกในการหยุดกัดสำหรับผลึกซิลิกอนชนิดพีจะเกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเกิดปรากฏการณ์ quantum size effect ขึ้นในส่วนของนาโนพอร์สซิลิกอน ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 แสดงกลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนชนิดพี โดยที่ [15]

- (ก) แสดงโครงสร้างของพอร์สซิลิกอนและทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะโฮล
- (ข) แสดงลักษณะแถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลจากผลึกซิลิกอนผ่านเข้าไปในโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน
- (ค) แสดงลักษณะแถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลจากผลึกซิลิกอน

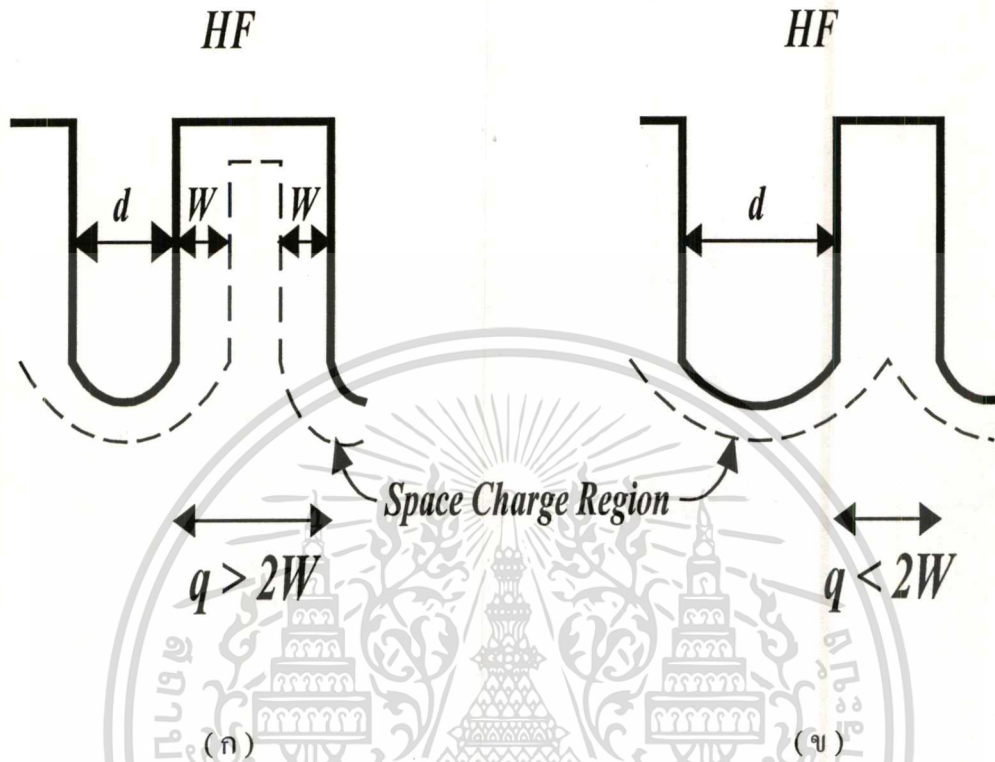
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนผ่านไปยังสารละลายกรด HF ที่บริเวณผิวสัมผัสที่ก้นหลุมของรูพรุนในขั้นตอนการกัด ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นได้ว่า เนื้อของผลึกซิลิกอนชนิดพีจะถูกกัดจนเกิดเป็น โครงสร้างของพอร์สซิลิกอนขึ้นมา และเมื่อทำการกัดอย่างต่อเนื่องจะทำให้โครงสร้างของพอร์สซิลิกอนมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆจนมีขนาดเข้าสู่ในระดับนาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.29 (ก) มีผลทำให้ช่องว่างพลังงานภายในพอร์สซิลิกอน ( $E_{ps}$ ) มีความกว้างมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอนเดิม ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์ quantum size effect นั่นเอง ทำให้เกิดความแตกต่างของระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ระหว่างพอร์สซิลิกอนกับผลึกซิลิกอนขึ้น โดยค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นค่าแพนซ์กัซซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\Delta E_v$  สำหรับโฮล และเท่ากับ  $\Delta E_c$  สำหรับอิเล็กตรอน ดังนั้นการที่พาหะโฮลในผลึกซิลิกอนชนิดพีจะสามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิกอน เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการกัดโครงสร้างในส่วนนี้ต่อไปได้นั้น พาหะโฮลจำเป็นที่จะต้องได้รับพลังงานที่มีค่ามากกว่า  $\Delta E_v$  ดังแสดงในรูปที่ 2.29 (ข) แต่ถ้าเมื่อไหร่ก็ตามที่ค่าแพนซ์กัซ  $\Delta E_v$  มีค่ามากกว่าพลังงานภายนอกที่ให้กับโฮล จะมีผลทำให้พาหะโฮลในผลึกซิลิกอนไม่สามารถผ่านเข้าไปในส่วนของนาโนพอร์สซิลิกอนได้ ผลที่ตามมาคือเกิดการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์สซิลิกอนในส่วนนี้ขึ้นทันที จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า  $\Delta E_v$  นั้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของนาโนพอร์สซิลิกอน โดย  $\Delta E_v$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของนาโนพอร์สซิลิกอนมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะเกิดการหยุดกัดในส่วนของนาโนพอร์สซิลิกอน เนื่องจากพาหะโฮลไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนาโนพอร์สซิลิกอนนี้ได้ แต่ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนยังคงดำเนินต่อไป โดยบริเวณที่จะถูกกัดอย่างต่อเนื่องจะเป็นบริเวณก้นหลุมของรูพรุน ทั้งนี้เนื่องจากพาหะโฮลในผลึกซิลิกอนชนิดพีสามารถผ่านผิวสัมผัสเข้าไปในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่บริเวณก้นหลุมของรูพรุนได้สะดวกกว่าที่จะผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิกอน ดังแสดงในรูปที่ 2.29 (ค) ดังนั้นจึงทำให้ที่บริเวณก้นหลุมของพอร์สซิลิกอนจะถูกกัดลึกเข้าไปในเนื้อของผลึกซิลิกอนอย่างต่อเนื่องได้

### พอร์สซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น

เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะ anodic bias สำหรับผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นจะเป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ มีผลทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นตามบริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิกอน โดยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแสจะมีค่าเท่ากับ  $w$  ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้น ดังนั้นกลไกในการหยุดกัดของพอร์สซิลิกอนสำหรับผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นแล้วจะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นภายในโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน ดังแสดงในรูปที่ 2.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 แสดงแผนภาพบริเวณปลดพาหะนำกระแส (SCR) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของ  
 พอร์ตซัลติคอนที่สร้างจากผลึกซัลติคอนชนิดเอ็น โดยที่ [15]  
 (ก) โครงสร้างของพอร์ตซัลติคอนที่มีขนาดมากกว่า  $2W$   
 (ข) โครงสร้างของพอร์ตซัลติคอนที่มีขนาดน้อยกว่า  $2W$

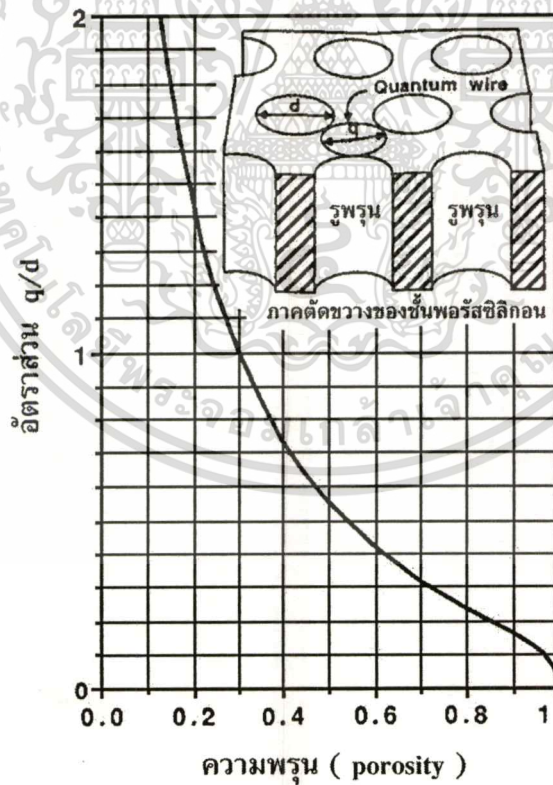
จากรูปที่ 2.30 (ก) จะเห็นได้ว่าพอร์ตซัลติคอนที่สร้างขึ้นจากผลึกซัลติคอนชนิดเอ็นเมื่อถูกทำ  
 การกักจะทำให้ขนาดของโครงสร้างพอร์ตซัลติคอน ( $q$ ) มีขนาดลดลงอย่างต่อเนื่อง เกิดเป็นรูพรุนภายใน  
 ผลึกซัลติคอนชนิดเอ็นขึ้น โดยมีบริเวณปลดพาหะนำกระแส (SCR) ปกคลุมอยู่รอบๆรูพรุน  
 แต่ละรู ในกรณีนี้ขนาดของโครงสร้างพอร์ตซัลติคอนยังมีขนาดที่มากกว่าสองเท่าของความกว้าง  
 บริเวณปลดพาหะนำกระแส ( $q > 2W$ ) ดังนั้นจึงยังสามารถทำการกักเพื่อลดขนาดของโครงสร้าง  
 พอร์ตซัลติคอนในส่วนนี้ต่อไปได้อีก จนเมื่อไหร่ก็ตามที่ขนาดของโครงสร้างพอร์ตซัลติคอนมีขนาดที่  
 น้อยกว่าสองเท่าของความกว้างบริเวณปลดพาหะนำกระแส ( $q < 2W$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.30 (ข)  
 จะมีผลทำให้เกิดการซ้อนทับกันของบริเวณปลดพาหะนำกระแส จนโครงสร้างของพอร์ตซัลติคอน  
 ถูกครอบคลุมโดยบริเวณปลดพาหะนำกระแสทั้งหมด ส่งผลทำให้เกิดการหยุดกักของพอร์ต  
 ซัลติคอนในส่วนนี้ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 ความพรุนของพอร์ซซิติคอน

โดยทั่วไปแล้ววัสดุใดๆก็ตามที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่ภายในเนื้อของวัสดุ ก็จะถือได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุที่มีความพรุน โดยค่าความพรุนนี้เป็นปริมาณที่สามารถบ่งบอกได้ถึงลักษณะขนาดโครงสร้างของวัสดุได้อย่างคร่าวๆ ซึ่งสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างมวลหรือปริมาตรของเนื้อวัสดุกับช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุนั้นๆ

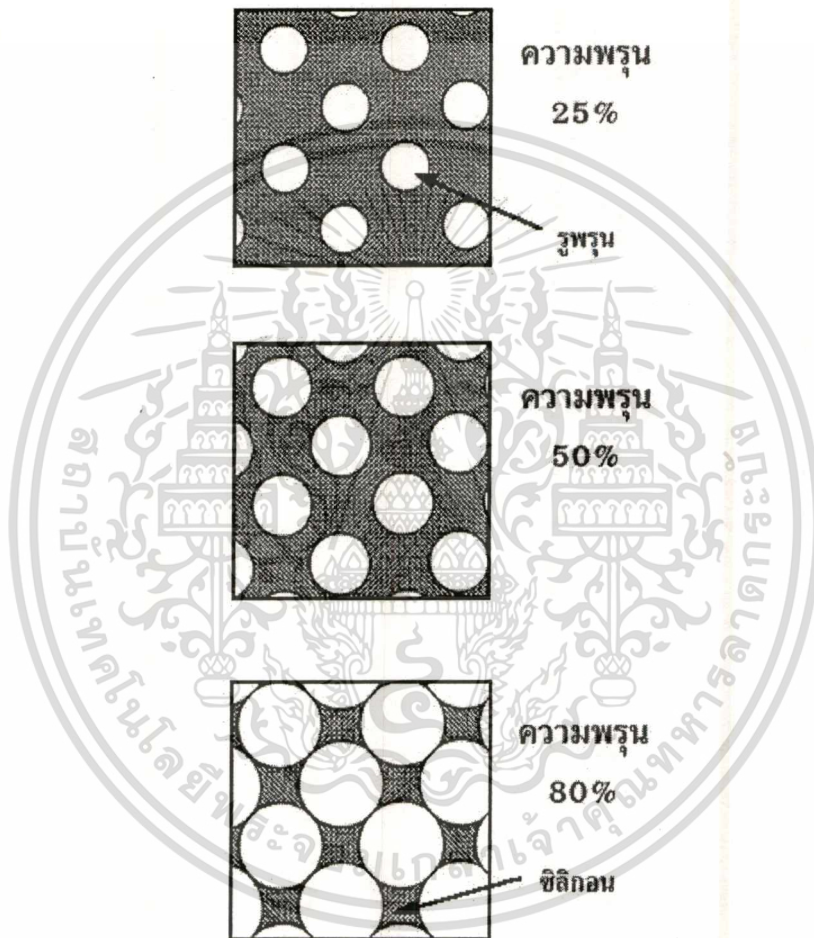
เป็นที่ทราบกันแล้วว่า พอร์ซซิติคอนนั้นก็คือผลึกซิติคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยขนาดของเนื้อผลึกซิติคอนที่เหลือ และขนาดของรูพรุน จะมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร เนื้อของผลึกซิติคอนในระดับนาโนเมตรนี้จะแสดงคุณสมบัติทาง Quantum size effect ในลักษณะของ Quantum wire ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อของผลึกซิติคอนในระดับนาโนเมตร กับขนาดของรูพรุน จะมีผลต่อความพรุนของชั้นพอร์ซซิติคอน ดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อผลึกซิติคอน ( $q$ ) กับขนาดของรูพรุน ( $d$ ) ที่มีต่อความพรุนของพอร์ซซิติคอน [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า ทั้งขนาดของเนื้อผลึกซิลิกอน (q) และขนาดของรูพรุน (d) มีผลต่อความพรุนของพอร์สซิลิกอน โดยถ้าเนื้อของผลึกซิลิกอนถูกกัดจนมีขนาดเล็กกลงๆ หรือขนาดของรูพรุนมีขนาดกว้างขึ้น จะมีผลทำให้ชั้นพอร์สซิลิกอนนั้นมีความพรุนมากขึ้นกว่าเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.32



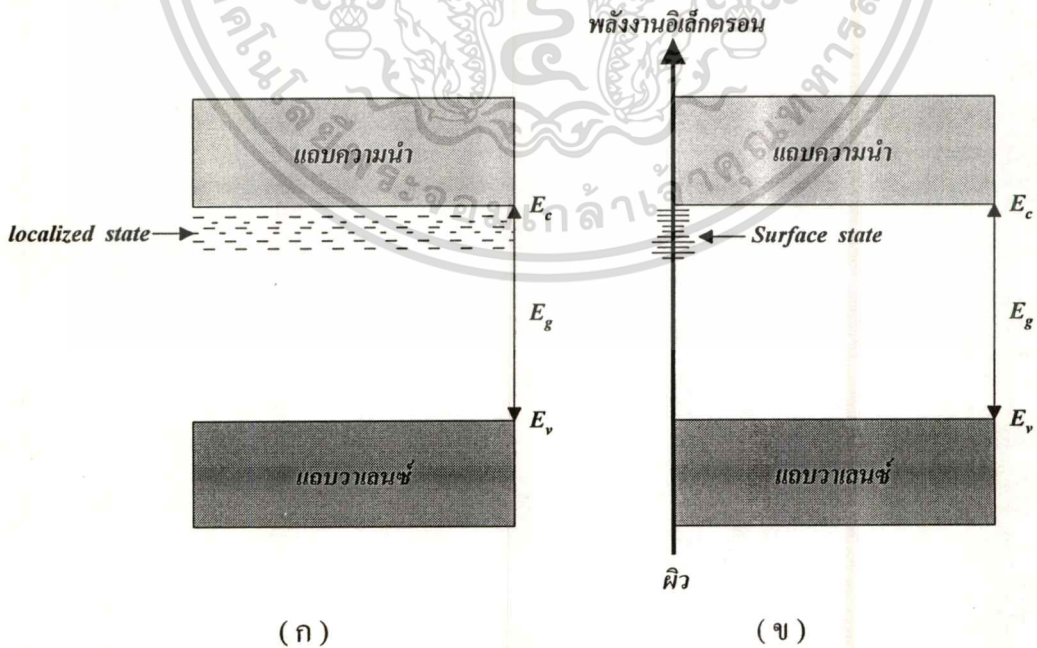
รูปที่ 2.32 แสดงแผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์สซิลิกอน ที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ [16]

### บทที่ 3

## พฤติกรรมทางแสง

### 3.1 พฤติกรรมทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

ในสารกึ่งตัวนำใดๆจะมีขนาดช่องว่างพลังงานอยู่ค่าหนึ่ง โดยภายในช่องว่างพลังงานเหล่านั้น อาจมีระดับพลังงานของสารเจือปน (impurity level) หรือจุดบกพร่อง (defect level) ต่างๆ ซึ่งทั้งหมดจะทำให้เกิดระดับพลังงานที่เรียกว่า localized state ขึ้นภายในช่องว่างพลังงานได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ก) นอกจากนี้ยังมีระดับพลังงานซึ่งเกิดจากการที่โครงสร้างโครงผลึกที่ผิวของวัสดุมีความไม่สมบูรณ์ เช่น อาจมีพวกพันธะแขวนขาด (dangling bond) หรือพวกสารเจือปนอื่นๆ เกาะติดอยู่ที่ผิว ซึ่งจะก่อให้เกิดระดับพลังงานที่เรียกว่า surface state ขึ้นที่ผิว ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ข) โดยระดับพลังงานทั้งสองชนิดนี้ สามารถที่จะเป็นศูนย์กลางในการรวมตัว (recombination center) ของพาหะได้



รูปที่ 3.1 แสดงการกระจายตัวของระดับพลังงาน (ก) localized state และ (ข) surface state

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ภายในช่องว่างพลังงาน  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการที่จะศึกษาถึงขนาดหรือลักษณะของช่องว่างพลังงาน ระดับพลังงานของ localized state หรือ surface state ให้ได้ผลดีที่สุด ได้แก่ การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือ ถ้าเราวัดวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืน การสะท้อน หรือการเปล่งแสงจากสารกึ่งตัวนำ เราจะสามารถทราบค่าระดับพลังงานของ localized state หรือ surface state และได้ข้อมูลเกี่ยวกับช่องว่างพลังงาน ทั้งนี้เพราะว่าการดูดกลืนแสงที่ดี หรือการเปล่งแสงที่ดี เกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบชั้นพลังงานใด ๆ มีการดูดกลืนแสง แล้วคายแสงออกมา เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงาน ซึ่งค่าความแตกต่างของพลังงานที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะเท่ากับพลังงานโฟตอนที่อิเล็กตรอนดูดกลืนหรือคายออกมานั่นเอง

### 3.1.1 การดูดกลืนแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ เป็นการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบพลังงานหนึ่ง ไปสู่แถบพลังงานหนึ่งในลักษณะที่มีค่าพลังงานเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนจากแสงที่ดูดกลืนเข้าไปนั่นเอง เมื่อสารกึ่งตัวนำถูกฉายแสงอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจะมีการตอบสนองกับโฟตอนของแสงนั้น โดยอิเล็กตรอนที่มีการตอบสนองจะมีอยู่ 4 ประเภท ด้วยกันคือ

1. อิเล็กตรอนชั้นในของอะตอม
2. วาเลนซ์อิเล็กตรอน
3. อิเล็กตรอนอิสระ
4. อิเล็กตรอนที่ถูกจับด้วยสารเจือ (impurity center) หรือที่ถูกจับด้วย lattice defect ต่างๆ

ความยาวคลื่นของแสงที่จะทำให้เกิด การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นในของอะตอม ได้แก่ ช่วงของรังสีเอกซ์ แต่จะไม่ขอกกล่าวในที่นี้เพราะไม่ใช่คุณสมบัติที่เด่นชัดของสารกึ่งตัวนำ ส่วนการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดจะเกิดจากการกระทัาระหว่างอะตอมและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้อะตอมภายในโครงผลึกเกิดการสั่นได้ โดยพลังงานที่ใช้ไปสำหรับการสั่นนี้จะอยู่ในรูปของพลังงานความร้อน หรือที่เรียกกันว่า โฟนอน นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 การเปล่งแสง

#### 3.1.2.1 การรวมตัวแบบเปล่งแสง และการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง

ในหัวข้อที่ผ่านมาเราได้กล่าวถึง การดูดกลืนแสงระหว่างแถบพลังงาน ซึ่งทำให้พาหะได้รับพลังงานสูงขึ้นและสามารถขึ้นไปอยู่ในแถบความนำ (conduction band) พาหะที่ถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานสูงนั้น เมื่อเวลาผ่านไปช่วงหนึ่งก็จะกระโดดกลับตกลงมาสู่ระดับพลังงานเดิมที่สถานะพื้น (ground states) และเกิดการรวมตัวกับโฮลขึ้น การรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮลนั้นจะก่อให้เกิดผลได้ 2 ชนิด คือ

1. เกิดการเปล่งแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและโฮล เรียกการรวมตัวในลักษณะแบบนี้ว่า การรวมตัวแบบเปล่งแสง (radiative recombination)
2. เกิดการปล่อยพลังงานความร้อน (โฟนอน) ให้กับโครงผลึก เรียกการรวมตัวในลักษณะแบบนี้ว่า การรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง (non-radiative recombination)

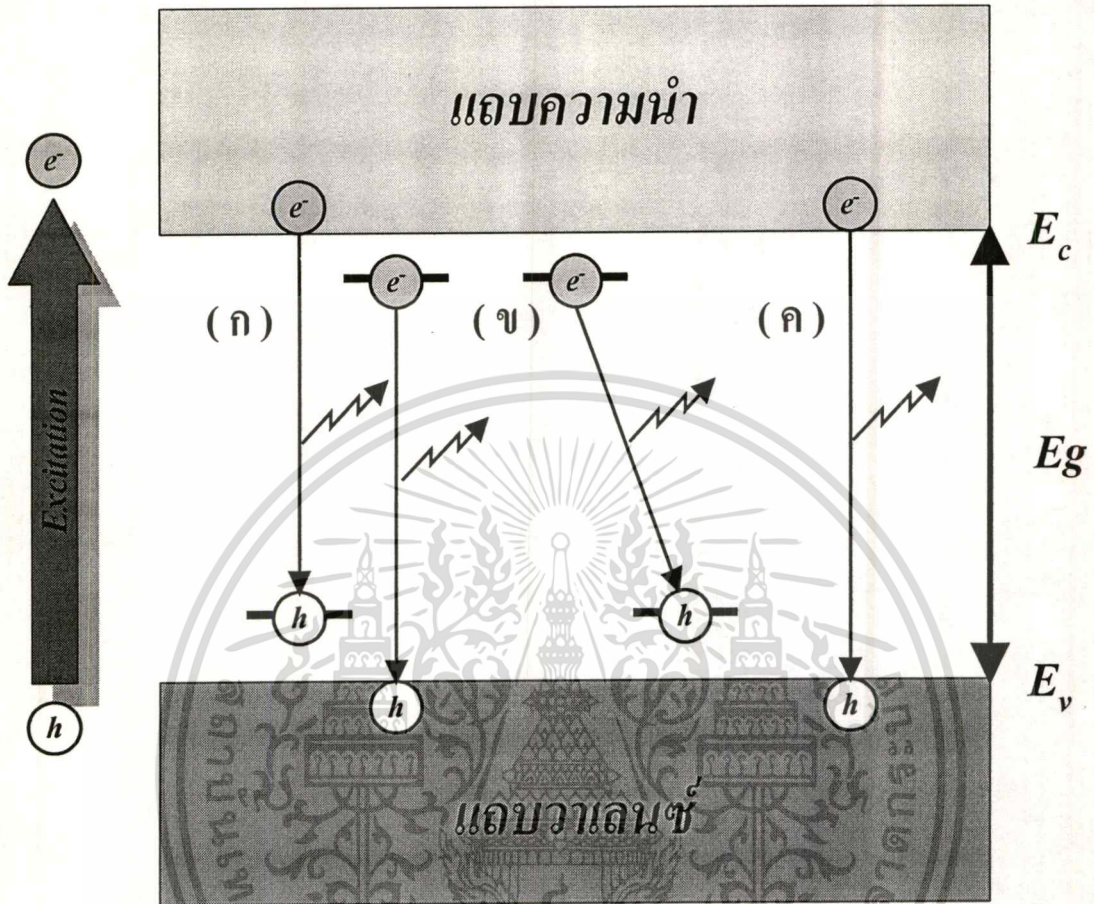
ซึ่งโดยทั่วไปปรากฏการณ์ทั้งสองชนิดนี้สามารถเกิดขึ้นได้พร้อมๆกัน ถ้าให้  $\tau_r$  และ  $\tau_n$  คือ เวลาอายุเฉลี่ย (life time) ของพาหะที่นับตั้งแต่ถูกกระตุ้นจนถึงรวมตัวแบบเปล่งแสง และไม่เปล่งแสงตามลำดับ ประสิทธิภาพของการรวมตัวแบบเปล่งแสง  $\eta$  จะมีค่าดังนี้คือ

$$\eta = \frac{(1/\tau_r)}{(1/\tau_r) + (1/\tau_n)} = \frac{1}{1 + (\tau_r/\tau_n)} \quad (3.1)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่า ถ้า  $\tau_n/\tau_r$  มีค่ามาก  $\eta$  ก็จะมีค่ามากด้วย กระบวนการรวมตัวแบบเปล่งแสงจะมีลักษณะตรงข้ามกับการดูดกลืนแสงทุกประการ โดยในรูปที่ 3.2 จะแสดงตัวอย่างการเปลี่ยนระดับพลังงานที่สำคัญในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะเป็นตัวแบ่งชนิดของการรวมตัวแบบเปล่งแสง

จากรูปแสดงการรวมตัวแบบเปล่งแสงในสารกึ่งตัวนำในลักษณะต่างๆ โดยในรูปที่ 3.2 ( ก ) เป็นการรวมตัวแบบ Band-to-Level emission ส่วนรูปที่ 3.2 ( ข ) เป็นการรวมตัวแบบ Donor-Acceptor emission การเปล่งแสงในลักษณะเหล่านี้จะปรากฏเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำเท่านั้น ทั้งนี้เพราะที่อุณหภูมิสูงพาหะจะถูกกระตุ้นด้วยความร้อนขึ้นไปอยู่ในแถบความนำ (conduction band) ทำให้การเปล่งแสงในสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิสูงส่วนมากจะเกิดจากการรวมตัวแบบ Band-to-Band emission เป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ( ค )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงกระบวนการรวมตัวของพาหะแบบเปล่งแสงในสารกึ่งตัวนำ

- ( ก ) Band-to-Level emission
- ( ข ) Donor-Acceptor emission
- ( ค ) Band-to-Band emission

การเปล่งแสงอันเนื่องมาจากการรวมตัวแบบเปล่งแสง (radiative recombination) นี้่าจะมีชื่อเรียกสั้นๆว่า ลูมิเนสเซนซ์ (luminescence) โดยการเปล่งแสงนั้นเป็นปรากฏการณ์ทางแสงของสารกึ่งตัวนำ จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอก จนมีพลังงานเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนเหล่านี้อยู่ในสภาวะที่ไม่เสถียร จึงต้องเกิดการรวมตัวกับโฮล โดยในระหว่างการรวมตัวอิเล็กตรอนจะมีการคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนหรือแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2.2 ลักษณะการเปล่งแสงชนิดต่างๆ

การเปล่งแสงในสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ตามวิธีการกระตุ้นได้ดังนี้คือ

ตารางที่ 3.1 แสดงการเปล่งแสงชนิดต่างๆ แบ่งตามวิธีการกระตุ้น

ชนิดการเปล่งแสง	แหล่งกระตุ้น
( ก ) Photoluminescence	แสง
( ข ) Electroluminescence	ไฟฟ้า
( ค ) Cathodeluminescence	อิเล็กตรอน
( ง ) Thermoluminescence	ความร้อน
( จ ) Triboluminescence	การเสียดสี
( ฉ ) Chemicallyluminescence	เคมี

โดยในจำนวนการเปล่งแสงทั้งหมดที่แสดงในตารางข้างต้น ชนิดของการเปล่งแสงที่สามารถสังเกตพบในสารกึ่งตัวนำมากที่สุด ได้แก่ การเปล่งแสงชนิด Photoluminescence Electroluminescence และ Cathodeluminescence ซึ่งการสังเกตปรากฏการณ์ทางแสงเหล่านี้จะทำให้เราสามารถวิเคราะห์ระดับพลังงาน และการเปลี่ยนแปลงสถานะพลังงานในสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี การเปล่งแสงชนิด Thermoluminescence และ Triboluminescence จะพบในวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีช่องว่างพลังงานที่กว้างมากๆ ส่วนการเปล่งแสงชนิด Chemicallyluminescence จะพบมากในวัสดุพวกอินทรีย์ โดยในที่นี้จะขอกกล่าวถึงเฉพาะการเปล่งแสงชนิด Potoluminescence เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)

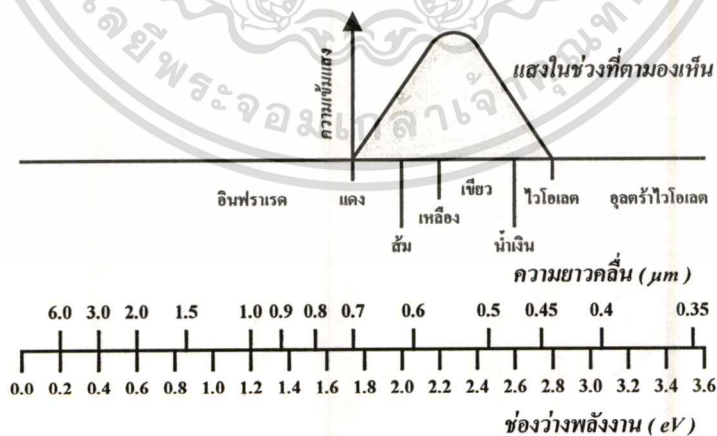
การเปล่งแสงในลักษณะโฟโตลูมิเนสเซนซ์ เป็นปรากฏการณ์การเปล่งแสงอันเนื่องมาจากการกระตุ้นพาหะอิเล็กตรอนด้วยวิธีการส่องแสง (excitation by light) จนพาหะอิเล็กตรอนมีพลังงานมากเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบความนำได้ แต่เนื่องจากพาหะอิเล็กตรอนเหล่านี้มีความไม่เสถียรในสถานะใหม่นี้ ดังนั้นจึงต้องตกกลับลงมาอยู่ในสถานะเดิม โดยจะมีการคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนหรือแสง ซึ่งค่าพลังงานที่ปล่อยออกมานี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับช่วงกว้างของระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนต้องกระโดดกลับลงมาพร้อมกับโฮล โดยความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน ( $E$ ) กับความยาวคลื่นของแสง ( $\lambda$ ) เป็นดังนี้คือ

$$E = hc / \lambda \quad (3.2)$$

โดยที่  $h$  เป็นค่าคงตัวของพลังค์ =  $4.14 \times 10^{-15}$  eV.s ส่วน  $c$  เป็นความเร็วของแสง =  $3 \times 10^8$  m/s

$$\lambda \text{ (nm)} = 1240 / E \text{ (eV)} \quad (3.3)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่า การที่แสงที่เปล่งออกมามีค่าความยาวคลื่นหรือสีต่างๆ ได้นั้น ขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของอิเล็กตรอนที่คายออกมานั่นเอง โดยสีของแสงที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 3.3 [17]



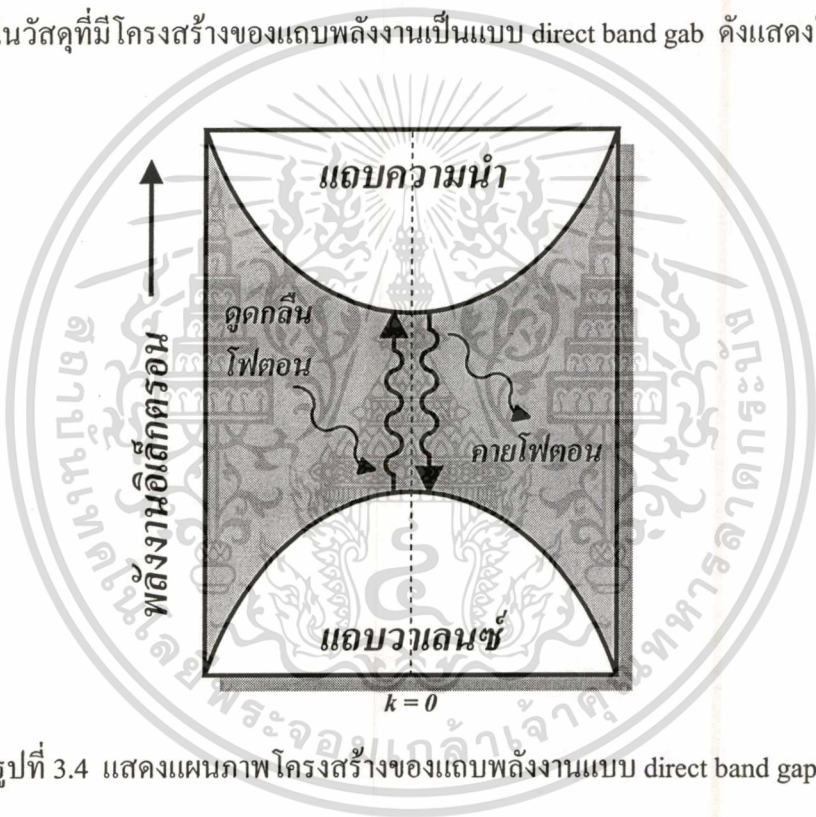
รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพสีของแสงที่ความยาวคลื่นและค่าพลังงานต่างๆ

ด้วยเหตุผลข้างต้นนี้เอง จึงทำให้ปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่เกิดขึ้น มีประโยชน์เป็นอย่างมากในการวิเคราะห์วัสดุ โดยสเปกตรัมของแสงที่ได้สามารถบอกถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของแถบพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดของช่องว่างพลังงานของวัสดุได้ ทั้งนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะเป็นโดยทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 พฤติกรรมทางแสงของผลึกซิลิกอน

ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วว่า การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบพลังงานหนึ่งไปสู่แถบพลังงานหนึ่ง ในลักษณะที่มีค่าพลังงานเพิ่มขึ้นจะก่อให้เกิดการดูดกลืนแสง และค่าความแตกต่างของระดับชั้นพลังงานก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงนั้น จะต้องเท่ากับพลังงานโฟตอนของแสงที่เป็นตัวกระตุ้น ซึ่งกฎข้อนี้จะถูกเรียกว่า กฎการอนุรักษ์พลังงาน นอกจากนี้แล้วยังมีกฎที่อนุรักษ์โมเมนตัมอีกด้วย

โดยในวัสดุที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นแบบ direct band gap ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงแผนภาพ โครงสร้างของแถบพลังงานแบบ direct band gap

ในการเปลี่ยนสถานะระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบความนำ ค่า wave number (k) ก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะจะไม่มีเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ทั้งนี้เนื่องจากระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์กับระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำ อยู่ที่ตำแหน่ง wave number เดียวกัน ดังนั้นจึงทำให้ในกระบวนการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนอันเนื่องมาจากการดูดกลืนแสง ค่าโมเมนตัม ( $\hbar k$ ) ของอิเล็กตรอนทั้งก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะมีค่าคงที่เสมอ เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม และกฎการอนุรักษ์พลังงาน ดังนี้คือ

$$k_1 - k_2 = 0 \quad : \text{กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม} \quad (3.4)$$

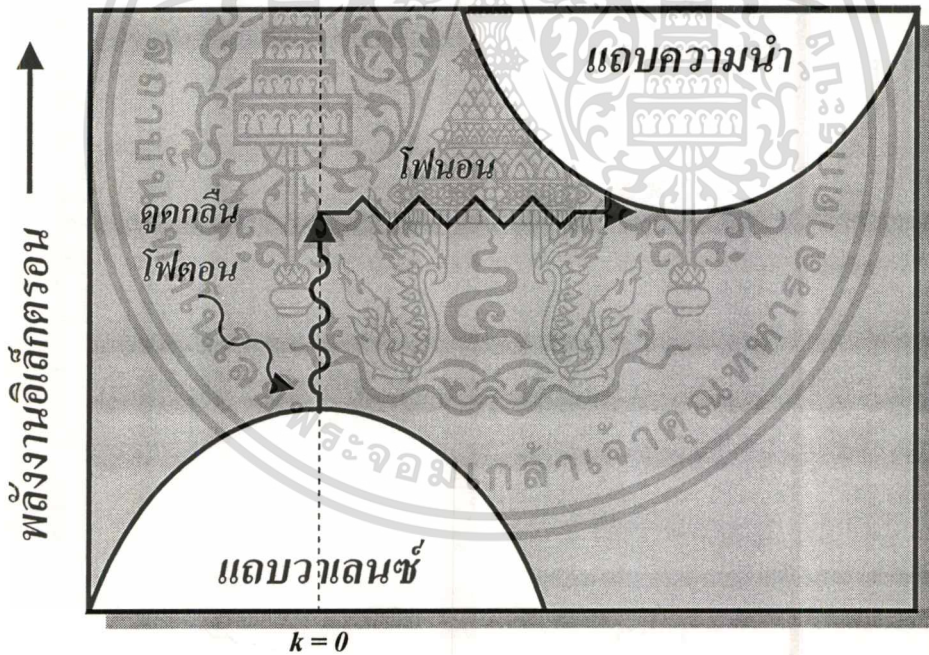
$$E_f - E_i = h\nu \quad : \text{กฎการอนุรักษ์พลังงาน} \quad (3.5)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่  $k_1$  เป็น wave number ของอิเล็กตรอนก่อนเปลี่ยนสถานะ
- $k_2$  เป็น wave number ของอิเล็กตรอนหลังเปลี่ยนสถานะ
- $E_i$  เป็น พลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนก่อนเปลี่ยนสถานะ
- $E_f$  เป็น พลังงานของอิเล็กตรอนหลังการเปลี่ยนสถานะ

เมื่ออิเล็กตรอนที่ขึ้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้น ( $E_f$ ) กลับลงมาสู่ในสถานะเดิม ( $E_i$ ) ก็จะมีการคายพลังงานออกมามีค่าเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานทั้งสองสถานะ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานแต่อย่างใด ทำให้วัสดุที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานในลักษณะเช่นนี้ จึงมีคุณสมบัติทางแสงที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสงกันมาก ดังตัวอย่างเช่น GaAs เป็นต้น

แต่สำหรับผลึกซิลิกอนแล้วกลับมีโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นแบบ indirect band gap ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงแผนภาพโครงสร้างของแถบพลังงานแบบ indirect band gap

จากรูปจะเห็นได้ว่าระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ กับระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่ง wave number เดียวกัน ทำให้ในการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบความนำได้นั้น จะต้องอาศัยการรับหรือคายพลังงานโฟนอน ( $E_p$ ) ให้กับอะตอมในโครงผลึก ซึ่งการรับหรือคายพลังงานของโฟนอนนี้จะช่วยให้เป็นไปตามกฎ

เอกลการอนุรักษ์พลังงาน และกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม คือ เท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k_2 = k_1 \pm k_p \quad : \text{กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม} \quad (3.6)$$

$$E_f - E_i = h\nu \pm E_p \quad : \text{กฎการอนุรักษ์พลังงาน} \quad (3.7)$$

โดยที่  $E_p$  เป็น พลังงานของโฟนอน

$k_p$  เป็น wave number ของโฟนอน

เครื่องหมายบวก (+) เป็นการแสดงว่าอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงาน ( $E_p$ ) หรือโมเมนตัม ( $\hbar k_p$ ) จากโฟนอน ส่วนเครื่องหมายลบ (-) เป็นการแสดงว่าอิเล็กตรอนคายพลังงานหรือโมเมนตัมให้แก่โฟนอน

จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าผลึกซิลิกอนหรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานในลักษณะนี้ เมื่ออิเล็กตรอนมีการดูดหรือคายพลังงาน จะมีการสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งไปเพื่อทำให้เกิดการสั่นของอะตอมในโครงผลึก (โฟนอน) ด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้ผลึกซิลิกอนจึงมีคุณสมบัติทางแสงที่ไม่เหมาะสมสำหรับที่จะนำไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง

### 3.3 พฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิลิกอน

#### กลไกในการเปล่งแสงแบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอน

จากลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบของพอร์สซิลิกอน ที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.2.1 ได้ทำให้หลายๆกลุ่มวิจัยทั่วโลกเชื่อกันว่าคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนนี้น่าจะเกิดขึ้นมาจากสาเหตุที่สำคัญ 2 ประการร่วมกันคือ

1. การเกิดปรากฏการณ์ quantum size effect หรือ quantum confinement effect [16,18] ขึ้นภายในชั้นของนาโนพอร์สซิลิกอน มีผลทำให้ขนาดของช่องว่างของแถบพลังงานของนาโนพอร์สซิลิกอนมีความกว้างมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของช่องว่างแถบพลังงานเดิมของผลึกซิลิกอน ดังที่ได้ที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2.2

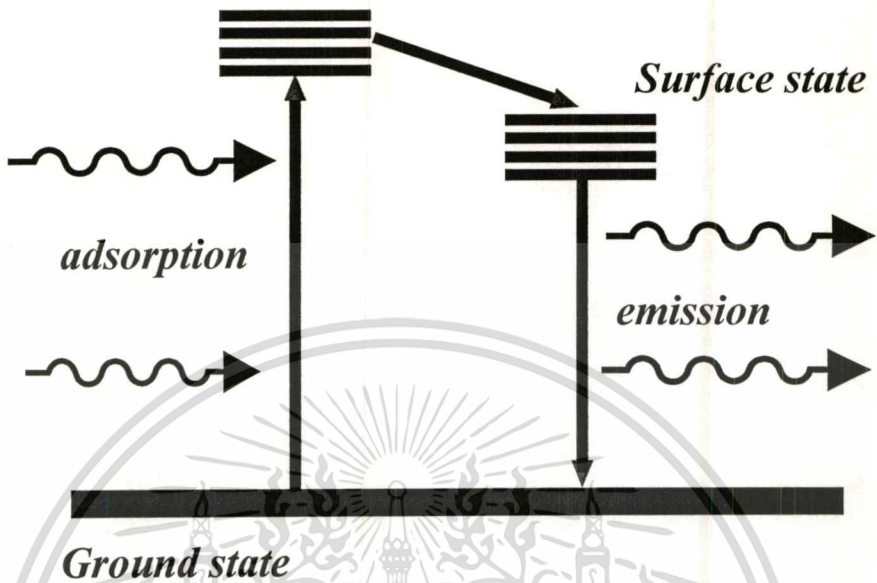
2. การเกิดระดับพลังงานที่ผิว (surface state) ของนาโนพอร์สซิลิกอน [19] ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีพันธะของไฮโดรเจน และอะตอมของธาตุอื่นๆที่อยู่ผิวของนาโนพอร์สซิลิกอนนั่นเอง

จากสาเหตุทั้งสองประการนี้เอง ทำให้เราสามารถทำการอธิบายคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนได้ โดยอาศัยแบบจำลองสถานะของระดับพลังงาน 3 ระดับ (three-level luminescent state model) ดังแสดงในรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Quantum confinement state



รูปที่ 3.6 แสดงแบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้งสามระดับภายในพอร์สซิลิกอน

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีสถานะของระดับพลังงานกระตุ้น (excited state) อยู่ถึงสองระดับด้วยกัน โดยสถานะแรกนั้นจะเป็นสถานะของระดับพลังงานภายในนาโนพอร์สซิลิกอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของ quantum confinement effect หรือ quantum size effect ส่วนสถานะที่สองจะเป็นสถานะของระดับพลังงานที่ผิวของนาโนพอร์สซิลิกอน จากแบบจำลองนี้เมื่ออิเล็กตรอนภายในนาโนพอร์สซิลิกอนได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสง จนมีพลังงานเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในสถานะ quantum confinement state ได้ แต่เนื่องจากผลของการที่ช่องว่างพลังงานของระดับพลังงานที่ผิวมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างพลังงานภายในนาโนพอร์สซิลิกอนนี้เอง [20] จึงทำให้อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียรเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงสถานะย้ายลงมาสู่สถานะของระดับพลังงานที่ผิวก่อนที่จะเกิดการรวมตัวใหม่ (recombination) กับโฮลที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state) โดยในการรวมตัวใหม่นี้เองอิเล็กตรอนจะมีการคายพลังงานออกมา ซึ่งจะอยู่ในรูปของโฟตอนหรือแสงนั่นเอง

## บทที่ 4

### กระบวนการสร้าง

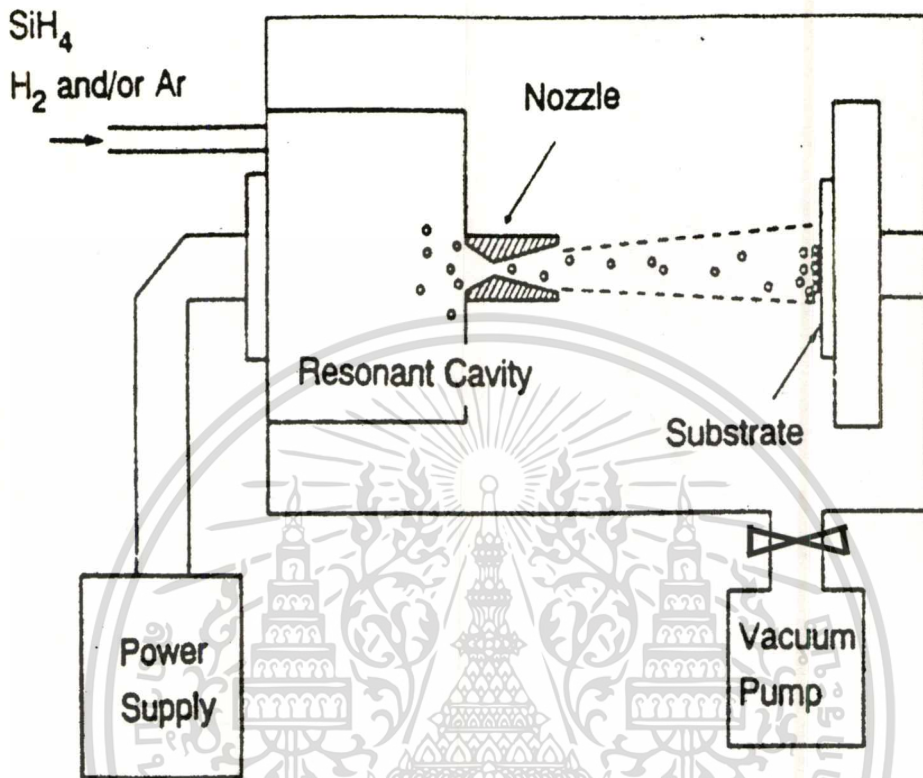
ในกระบวนการสร้างเพื่อให้ได้มาซึ่งผลึกซิลิกอนที่มีขนาดของโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตร (nanocrystallites) และสามารถแสดงคุณสมบัติในการเปล่งแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้นั้นมีอยู่หลายวิธีการด้วยกัน โดยในหัวข้อนี้จะได้พิจารณาถึงเทคนิคและวิธีการสร้างผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรแบบต่างๆ

#### 4.1 เทคนิคในการสร้างแบบต่างๆ

##### 4.1.1 เทคนิควิธีการสร้างแบบ Microwave plasma decomposition ของก๊าซไซเรน ( $\text{SiH}_4$ )

ผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร (nanocrystallites Si) ซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติในการเปล่งแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ ณ ที่อุณหภูมิห้องนั้น สามารถทำการสร้างขึ้นมาได้ด้วยวิธีการ microwave plasma decomposition ก๊าซไซเรน ( $\text{SiH}_4$ ) โดยวิธีการสร้างแบบนี้ได้ถูกรายงานเป็นครั้งแรก โดย Takagi et al. [21] มีหลักการดังต่อไปนี้คือ ผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรจะถูกสร้างขึ้นมาด้วยวิธีการ microwave plasma decomposition ของก๊าซไซเรน ( $\text{SiH}_4$ ) กับก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) หรือก๊าซผสมของอาร์กอน (Ar) ในช่อง resonant cavity โดยมีการใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีกำลัง 150 W ที่ความถี่ 2.45 GHz เพื่อทำให้เกิด plasma ขึ้นภายใน ซึ่งลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.1

ขนาดของผลึกซิลิกอนที่เกิดขึ้นจะมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 2.5 จนไปถึง 2 นาโนเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของก๊าซ กับกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ ต่อจากนั้นผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรนี้จะถูกปล่อยผ่านท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 4.5 มิลลิเมตรไปยังภาชนะระบบปิด (chamber) ที่ภายในมีความดันอยู่ในระดับ  $10^{-6}$  Torr โดยผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรที่เกิดขึ้นนี้จะถูกปล่อยให้ไปตกเคลือบอยู่บนฐานรองที่เป็น ควอทซ์ ณ ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.1 แสดงอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการ microwave plasma decomposition ของก๊าซไซเรน (SiH<sub>4</sub>) [21]

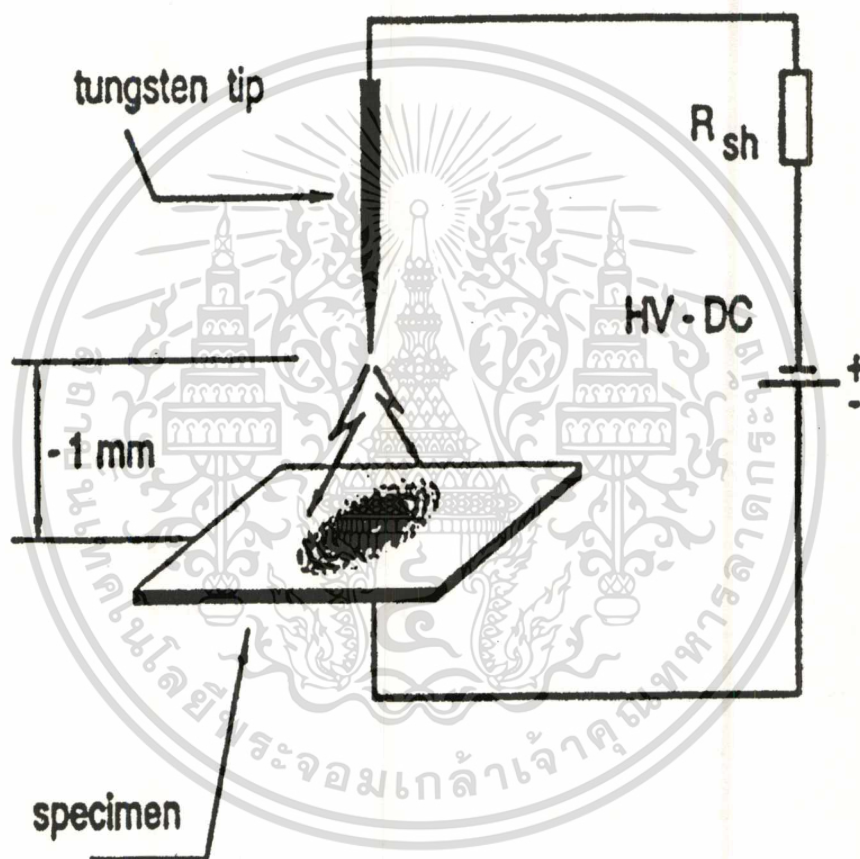
#### 4.1.2 เทคนิควิธีการสร้างแบบ Laser breakdown ก๊าซไซเรน (SiH<sub>4</sub>)

ผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรยังสามารถสร้างขึ้นได้จากวิธีการ laser breakdown ของก๊าซไซเรน (SiH<sub>4</sub>) [22,23] โดยมีรายละเอียดวิธีการสร้างดังต่อไปนี้คือ เริ่มต้นจากการที่ก๊าซไซเรนบริสุทธิ์ (Pure SiH<sub>4</sub>) ที่มีความดันเท่ากับ 10 , 15 หรือ 20 Torr จะถูกปล่อยเข้าไปยังในภาชนะระบบปิด (chamber) ซึ่งภายในมีความดัน (background pressure) ที่ต่ำกว่า 10<sup>-6</sup> Torr ความดันของก๊าซไซเรนค่าต่างๆเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดของผลึกซิลิกอนที่เกิดขึ้น ในส่วนของเลเซอร์ที่ใช้ในนั้นมีแหล่งกำเนิดมาจากระบบ Nd<sup>3+</sup> : YAG laser system โดยแสงเลเซอร์ที่ได้ออกมาจะถูกโฟกัสให้ผ่านเข้าไปยังภาชนะระบบปิด เพื่อทำให้เกิดการ Spark ขึ้นภายในผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรที่เกิดขึ้นจะถูก deposit ลงบนฐานรองที่เป็นควอทซ์หรือแผ่นเยอรมันเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 เทคนิควิธีการสร้างแบบ High - frequency spark discharge

เทคนิคในการสร้างผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการ spark discharge ที่ความถี่สูงได้ถูกรายงานเป็นครั้งแรกโดยนาย Hummel และทีมงาน [24,25] โดยการ Spark discharge ที่เกิดขึ้นจะใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงความต่างศักย์สูง ขนาด 15 กิโลโวลต์ ซึ่งในการ spark แต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 20 ns และเกิดขึ้นทุกๆ 60  $\mu$ s ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงการ Spark ที่เกิดขึ้นระหว่างปลายลวดทังสเตนกับแผ่นผลึกซิลิกอน [24,25]

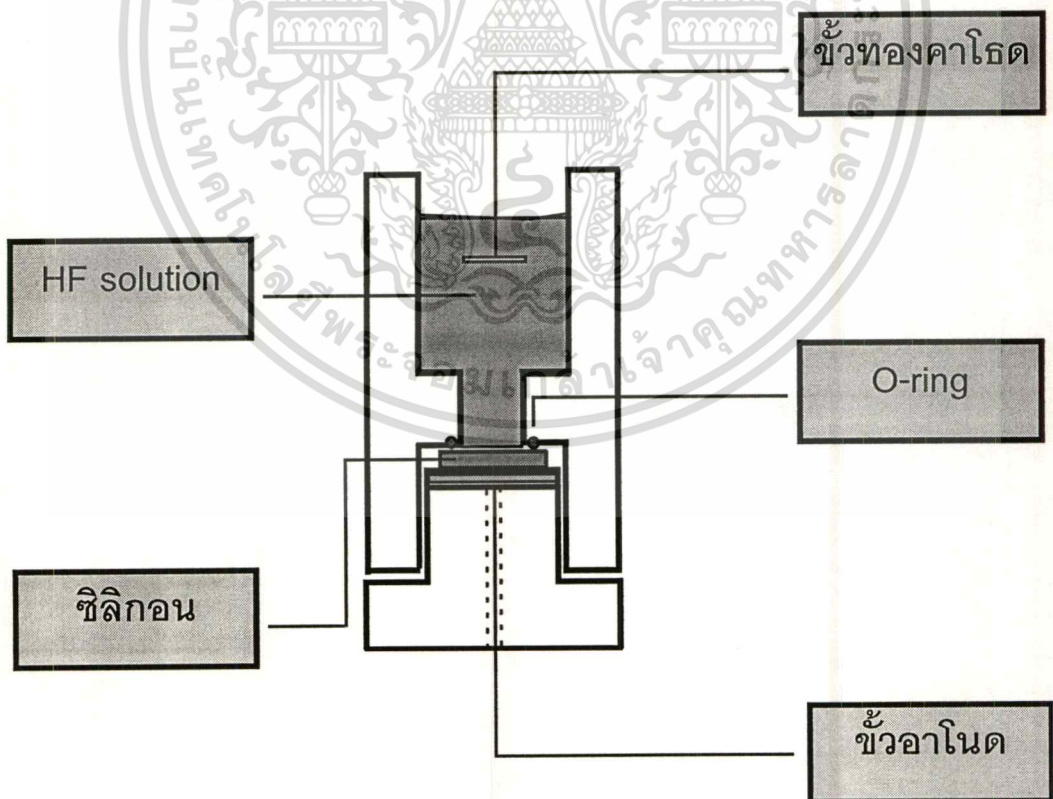
จากรูปจะเห็นได้ว่าการ Spark discharge จะเกิดขึ้นระหว่างปลายสุดของลวดทังสเตน ซึ่งอยู่ที่หัวอานอค กับแผ่นผลึกซิลิกอนซึ่งอยู่ที่หัวคาโรด โดยการ Spark นั้นจะทำให้บริเวณซึ่งเกิดโครงสร้างของผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร มีลักษณะเป็นบริเวณวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3 - 5 มิลลิเมตร บนแผ่นผลึกซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การสร้างพอร์ซซิลิกอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี

เทคนิคต่างๆที่ได้กล่าวมาข้างต้น ส่วนใหญ่จะเป็นเทคนิคในการปลูกผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรขึ้นมาโดยตรง โดยเทคนิคต่างๆเหล่านี้จะต้องอาศัยเทคนิคการสร้างและอุปกรณ์เครื่องมือที่มีความแม่นยำสูง ในการปลูกผลึกให้มีโครงสร้างอยู่ในระดับชั้นของโมเลกุลได้ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะมีราคาที่สูงมาก แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างชั้นของพอร์ซซิลิกอนที่มีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตรเช่นกัน ด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical etching) เนื่องจากมีกระบวนการสร้างในการสร้างที่ค่อนข้างจะง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างชั้นของพอร์ซซิลิกอนก็มีราคาที่ไม่แพงอีกด้วย ซึ่งการสร้างพอร์ซซิลิกอนด้วยวิธีนี้จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

พอร์ซซิลิกอนนั้นเป็นวัสดุที่สามารถสร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิกอนได้โดยตรง โดยอาศัยกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า การ anodization ซึ่งจะต้องใช้อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงภาคตัดขวางของอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการ anodization

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนนี้จะประกอบด้วย แผ่นผลึกซิลิกอนอยู่ที่ขั้วแอโนด ส่วนขั้วแคโทดจะใช้ทองเป็นขั้วอิเล็กโทรด โดยวัสดุทั้งสองจะถูกจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งในที่นี้ได้แก่สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกนั่นเอง จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าแผ่นผลึกซิลิกอนจะถูกนำไปวางอยู่ตรงบริเวณด้านล่างของเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยจะมีการใช้ O-ring เข้ามาเป็นส่วนที่ช่วยป้องกันการรั่วไหลของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกออกจากเซลล์ ซึ่งขั้นตอนต่างๆในกระบวนการสร้างชั้นพอร์ซิลิกอน มีดังนี้คือ

### ขั้นตอนในการสร้างชั้นพอร์ซิลิกอน

#### 1. การเตรียมแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น (Wafer Preparation)

ใช้แผ่นผลึกของซิลิกอนที่มีผิวด้านหน้าขัดมันเป็นกระจกเงา ชนิดพี หรือเอ็น ที่มีระนาบ (100) มีค่าพิคตความต้านทาน 6 - 12 โอห์ม - เซนติเมตร มีค่าความหนาของแผ่นผลึกซิลิกอนเท่ากับ 400 ไมโครเมตร โดยมีภาคตัดขวางดังแสดงในรูปที่ 4.4

#### 2. การทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น (Initial Cleaning) มีขั้นตอนดังนี้คือ

- ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (deionized water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Supersonic Cleaning)
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- กัดผิวหน้าด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5 % เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะหนักที่ผิวหน้า
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคโรเอทิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรก
- ล้างด้วยอะซีโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มลงในกรดกัดแก้ว (HF) 5 % เป็นเวลา 20 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ

หลังจากผ่านกระบวนการทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกซิลิกอนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ต่อจากนั้น จะทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมที่บริเวณด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิกอน ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ โดยใช้เครื่อง Vacuum Evaporator ซึ่งสามารถทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมที่ด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิกอนได้ความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.5

### 4. กระบวนการซินเตอร์ริง

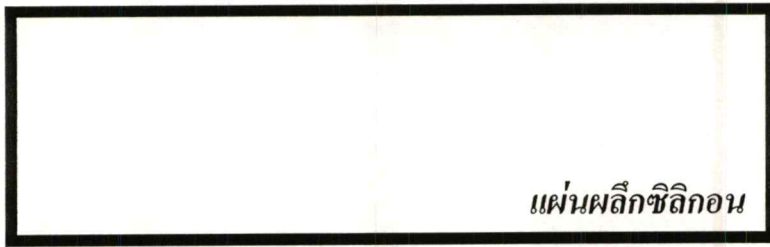
ต่อจากนั้นก็นำแผ่นผลึกซิลิกอนที่ทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมด้านหลังแผ่น ไปผ่านการซินเตอร์ริง เพื่อให้ส่วนของโลหะอลูมิเนียมกับเนื้อของผลึกซิลิกอนเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก ซึ่งจะมีผลทำให้กระแสที่ป้อนเข้าไปในระหว่างกระบวนการ anodization มีการกระจายตัวไปทั่วแผ่นได้อย่างสม่ำเสมอ โดยการทิ้งแผ่นผลึกซิลิกอนไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 ลิตร ต่อนาที ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วก็จะนำเอาแผ่นผลึกซิลิกอนไปบรรจุไว้ในเซลล์ไฟฟ้าเคมี เพื่อทำการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนต่อไป

### 5. การสร้างชั้นพอร์สซิลิกอน

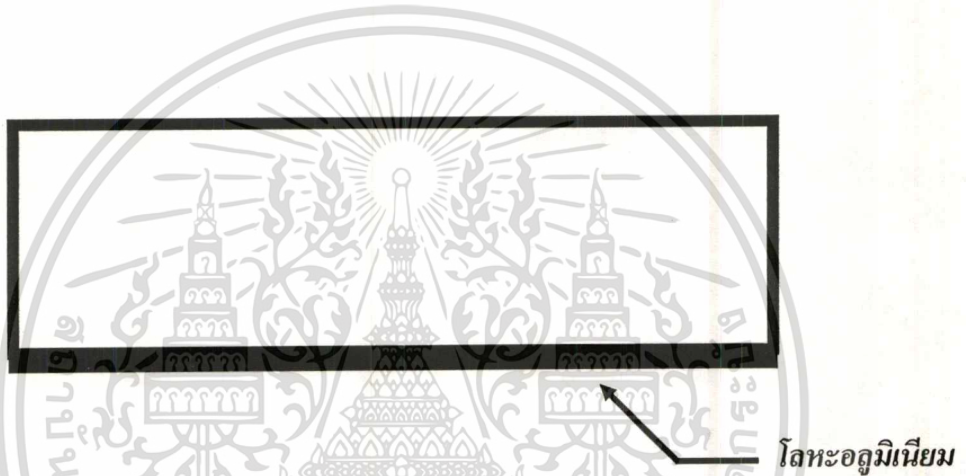
โดยการนำเอาแผ่นผลึกซิลิกอนที่ผ่านกระบวนการต่างๆข้างต้น ไปวางตรงตำแหน่งบริเวณด้านล่างของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ต่อจากนั้นก็ทำการเทสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกลงสู่เซลล์ แล้วทำการป้อนกระแสไฟฟ้าคงที่ให้แก่ขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิกอน และขั้วอิเล็กโตรดที่เป็นทองที่จุ่มอยู่ในสารละลายกรด ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีขึ้น มีผลทำให้ที่บริเวณผิวของแผ่นผลึกซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากมาย โดยพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความพรุน (porosity) ของพอร์สซิลิกอนก็คือ เงื่อนไขต่างๆที่ใช้ในระหว่างกระบวนการ anodization อันได้แก่

- ชนิด และสภาพด้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอน
- ความหนาแน่นกระแส
- ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก
- เวลาในการ anodization

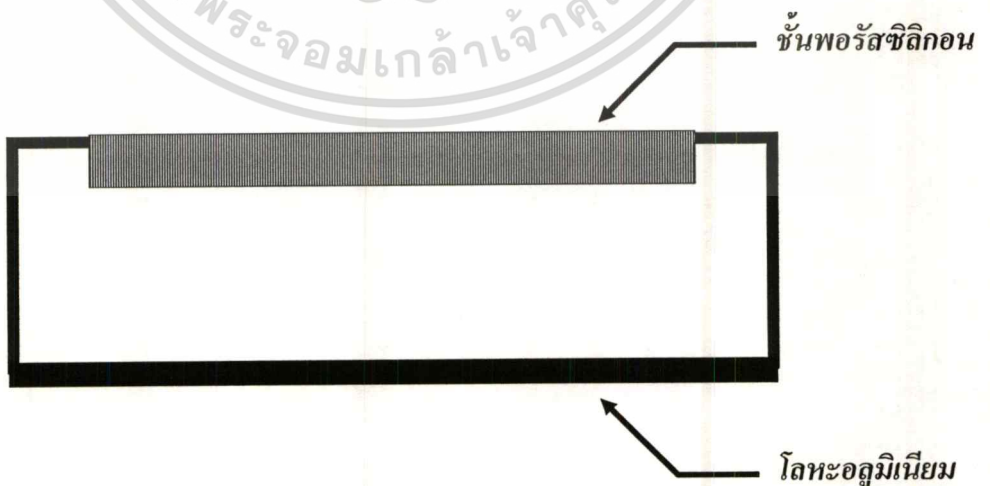
ซึ่งภายหลังจากการที่กระบวนการ anodization ได้ทำเสร็จสมบูรณ์เรียบร้อยแล้ว ก็จะได้ชั้นของพอร์สซิลิกอนเกิดขึ้นมาตรงบริเวณผิวหน้าด้านบนของแผ่นผลึกซิลิกอน ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.4 แสดงภาคตัดขวางของแผ่นผลึกซิติคอนเริ่มต้น



รูปที่ 4.5 แสดงภาคตัดขวางของแผ่นผลึกซิติคอนที่ผ่านการเคลือบโลหะอลูมิเนียมที่บริเวณด้านหลังของแผ่นแล้ว



รูปที่ 4.6 แสดงภาคตัดขวางของแผ่นผลึกซิติคอนที่เกิดชั้นพอร์ซเซลิคอนที่บริเวณผิวหน้าด้านบน

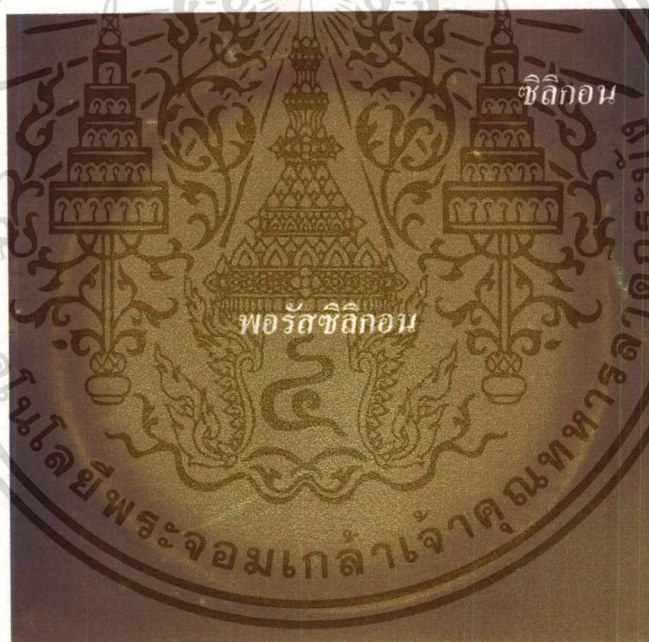
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. การทำความสะอาดแผ่นผลึกครั้งสุดท้าย (Final Cleaning)

หลังจากการสร้างชั้นของพอร์สซิติคอนที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นผลึกซิติคอนเรียบร้อยแล้ว ต่อจากนั้นก็ให้นำเอาแผ่นผลึกซิติคอนออกจากเซลล์ไฟฟ้าเคมี ไปผ่านการทำความสะอาดแผ่นผลึกครั้งสุดท้าย โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้คือ

- ถ้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- แช่แผ่นในแอลกอฮอล์เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดชะล้างสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ที่ยังคงค้างอยู่ในชั้นของพอร์สซิติคอน
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

ซึ่งเมื่อผ่านขั้นตอนสุดท้ายนี้แล้วก็จะได้ ตัวอย่างรูปถ่ายของแผ่นผลึกซิติคอนที่บริเวณผิวหน้าเกิดชั้นของพอร์สซิติคอนขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงรูปถ่ายของพอร์สซิติคอนที่ได้ทำการสร้างจนเสร็จสมบูรณ์

## บทที่ 5

### เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และการวัด

#### 5.1 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างของชั้นพอร์ซเซิลิกอน

##### 5.1.1 เทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนัก (Gravimetric method) [26]

เป็นเทคนิคอย่างง่ายที่ถูกนำมาใช้สำหรับการวัดหาค่าความพรุน (porosity) ของวัสดุ โดยอาศัยหลักการการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุก่อนและหลังการเกิดรูพรุน ซึ่งค่าความพรุนของวัสดุใดๆ จากเทคนิคการวัดแบบนี้จะมีค่าดังนี้คือ

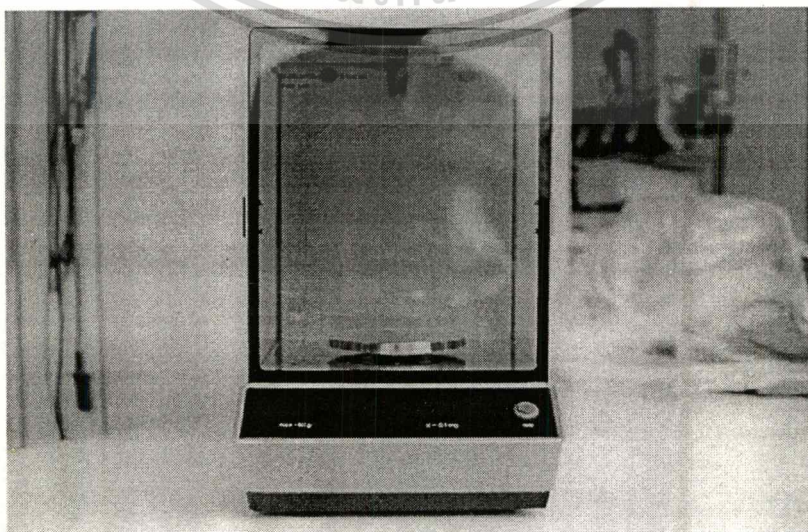
$$\text{เปอร์เซ็นต์ความพรุน} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \times 100 \quad (5.1)$$

โดยที่  $m_1$  เป็นน้ำหนักของวัสดุเริ่มต้นก่อนการเกิดรูพรุน

$m_2$  เป็นน้ำหนักของวัสดุหลังการเกิดรูพรุน

$m_3$  เป็นน้ำหนักของวัสดุที่เหลือหลังจากการลอกชั้นความพรุนออก

ในงานวิจัยนี้ได้นำเอาเทคนิคข้างต้นมาใช้เพื่อคำนวณหาค่าความพรุนของชั้นพอร์ซเซิลิกอนที่สร้างขึ้น ซึ่งเครื่องมือที่จะนำมาใช้สำหรับการวัดน้ำหนักผลึกซิลิกอนที่เปลี่ยนแปลงไปนั้น จะต้องเป็นเครื่องมือที่มีความละเอียดในการวัดสูง โดยในการทดลองได้ใช้เครื่องชั่งน้ำหนักของบริษัท Sartorius รุ่น 1602 MP ที่ให้ความละเอียดในการวัดน้ำหนักได้ถึง 0.0001 g ดังแสดงในรูปที่ 5.1



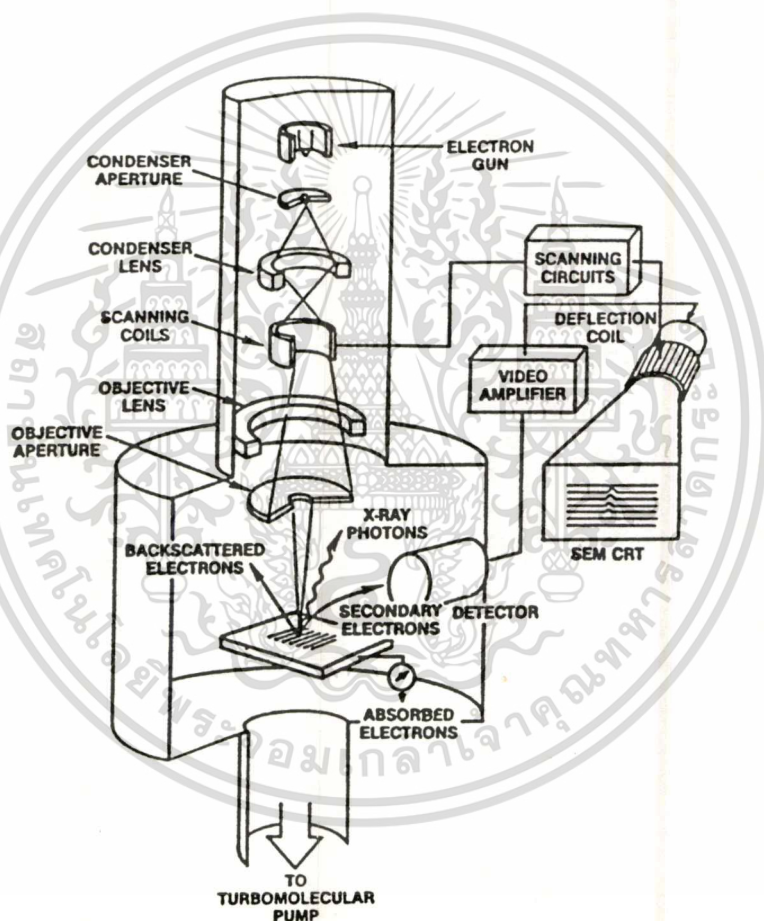
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 5.1 แสดงภาพถ่ายของเครื่องชั่งน้ำหนักของบริษัท Sartorius รุ่น 1602 MP ที่มีความละเอียดสูง

### 5.1.2 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด (SEM)

เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด (Scanning Electron Microscopy) หรือ SEM เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์พื้นผิวและศึกษาโครงสร้างของวัสดุ มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในหลายสาขาวิชา โดยเทคนิค SEM นี้มีจุดเด่นที่สำคัญอยู่ 2 ประการ คือ

1. สามารถให้รูปที่มีความชัดลึกสูง (high depth of field)
2. สามารถให้กำลังแยกแยะเชิงระยะสูง (high spatial resolution)

ซึ่งส่วนประกอบและลักษณะการทำงานของเครื่อง SEM จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 5.2

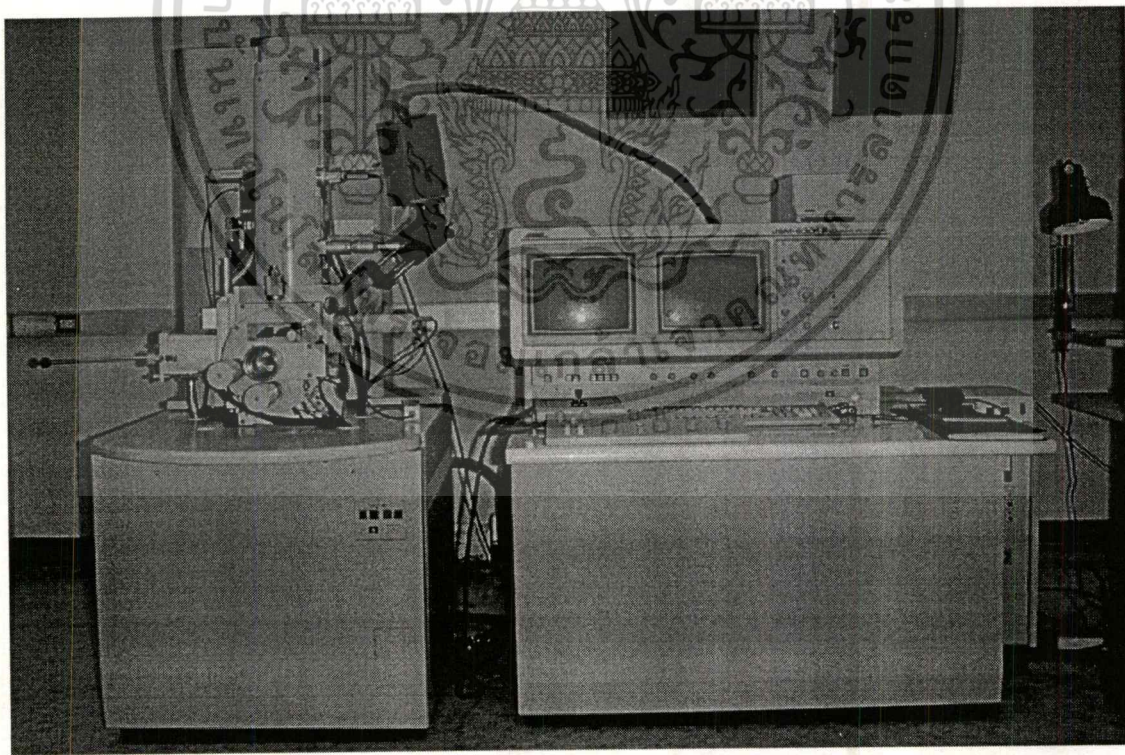


รูปที่ 5.2 แสดงแผนภาพหลักการทำงานของเครื่อง SEM

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า ในส่วนบนสุดของรูปจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron source) หรือที่เรียกว่า “ปืนอิเล็กตรอน” (electron gun) ซึ่งนับได้ว่าเป็นหัวใจของ SEM การทำงานจะเริ่มต้นจากการที่อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ด้วยความต่างศักย์ในช่วง 1-30 KV โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยเลนส์เอกซารีนเป็นเอกซารีนที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) จำนวน 2 ชุด หรือมากกว่า ส่วนปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอฟเพอร์เจอร์ (aperture) ซึ่งเป็นช่องเปิดที่มีขนาดต่างๆกันตามลักษณะการใช้งาน เลนส์คอนเดนเซอร์อันแรก (first condenser lens) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่บีบลำอิเล็กตรอน ที่ส่งมาจากแหล่งกำเนิดให้มีพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์อันสุดท้ายนั้นจะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิวของวัตถุเป้าหมาย โดยมีคอยล์กวาดรูป (scanning coil) ทำหน้าที่กวาดลำอิเล็กตรอนบนผิววัสดุในกรอบสี่เหลี่ยม คล้ายกับการกวาดรูปบนจอโทรทัศน์ เมื่อลำอิเล็กตรอนไปตกกระทบกับผิวของวัสดุจะเกิดอันตรกิริยาขึ้นภายในวัสดุ และจะให้สัญญาณต่างๆออกมา ซึ่งสัญญาณต่างๆเหล่านี้จะถูกตรวจจับและถูกนำไปแสดงผลในที่สุด

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด (SEM) ก็เพื่อศึกษาพื้นผิว และโครงสร้างของพอร์ซเซลิคอน โดยเครื่อง SEM ที่ใช้เป็นเครื่องของบริษัท JEOL รุ่น JSM-6301F ซึ่งเป็นกล้องที่ใช้แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิชชัน (cold field emission electron gun) ทำให้มีความสว่างสูง และสามารถให้กำลังแยกแยะได้สูงมากในระดับ 1.4 nm ที่ 30 KV และมีกำลังขยายสูงสุดถึง 200,000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 5.3

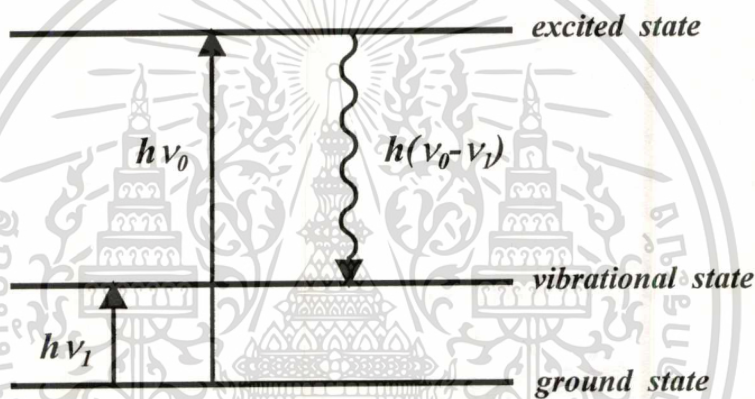


รูปที่ 5.3 แสดงภาพถ่ายเครื่อง SEM ของ JEOL รุ่น JSM-6301F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.3 รามานสเปกโตรสโกปีแบบการแปลงฟูเรียร์ (FT-RAMAN) [27]

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ ตรวจสอบ และศึกษาเกี่ยวกับอะตอมของวัสดุ โดยจะอาศัยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการชนของคลื่นแสงที่มีความเข้มสูงกับอะตอมของวัสดุ ทำให้คลื่นแสงนั้นเกิดการกระเจิง โดยแสงที่กระเจิงออกมาจะมีความถี่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เรียกปรากฏการณ์ในลักษณะเช่นนี้ว่า Raman Scattering สำหรับการตรวจสอบสารตัวอย่างใดๆ Raman Scattering สามารถเกิดขึ้นได้โดยการใช้ลำแสงโมนโครมาติกที่มีความเข้มสูง เช่น ลำแสงเลเซอร์ (laser beam) ยิงผ่านเข้าไปยังวัสดุตัวอย่าง แล้วเกิดการกระเจิงของแสงขึ้น โดยแสงที่กระเจิงออกมาจะมีความถี่เปลี่ยนแปลงลดลงจากความถี่เดิมของแสงที่ตกกระทบ ดังแสดงในรูปที่ 5.4

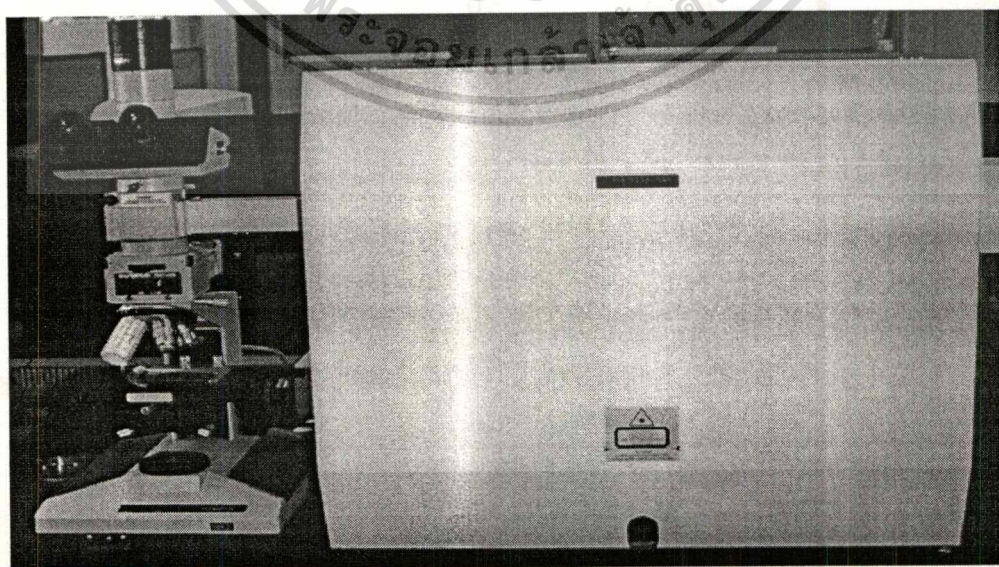


รูปที่ 5.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานที่ทำให้เกิด Raman Scattering

จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อโฟตอนจากแสงเลเซอร์ที่มีพลังงาน  $h\nu_0$  ผ่านเข้าไปในอะตอมของวัสดุตัวอย่าง จะเกิดอันตรกิริยาขึ้นโดยมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไปทำให้เกิดการรบกวนการจัดตัวของอิเล็กตรอน (electronic configuration) ทำให้อิเล็กตรอนนั้นกระโดดขึ้นไปสู่สถานะใหม่ที่เรียกว่า สถานะกระตุ้น (excited state) ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เสถียร จึงต้องตกกลับลงมาสู่สถานะเดิม โดยการคายพลังงานออกมามีค่าเท่ากับ  $h(\nu_0 - \nu_1)$  ซึ่งพลังงานที่สูญเสียไปมีค่าเท่ากับ  $h\nu_1$  จะถูกใช้ไปสำหรับทำให้เกิดการสั่น (vibrational) ของอะตอมในโครงผลึก โดยพลังงาน  $h\nu_1$  ที่ถูกดูดกลืนนี้จะอยู่ในย่านของอินฟราเรด ดังนั้นพลังงานที่เหลือ  $h(\nu_0 - \nu_1)$  จึงเป็นพลังงานโฟตอนของแสงที่กระเจิงออกมานั้นเอง โดยสเปกตรัมของแสงที่ได้ออกมาจะถูกเรียกว่า Stokes line

จากกลไกข้างต้นนี้เองจึงทำให้เทคนิค FT-Raman สามารถวิเคราะห์และตรวจสอบชนิดของวัสดุตัวอย่างได้ โดยใช้หลักการเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเพื่อการตรวจพิสูจน์ ซึ่งสเปกตรัมของวัสดุชนิดเดียวกัน จะต้องมีลักษณะที่เหมือนกันทุกประการ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเอาเทคนิค FT-Raman มาใช้เพื่อทำการวิเคราะห์ และศึกษาถึงขนาดของโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอน ซึ่งถือได้ว่าเป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับผลึกซิลิกอน จะแตกต่างกันที่ตรงที่พอร์สซิลิกอนนั้นเป็นผลึกซิลิกอนที่มีขนาดของโครงสร้างอยู่ในระดับของนาโนเมตรนั่นเอง มีผลทำให้สเปกตรัมของรามานที่วัดได้จะมีความแตกต่างและมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเนื้อผลึกซิลิกอนเดิม ทั้งนี้เนื่องมาจากในเนื้อของผลึกซิลิกอนปกติ มีอะตอมอยู่เป็นจำนวนมากคือประมาณ  $10^{22}$  อะตอม / ลบซม. สเปกตรัมของรามานที่วัดได้จะเป็นพลังงานที่ใช้สำหรับการสั่นของอะตอมภายในโครงผลึก ซึ่งอะตอมเหล่านี้มีโอกาสสูงที่จะถูกรบกวนจากอิทธิพลของการสั่นจากอะตอมกลุ่มอื่นๆภายในผลึกได้ ทำให้การสั่นที่เกิดขึ้นจะมีความรุนแรงสูง (strong coupling) สเปกตรัมที่ได้จึงมีความแคบมากๆ และจะปรากฏอยู่ที่ตำแหน่งความถี่ประมาณ  $520 \text{ cm}^{-1}$  แต่สำหรับผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร (พอร์สซิลิกอน) โครงสร้างภายในจะมีจำนวนอะตอมประกอบอยู่ในปริมาณที่น้อยกว่าในเนื้อผลึกซิลิกอนปกติอยู่มาก ทำให้ในการสั่นของอะตอมแต่ละตัวจะถูกรบกวนจากอิทธิพลการสั่นของอะตอมอื่นๆในปริมาณต่ำ มีผลทำให้การสั่นของอะตอม (โฟนอน) แต่ละตัวจะมีเอกลักษณ์เฉพาะตัวเป็นของตนเอง สเปกตรัมของรามานที่วัดได้จึงมีการกระจายตัวที่สูงกว่าสเปกตรัมที่วัดได้จากเนื้อผลึกซิลิกอนปกติโดยทั่วไป อีกทั้งสเปกตรัมที่ได้ก็จะมี ความถี่ลดลงมีค่าที่ต่ำกว่า  $520 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นความถี่ของสัญญาณสเปกตรัมที่ได้จากผลึกซิลิกอนปกติ ลักษณะการกระจายตัวของสเปกตรัมที่เพิ่มขึ้นและการลดลงของความถี่ของสัญญาณนี้ จะมีค่าขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมหรือขนาดของ โครงสร้างในระดับนาโนเมตร โดยเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์แบบการแปลงฟูเรียร์ ( FT-Raman Spectrometer ) ที่นำมาใช้วิเคราะห์นี้เป็นเครื่องของ Renishaw รุ่น System 2000 ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ในช่วงสเปกตรัม  $4000 - 200 \text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงในรูปที่ 5.5



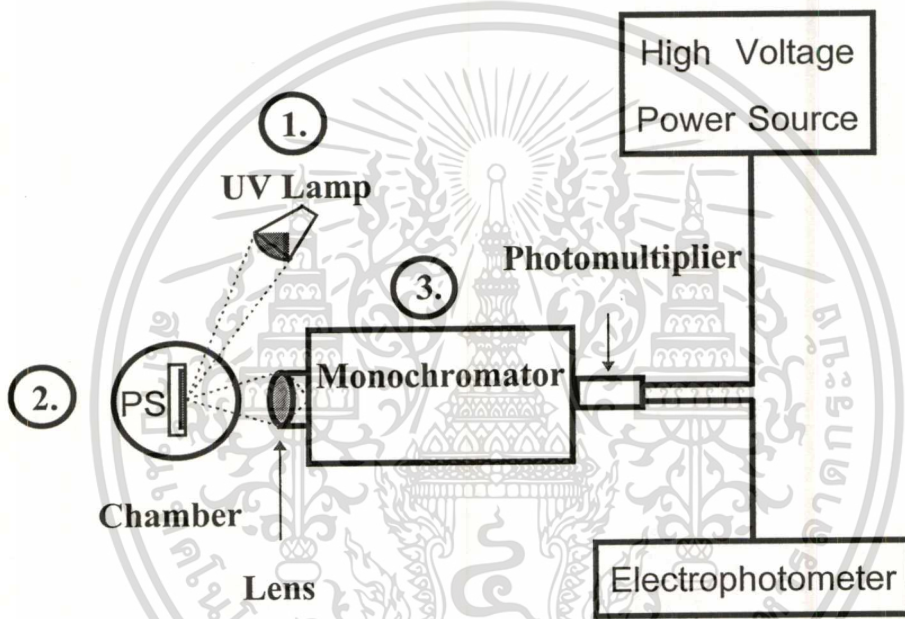
เอกสารนี้รูปที่ 5.5 แสดงภาพถ่ายของเครื่อง FT-Raman Spectrometer ของ Renishaw รุ่น System 2000

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้วัดปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์

### อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (Ultraviolet and Visible Spectroscopy) [27]

เป็นเทคนิคที่ใช้วัดสเปกตรัมของแสงที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเลตและในช่วงที่ตามองเห็น สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยเทคนิคนี้จะให้ความถูกต้องแม่นยำ และมีสภาพความไว (sensitivity) สูง ซึ่งเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์โดยทั่วไป จะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดงส่วนประกอบต่างๆของเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

จากรูปจะเห็นได้ว่า เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ จะประกอบด้วย

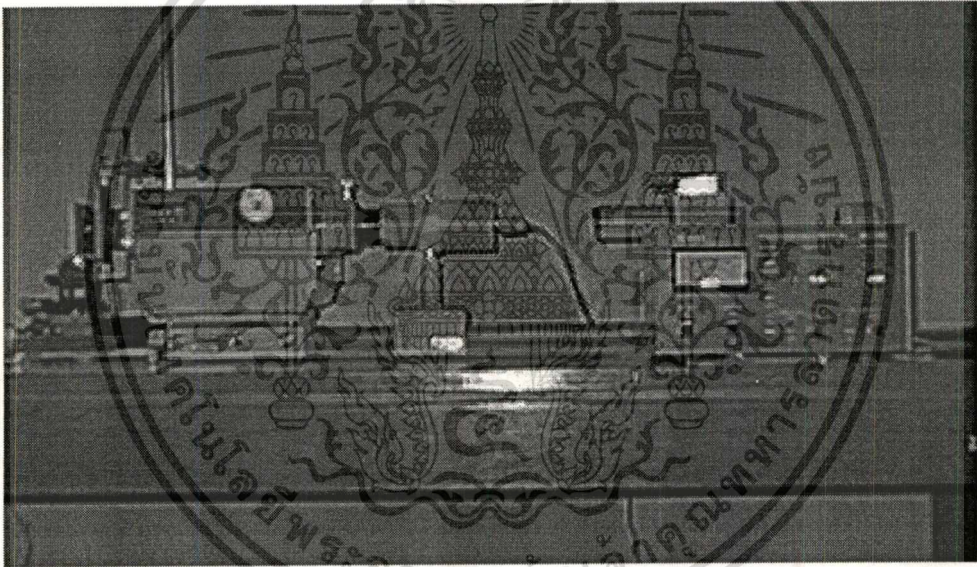
1. ต้นกำเนิดแสง (Light Source) ที่ใช้เป็น UV-Lamp ซึ่งให้แสงอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร
2. เซลล์ที่ใส่วัสดุตัวอย่าง (Sample Cell)
3. โมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงที่ได้ออกมาจากวัสดุตัวอย่างซึ่งในที่นี้ก็คือพอร์สซิติคอน โดยภายในจะประกอบไปด้วย ช่องแสงผ่าน กระจกและเลนส์ ส่วนที่ใช้ทำให้แสงกระจายออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ อันได้แก่ ตัวกรองความยาวคลื่น ปริซึม และเกรตติง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เครื่องวัดแสง (Radiation Detector) ที่ใช้เป็นหัววัดแสงโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier) มีสภาพความไวสูง และสามารถใช้วัดแสงได้ในช่วงความยาวคลื่น 190 - 900 นาโนเมตร

5. เครื่องขยายและวัดสัญญาณ โดยสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดจะถูกนำไปเข้ากระบวนการของระบบอิเล็กทรอนิกส์ อันได้แก่ การขยายสัญญาณให้มากขึ้น และการวัดสัญญาณไฟฟ้า (electrophotometer) เพื่อนำไปบันทึกเป็นสเปกตรัมของแสงในที่สุด

ในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี มาใช้เพื่อตรวจวัดสเปกตรัมของแสงที่ได้จากปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิกอน โดยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ใช้เป็นของบริษัท Nikon รุ่น G250 ดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 แสดงภาพถ่ายของเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ของ Nikon รุ่น G250

### 5.3 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์พันธะที่ผิวของนาโนพอร์สซิลิกอน

#### อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีแบบการแปลงฟูเรียร์ (FTIR) [27]

อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคอย่างหนึ่ง ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบ พิสูจน์ และศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของสาร โดยอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจะเป็นเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสาร เมื่ออะตอมของสารดูดกลืนแสงอินฟราเรดจะมีผลทำให้อะตอมภายในเอกสโคร์งผิดักเกิดการสั่น และเกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะระหว่างอะตอมดังนี้คือ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เกิดการยืด (Stretching) ของพันธะระหว่างอะตอม ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงความยาวระหว่างอะตอมที่มีพันธะต่อกัน

2. เกิดการงอ (Bending) ของพันธะระหว่างอะตอม ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างพันธะนั้นเอง

โดยในการบอกตำแหน่งของการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของอะตอมในสารใดๆ นั้น นิยมบอกเป็นจำนวนคลื่น (wave number , k) โดยมีค่าดังนี้คือ

$$k = 1 / \lambda (\text{cm}) \quad \text{cm}^{-1} \quad (5.2)$$

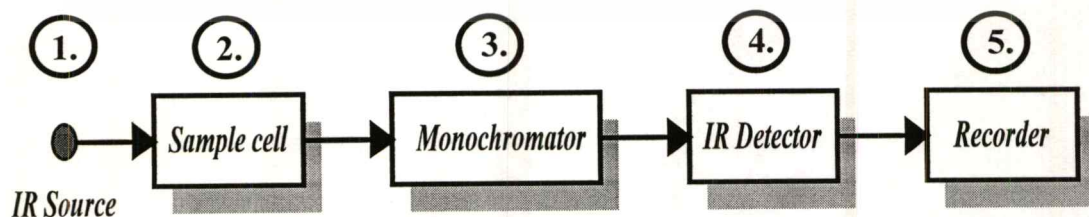
$$= 10^7 / \lambda (\text{nm}) \quad \text{cm}^{-1} \quad (5.3)$$

และ  $V = ck$  (5.4)

โดยที่  $V =$  ความถี่  
 $c =$  ความเร็วของแสง

โดยส่วนประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ได้ถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 5.8 จากรูปจะเห็นได้ว่า เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์จะประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญคือ

1. ต้นกำเนิดแสงอินฟราเรด ( IR Sources )
2. เซลล์ที่ใส่สารตัวอย่าง ( Sample cell )
3. โมโนโครมาเตอร์ ( Monochromator )
4. ตัวตรวจวัดแสงอินฟราเรด ( IR Detector )
5. เครื่องบันทึกสเปกตรัม ( Recorder )



รูปที่ 5.8 แสดงแผนภาพองค์ประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งวิธีการตรวจวัดโดยทั่วไป จะทำการบันทึกผลของค่าความเข้มของแสงต่อความถี่ หรือ ความยาวคลื่น หรือจำนวนคลื่น ได้ออกมาเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสง เรียกวิธีการวัดลักษณะนี้ว่า Frequency-domain spectroscopy ดังที่เห็นกันอยู่ทั่วไป แต่สำหรับการตรวจวัดการดูดกลืนแสงของ พอร์สซิติคอนนั้นได้ใช้วิธีการที่แตกต่างกันออกไป โดยจะทำการวัดความเข้มแสงที่ความยาวคลื่น ต่างๆกันอย่างต่อเนื่องเทียบกับเวลา เรียกวิธีการวัดในลักษณะแบบนี้ว่า Time-domain spectroscopy หรือที่โดยทั่วไปเรียกว่า Fourier Transform Spectroscopy นั่นเอง โดยสเปกตรัมที่ได้จากแบบ time-domain จะถูกเปลี่ยนเป็น frequency-domain ด้วย fourier transform จากการใช้ดิจิทัล คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ ซึ่งสิ่งที่ทำให้สเปกตรัมทั้งสองแบบมีความแตกต่างกันก็คือ สเปกตรัม การดูดกลืนแสงที่ได้จากการวัดแบบ frequency-domain จะเป็นสเปกตรัมที่ได้จากการวัดการดูดกลืน แสงที่ความถี่ต่างๆกันทีละครั้งในช่วงระยะเวลาหนึ่งๆ แต่การวัดแบบการแปลงฟูเรียร์จะเป็น สเปกตรัมที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงที่ความถี่ต่างๆ ในเวลาเดียวกัน ดังนั้นการแปลงฟูเรียร์จึง ช่วยทำให้การวิเคราะห์มีความรวดเร็วขึ้น และการแยกสัญญาณจะดีขึ้นกว่าแบบธรรมดา

ในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิค FTIR มาใช้เพื่อศึกษาถึงชนิดของพันธะที่บริเวณผิวของนาโน พอร์สซิติคอน ซึ่งเทคนิคนี้สามารถใช้วิเคราะห์ชนิดของพันธะได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยเครื่อง FTIR ที่นำมาใช้วิเคราะห์ได้แก่ Perkin Elmer รุ่น System 2000 ดังแสดงในรูปที่ 5.9 ซึ่ง เครื่องรุ่นนี้ สามารถศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของพันธะระหว่างอะตอมต่างๆ ได้ ในช่วง  $1,5000 - 370 \text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 5.9 แสดงภาพถ่ายของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น System 2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเนื่องจากผลึกซีกอนเป็นวัสดุของแข็งที่มีลักษณะเป็นมันสะท้อนแสงได้ ส่วนพอร์สซีกอนเป็นชั้นวัสดุที่สร้างอยู่บนผลึกซีกอนมีลักษณะทึบแสง ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงต้องใช้อุปกรณ์เสริมที่เรียกว่า Attenuated Total Reflectance (ATR) เข้าร่วมด้วย โดยจะนำสารตัวอย่าง (ผลึกซีกอน และพอร์สซีกอน) ไปติดอยู่กับผลึก ATR crystal ซึ่งเป็นผลึกของสารที่มีค่าดัชนีหักเหสูงมาก และแสงอินฟราเรดผ่านได้ เช่น แกลเลียม โบรไมด์ หรือแกลเลียม ไอโอไดด์ หรือ AgCl เมื่อลำแสงอินฟราเรดตกกระทบผลึกนี้เป็นมุมที่อาจเลือกได้ เช่น  $30^\circ$   $45^\circ$  หรือ  $60^\circ$  ลำแสงนั้นจะเกิดการสะท้อนอยู่ภายในมาครั้งด้วยกันที่บริเวณติดกันของสารกับผลึก แสงอินฟราเรดบางส่วนจะถูกดูดกลืน และแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับออกมาซึ่งจะถูกตรวจวัดด้วยดีเทคเตอร์ต่อไป ทำให้ท้ายสุดก็จะได้อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุนั้นๆออกมา

## 5.4 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซีกอนที่อุณหภูมิต่ำ

### เครื่อง Cryostat

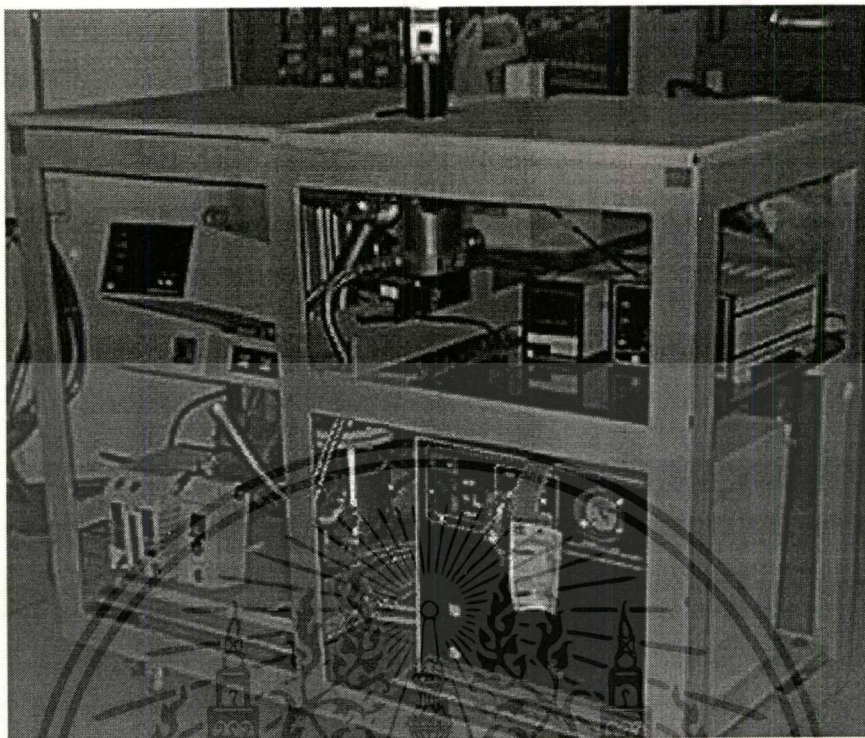
Cryostat เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบ ที่ความดันต่ำ มีประโยชน์เป็นอย่างมากสำหรับการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของวัสดุ ณ ที่อุณหภูมิต่ำ โดยหลักการทำงานของเครื่องจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับเครื่องทำความเย็นโดยทั่วไป เพียงแต่เครื่อง cryostat นั้นสามารถทำการลดอุณหภูมิได้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำอยู่มาก ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญๆของเครื่องจะประกอบด้วย

1. ภาชนะระบบปิด (Chamber) เป็นส่วนที่ใช้บรรจุวัสดุหรืออุปกรณ์ที่จะศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ณ ที่อุณหภูมิต่ำ โดยภายในจะเป็นระบบปิดที่เป็นสุญญากาศมีความดันประมาณ  $10^{-7}$  torr
2. คอมเพรสเซอร์ (Compressor) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิภายในภาชนะระบบปิดลงอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนเช่นเดียวกันกับเครื่องทำความเย็นทั่วไป โดยภายในจะใช้ฮีเลียมเหลวเป็นสารทำความเย็น
3. ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Low Temperature Controller) เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิภายในภาชนะระบบปิด ให้มีค่าตามโปรแกรมที่กำหนดไว้

โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ เครื่อง cryostat ก็เพื่อทำการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของชั้นพอร์สซีกอนที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งเครื่องที่นำมาใช้เป็นเครื่องของ LEYBOLD สามารถทำการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบได้ตั้งแต่ช่วง 20 - 300 องศาเคลวิน ดังแสดงในรูปที่ 5.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 แสดงภาพถ่ายของเครื่อง Cryostat ของ LEYBOLD

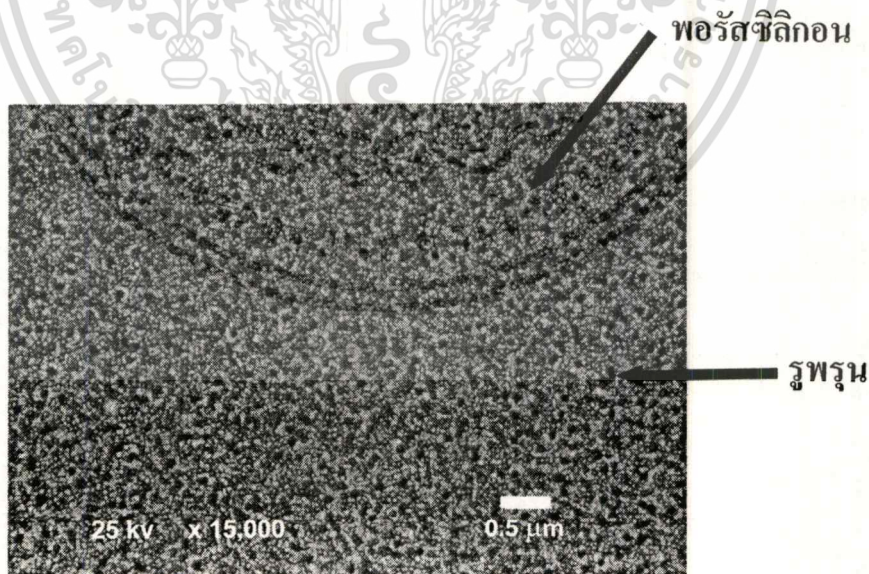
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 6.1 การทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นพอร์สซิติคอนด้วย SEM

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาถึงลักษณะ โครงสร้างของชั้นพอร์สซิติคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิติคอนทั้งชนิดพี และเอ็น ที่มีสภาพด้านทานที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร ไปจนถึง 10 โอห์ม-เซนติเมตร โดยใช้ความหนาแน่นกระแสในการ anodization มีค่าเท่ากับ  $10 \text{ mA/cm}^2$  ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20 % และใช้เวลาในการ anodization เท่ากับ 10 นาที ซึ่งภายหลังจากการสร้างเสร็จสมบูรณ์แล้วชั้นพอร์สซิติคอนที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้างด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) โดยลักษณะ โครงสร้างที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิติคอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพด้านทานค่าต่างๆจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.1 , 6.2 และ 6.3 ดังต่อไปนี้คือ

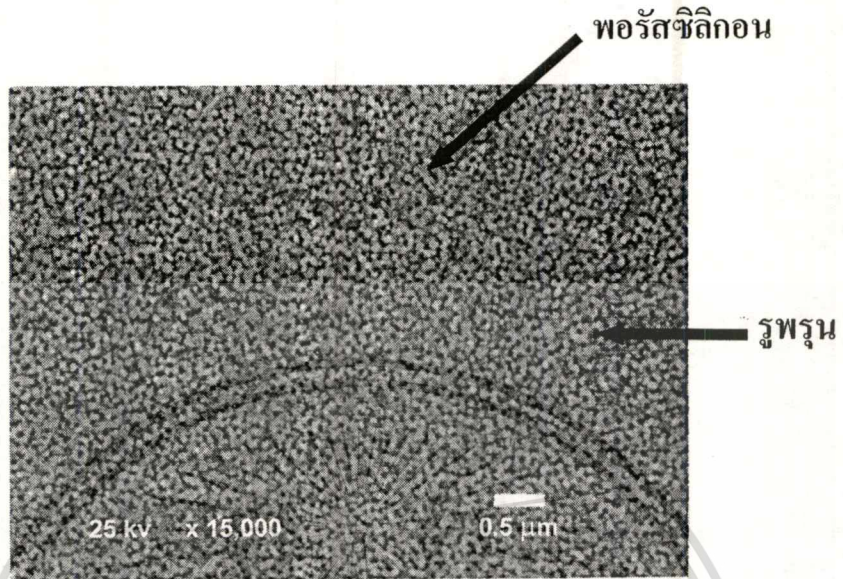


รูปที่ 6.1 แสดงภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิติคอน

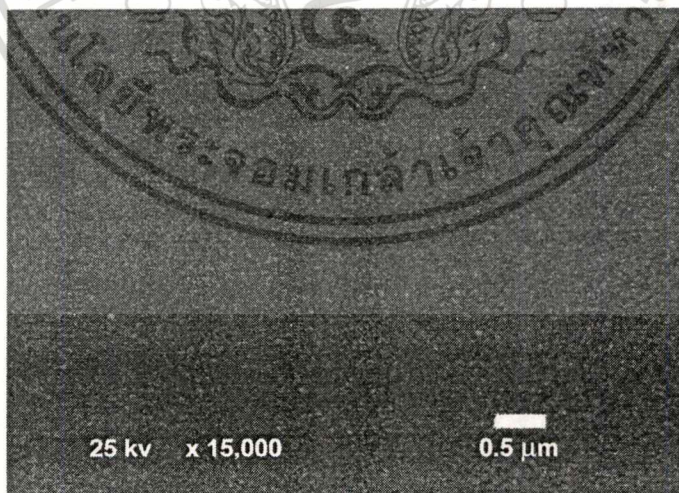
ชนิดเอ็น ที่มีสภาพด้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.2 แสดงภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร

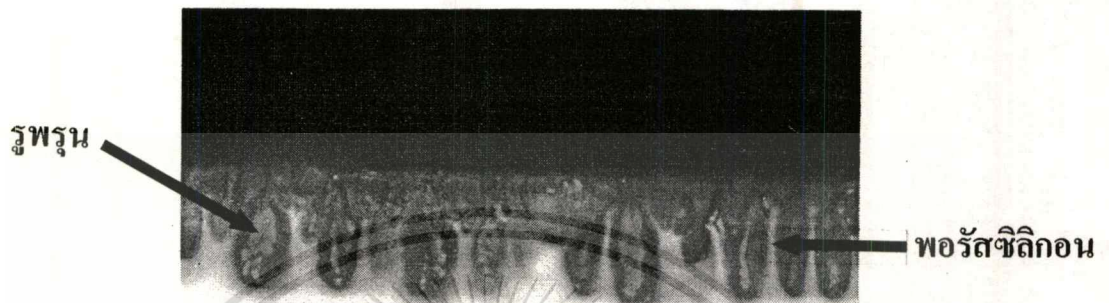


รูปที่ 6.3 แสดงภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอน

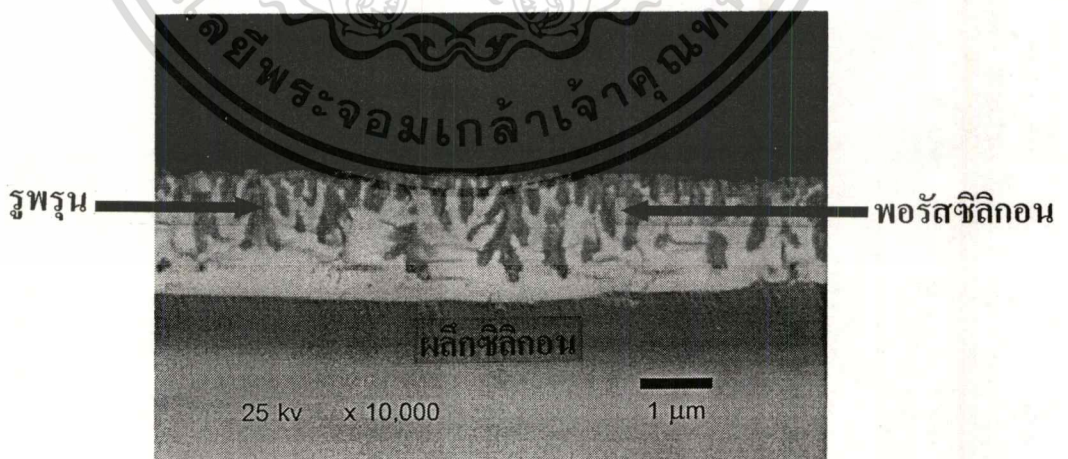
ชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทาน 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วน โครงสร้างในลักษณะภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซซาลิกอน ที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็็นที่มีสภาพด้านทานค่าต่างๆ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.4 , 6.5 และ 6.6 ดังนี้คือ

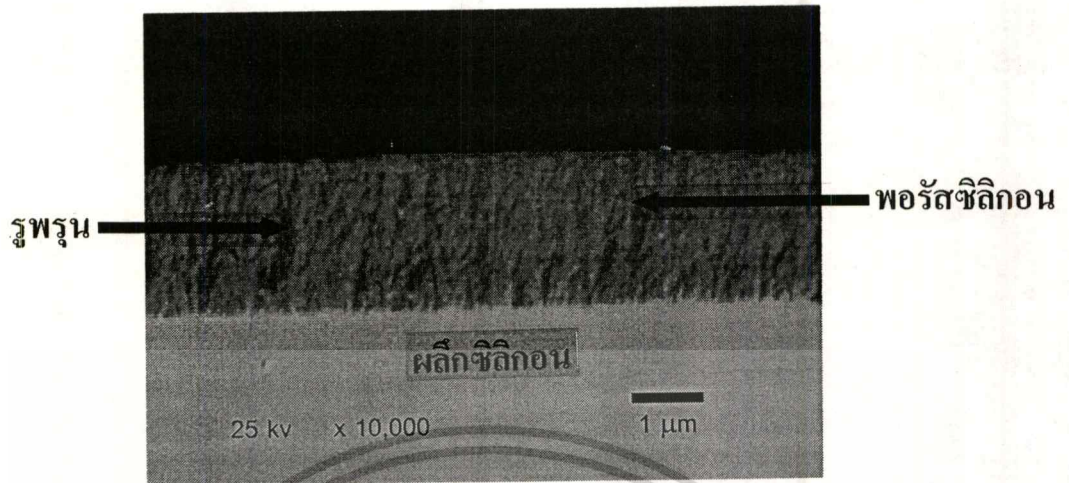


รูปที่ 6.4 แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซซาลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็็นที่มีสภาพด้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร



รูปที่ 6.5 แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์ซซาลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็็นที่มีสภาพด้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

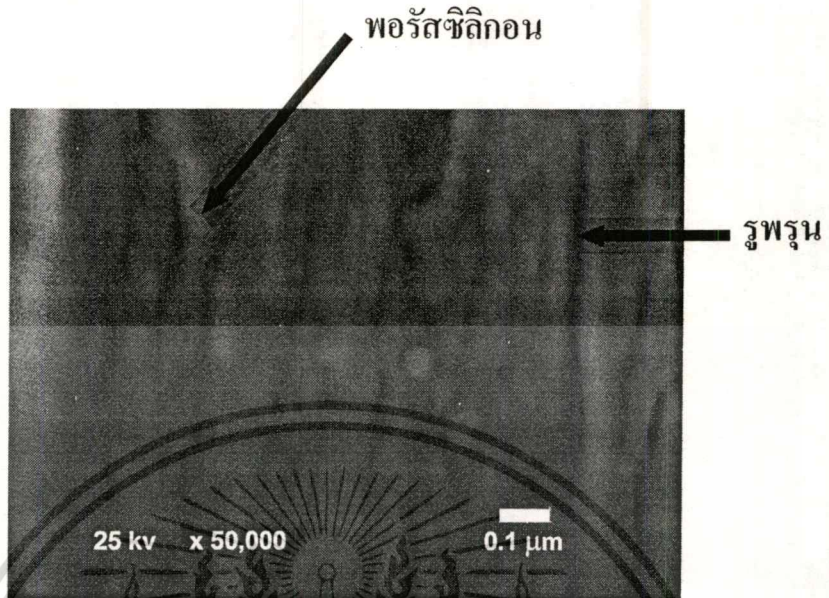


รูปที่ 6.6 แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทาน 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร

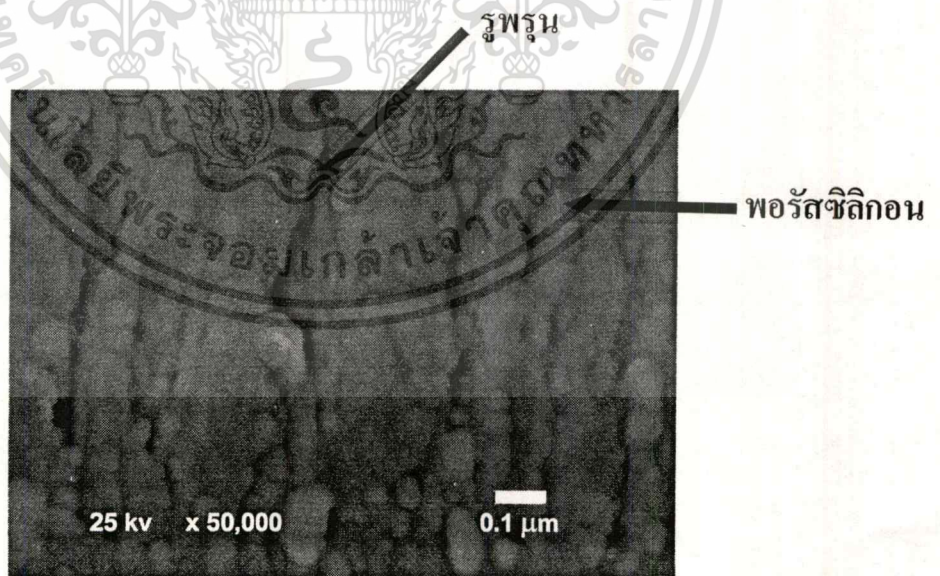
จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการลดค่าสภาพต้านทานของผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นลง จะมีผลทำให้โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนที่เกิดขึ้นมีขนาดลดลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการลดค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นลงนั้น เท่ากับเป็นการเพิ่มจำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้ในผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ซึ่งจะมีผลต่อความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (SCR) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการ anodization โดยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแสที่ปกคลุมอยู่รอบๆ โครงสร้างของพอร์สซิลิกอนจะมีขนาดลดลง ดังนั้นจึงทำให้โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดที่เล็กลงด้วย

แต่สำหรับชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพีนั้น จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างจะมีขนาดเล็กลง ก็ต่อเมื่อได้ทำการเพิ่มค่าสภาพต้านทานของผลึกซิลิกอนชนิดพีให้มีค่าสูงขึ้น โดยสามารถสังเกตได้จากภาพถ่ายโครงสร้างในลักษณะภาพตัดขวางของชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ที่มีค่าสภาพต้านทานเท่ากับ 1 โอห์ม-เซนติเมตร และ 10 โอห์ม-เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 6.7 และ 6.8 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มค่าสภาพต้านทานของผลึกซิลิกอนชนิดพีเท่ากับเป็นการลดจำนวนพาหะโฮลในผลึกซิลิกอน ซึ่งมีความสำคัญมากในกระบวนการกัดแบบ porous etching มีผลทำให้อัตราการกัดเนื้อผลึกซิลิกอนลดลง แต่จะมีความละเอียดในการกัดเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโฮลจำนวนน้อยๆ เหล่านี้จะถูกสนามไฟฟ้าดึงเข้ามาทำปฏิกิริยากัดที่บริเวณก้นหลุมของรูพรุนเป็นส่วนมาก ดังนั้นพอร์สซิลิกอนที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดของโครงสร้างที่มีความละเอียดสูงขึ้นกว่าเดิมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิติคอนชนิดพีที่มีสภาพด้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร

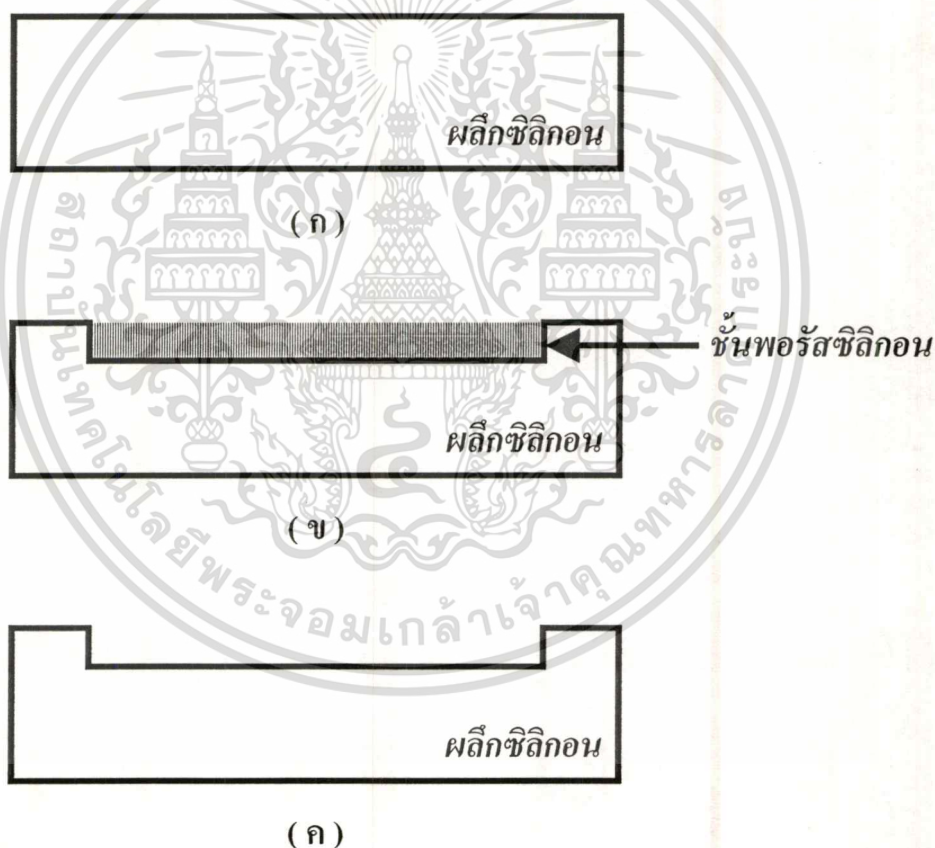


รูปที่ 6.8 แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิติคอนชนิดพีที่มีสภาพด้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 การทดลองเพื่อศึกษาค่าความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนที่เงื่อนไขในการ anodization ต่างๆ

ในการทดลองนี้ชั้นของพอร์สซิติคอนที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เงื่อนไขในการ anodization ต่างๆ จะถูกนำไปทำการวัดและคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน (porosity) ของชั้นพอร์สซิติคอน โดยในที่นี้ได้ใช้เทคนิคที่เรียกว่า Gravimetric method [26] ซึ่งเป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของแผ่นผลึกซิติคอนทั้งก่อนและหลังการสร้างชั้นพอร์สซิติคอน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 5.1.1 ซึ่งขั้นตอนในการวัดน้ำหนักของผลึกซิติคอนเพื่อนำไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนนี้ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 แสดงภาพตัดขวางจำลองของแผ่นผลึกซิติคอนลักษณะต่างๆที่ถูกทำการวัดน้ำหนัก เพื่อนำไปคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอน โดยที่

(ก) เป็นน้ำหนักของแผ่นผลึกซิติคอนเริ่มต้น ( $m_1$ )

(ข) เป็นน้ำหนักของแผ่นผลึกซิติคอนหลังจากผ่านกระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิติคอน ( $m_2$ )

(ค) เป็นน้ำหนักของแผ่นผลึกซิติคอนหลังจากทำการลอกชั้นพอร์สซิติคอนทิ้งแล้ว ( $m_3$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปข้างต้น จะเห็นได้ว่าตัวแปรที่สำคัญในการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนด้วยเทคนิคดังกล่าวนี้คือ น้ำหนักของแผ่นผลึกซิติคอนนั่นเอง ซึ่งมีอยู่ 3 ค่าด้วยกัน อันได้แก่

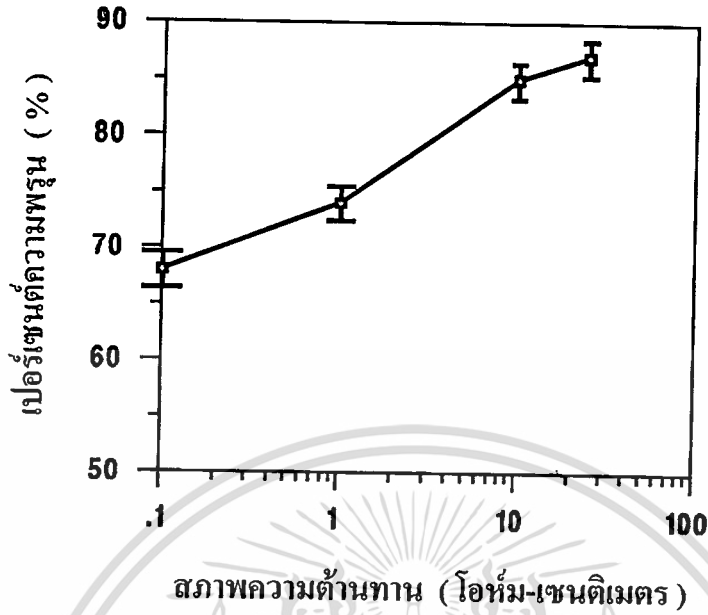
1. น้ำหนักของแผ่นผลึกซิติคอนเริ่มต้น ( $m_1$ ) เป็นน้ำหนักของแผ่นผลึกซิติคอนก่อนเข้ากระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิติคอนขึ้นที่บริเวณผิวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 6.9 (ก)
2. น้ำหนักของแผ่นผลึกซิติคอนหลังจากผ่านกระบวนการสร้างชั้นของพอร์สซิติคอน ( $m_2$ ) ขึ้นที่ผิวหน้าแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 6.9 (ข)
3. น้ำหนักของแผ่นผลึกซิติคอนหลังจากทำการลอกชั้นพอร์สซิติคอน ( $m_3$ ) ที่อยู่บริเวณผิวหน้าทิ้ง โดยขั้นตอนนี้ในการทดลองจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 1N เพื่อลอกชั้นของพอร์สซิติคอนออกจากแผ่นผลึกซิติคอน ดังแสดงในรูปที่ 6.9 (ค)

ในการทดลองน้ำหนักผลึกซิติคอนทั้ง 3 ค่านี้ ได้ถูกทำการวัดจากเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียดสูงของบริษัท SARTORIUS รุ่น 1602 MP เพื่อนำค่าน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอน ตามสมการที่ 5.1 ต่อไป

### 6.2.1 การศึกษาผลของชนิดและสภาพด้านทานของผลึกซิติคอนที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อ

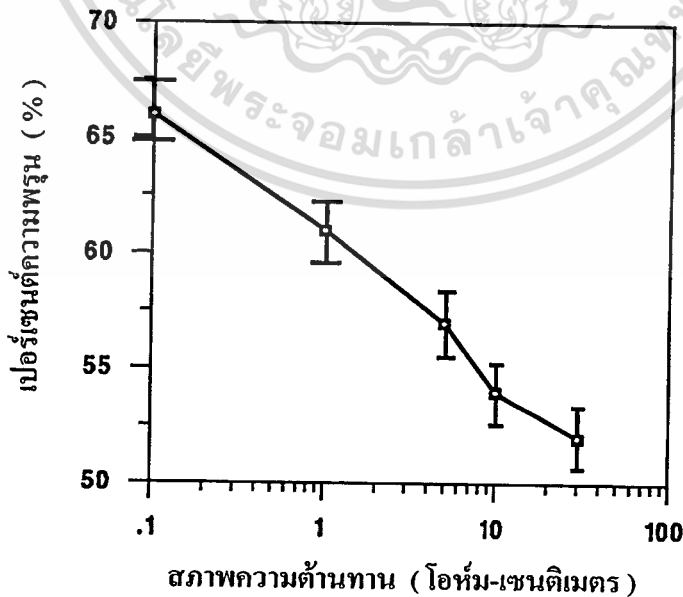
#### ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอน

ชั้นพอร์สซิติคอนที่นำมาศึกษาในการทดลองนี้ ได้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้ความหนาแน่นกระแส anodization มีค่าเท่ากับ  $10 \text{ mA/cm}^2$  ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20% และใช้เวลาในการ anodization เท่ากับ 10 นาที โดยในการทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงชนิดและสภาพด้านทานของแผ่นผลึกซิติคอน ที่ถูกใช้ในการ anodization เป็นแผ่นผลึกซิติคอนชนิดพี และชนิดเอ็น ที่มีสภาพด้านทานตั้งแต่ 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร ไปจนถึง 30 โอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งภายหลังจากการสร้างเสร็จสมบูรณ์ชั้นของพอร์สซิติคอนที่ได้ จะถูกนำไปผ่านขั้นตอนในการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่อไป โดยกราฟในรูปที่ 6.10 จะแสดงเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิติคอนชนิดพี ที่มีสภาพด้านทานค่าต่างๆ ดังนี้คือ



รูปที่ 6.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนกับค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี

ส่วนเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นที่มีค่าสภาพต้านทานต่าง ๆ นั้น จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนกับค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 6.10 และ 6.11 ข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพีให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร ไปจนถึง 30 โอห์ม-เซนติเมตร จะมีผลทำให้ชั้นของพอร์สซิลิกอนที่ได้มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่มากขึ้นกว่าเดิม คือ ตั้งแต่ 68 % ไปจนถึง 87 % ตามลำดับ ด้วยความสัมพันธ์ที่มีอัตราเท่ากับ 2.63 เปอร์เซ็นต์ต่อโอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งแตกต่างกับชั้นของพอร์สซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่จะมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ 52 % ไปจนถึง 66 % ด้วยความสัมพันธ์ที่มีอัตราเท่ากับ 1.02 เปอร์เซ็นต์ต่อโอห์ม-เซนติเมตรได้ ก็ต่อเมื่อทำการลดค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นลงจาก 30 โอห์ม-เซนติเมตร ไปจนถึง 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร และเมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี และชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทานเท่าๆกัน จะพบได้ว่าชั้นของพอร์สซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น จะมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่ต่ำกว่าชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพีเสมอ นั่นแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น จะมีขนาดที่ใหญ่กว่าโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอน ที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพีที่เงื่อนไขในการ anodization เดียวกัน

### 6.2.2 การศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ใช้ในการ

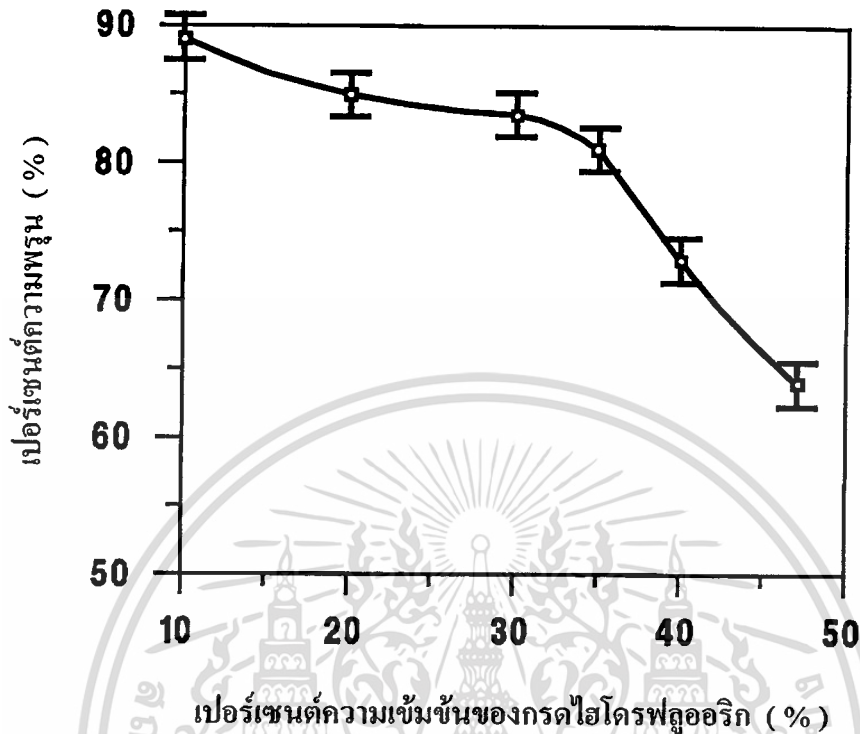
#### anodization ที่มีต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน

ชั้นพอร์สซิลิกอนที่ใช้เพื่อการศึกษาในกรณีนี้ จะถูกสร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ระบาย (100) มีสภาพต้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร โดยใช้ความหนาแน่นกระแส anodization มีค่าเท่ากับ  $10 \text{ mA/cm}^2$  และใช้เวลาเท่ากับ 10 นาที ในการทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกที่ใช้เป็น 10% , 20% , 30% , 35% , 40% และ 47% ตามลำดับ ชั้นของพอร์สซิลิกอนที่ได้จากการสร้างตามเงื่อนไขต่างๆเหล่านี้ จะถูกนำไปทำการวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความพรุน ซึ่งผลที่ได้จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.12

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 6.12 ข้างต้น จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการลดเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกที่ใช้ในระหว่างการ anodization ลง จาก 47 % ไปจนถึง 10 % จะมีผลทำให้ชั้นพอร์สซิลิกอนที่เกิดขึ้นมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มสูงขึ้น คือ ตั้งแต่ 65 % ไปจนถึง 89 % ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการลดความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกเท่ากับเป็นการลดจำนวนไอออนของฟลูออรีนลงด้วย ทำให้ไฮลที่อยู๋ภายในผลึกซิลิกอนมีจำนวนที่มากกว่า ดังนั้นปฏิกิริยาในการกัดจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นได้ ซึ่งจะไปมีผลทำให้ขนาดโครงสร้างพอร์สซิลิกอนลดลงนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นว่าเป็นประโยชน์ด้านการค้า

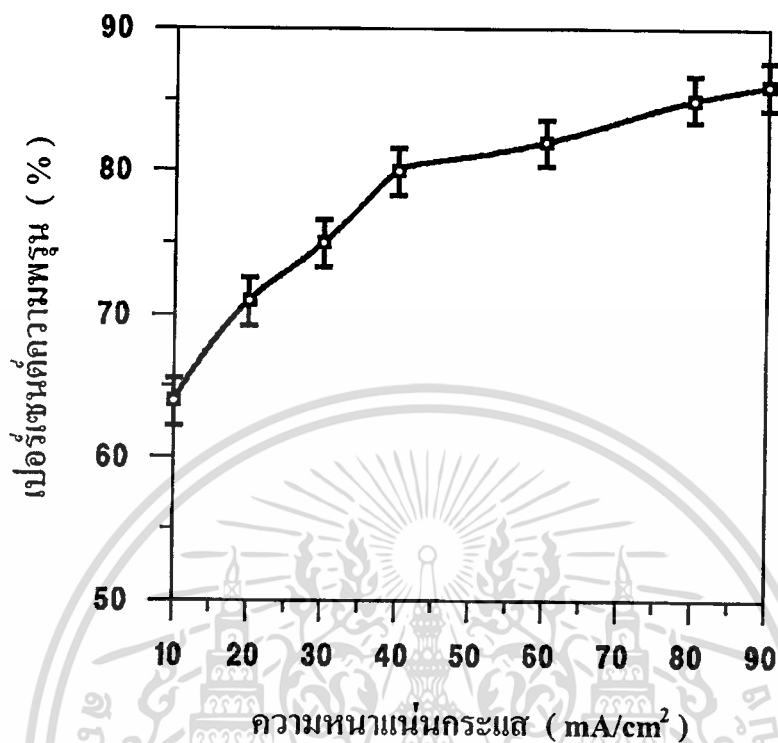
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอนกับปริมาณความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ที่ใช้ในระหว่างการ anodization

### 6.2.3 การศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน

ชั้นพอร์สซิลิกอนที่นำมาศึกษาในกรณีนี้ จะถูกสร้างขึ้นโดยใช้เงื่อนไขในการ anodization ดังต่อไปนี้คือ ใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ระบาย (100) สภาพด้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร ต่อจากนั้นทำการ anodization เป็นเวลาเท่ากับ 10 นาที ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 47% โดยในการทดลองนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้เป็นค่าต่างๆ ตั้งแต่ 10 mA/cm<sup>2</sup> ไปจนถึงที่ 90 mA/cm<sup>2</sup> ต่อจากนั้นชั้นของพอร์สซิลิกอนที่สร้างตามเงื่อนไขต่างๆ ข้างต้น ก็จะถูกนำไปผ่านขั้นตอนในการวัดและคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอนที่ความหนาแน่นกระแสต่างๆ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.13



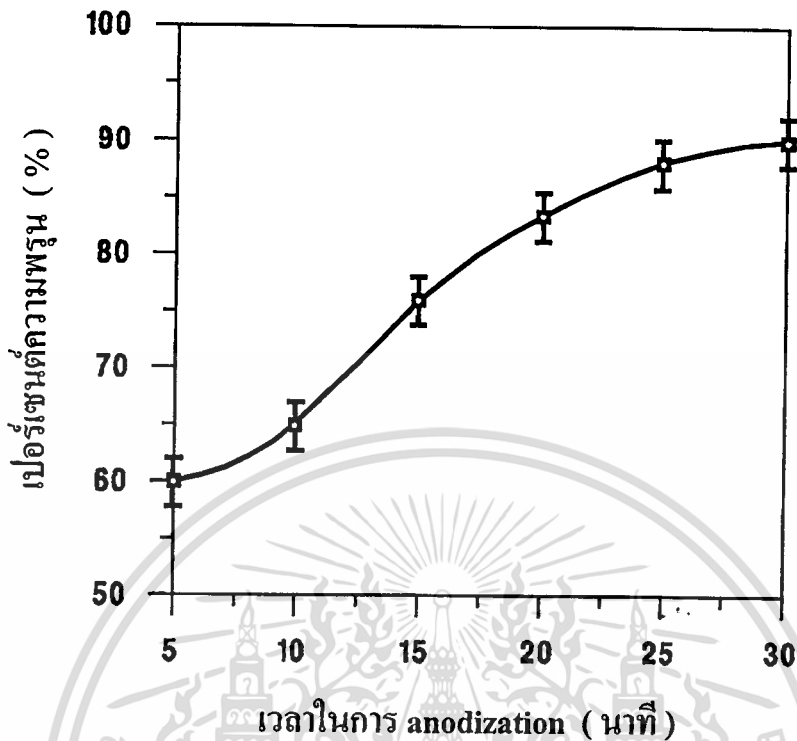
รูปที่ 6.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนกับค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า ชั้นพอร์สซิติคอนที่ถูกสร้างขึ้นมาจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ 64 % ไปจนถึง 86 % เมื่อทำการเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส anodization ให้มีค่าสูงขึ้น ตั้งแต่ 10 mA/cm<sup>2</sup> ไปจนถึง 90 mA/cm<sup>2</sup> ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความหนาแน่นกระแส มีผลทำให้ปฏิกิริยาการกัดเนื้อผลึกซิติคอนมีค่าที่สูงขึ้นด้วย ทำให้สามารถลดขนาดโครงสร้างพอร์สซิติคอนลงไปได้อีก ซึ่งจะไปมีผลต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนที่จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง

#### 6.2.4 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization ที่มีต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอน

ชั้นพอร์สซิติคอนที่นำมาทำการศึกษาจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้เงื่อนไขในการ anodization ดังต่อไปนี้คือ ใช้แผ่นผลึกซิติคอนชนิดพี ระนาบ (100) มีสภาพด้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร ความหนาแน่นกระแสที่ใช้มีค่าเท่ากับ 10 mA/cm<sup>2</sup> ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 47% โดยในการทดลองได้มีการเปลี่ยนแปลงค่าเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization เป็นค่าต่างๆ ตั้งแต่ 5 นาที จนไปถึง 30 นาที ชั้นของพอร์สซิติคอนที่ได้จากการสร้างตามเงื่อนไขเหล่านี้ จะมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงผลเอาไว้ในรูปที่ 6.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์ซซลิคอนกับเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 6.14 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มเวลา anodization จาก 5 นาที ไปจนถึง 30 นาที จะมีผลทำให้ชั้นพอร์ซซลิคอนที่เกิดขึ้นมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้น จาก 60 % ไปถึง 90 % ได้ ทั้งนี้เนื่องจากการลดลงของขนาดโครงสร้างพอร์ซซลิคอนนั่นเอง

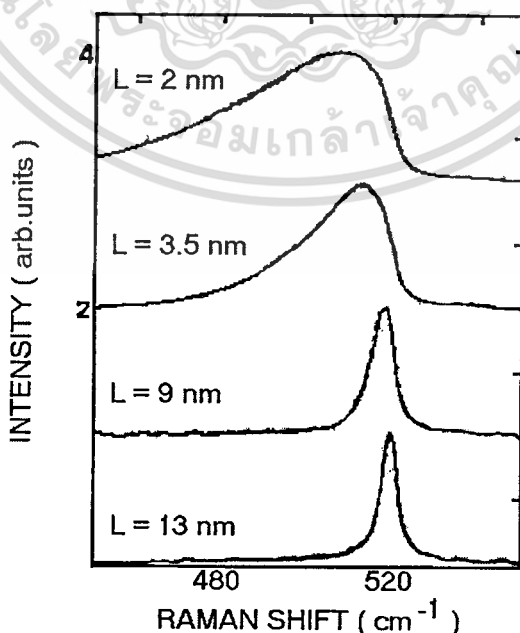
จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 6.2.1 , 6.2.2 , 6.2.3 และ 6.2.4 ที่แสดงข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการ anodization ต่างๆ อันได้แก่ การเพิ่มค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซลิคอนชนิดพีตั้งแต่ 0.1-30 โอห์ม-เซนติเมตร หรือการลดค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซลิคอนชนิดเอ็นตั้งแต่ 30-1 โอห์ม-เซนติเมตร การลดปริมาณความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกตั้งแต่ 47%-10% การเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสตั้งแต่ 10-90 mA/cm<sup>2</sup> หรือการเพิ่มเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization ตั้งแต่ 5-30 นาที นั้น จะมีผลทำให้ชั้นพอร์ซซลิคอนที่สร้างขึ้นมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มสูงขึ้นจากเดิมตั้งแต่ 54% ไปจนถึง 90% ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนนี้เกี่ยวข้องกับการลดลงของขนาดโครงสร้างพอร์ซซลิคอน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.5 และเพื่อเป็นการยืนยันผลที่เกิดขึ้นดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาขนาดของโครงสร้างพอร์ซซลิคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ ในผลการทดลองหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3 การทดลองเพื่อศึกษาขนาดของโครงสร้างพอร์ซซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ

ในการหาขนาดของโครงสร้างพอร์ซซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ โดยทำการศึกษาและวิเคราะห์จากรูปภาพที่ได้จากเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) นั้น พบว่ายังให้ความละเอียดในการวิเคราะห์ที่ไม่เพียงพอ เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านกำลังขยายและความสามารถของเครื่อง ซึ่งโดยทั่วไปในการวิเคราะห์หาขนาดของโครงสร้างของวัสดุใดๆในระดับนาโนเมตร มักจะนิยมใช้เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ซึ่งมีกำลังขยายและความสามารถของเครื่องที่สูงกว่าเครื่อง SEM อยู่มาก แต่เทคนิคดังกล่าวนี้มีความยุ่งยากในการเตรียมสารตัวอย่าง เนื่องจากจะต้องทำให้สารตัวอย่างมีความบางมากๆก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ อีกทั้งเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ชนิดนี้มีอยู่เพียงไม่กี่เครื่องในประเทศไทย ดังนั้นในการหาขนาดของพอร์ซซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ ในการทดลองนี้จึงได้นำเทคนิครามานสเปกโทรสโกปีมาใช้ในการวิเคราะห์แทน ดังที่ได้กล่าวถึงหลักการของเทคนิคนี้มาแล้วในหัวข้อที่ 5.1.3

เริ่มต้นการทดลองได้ทำการสร้างชั้นพอร์ซซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนค่าต่างๆขึ้นมา โดยใช้เงื่อนไขในการ anodization ที่แตกต่างกัน ต่อจากนั้นจึงนำชั้นพอร์ซซิลิกอนเหล่านี้ไปทำการวัดสเปกตรัมรามาน ซึ่งสเปกตรัมรามานของพอร์ซซิลิกอนที่ได้ออกมา จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับเพื่อหาขนาดของโครงสร้างพอร์ซซิลิกอน กับสเปกตรัมรามานของผลึกซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยตรงให้มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรค่าต่างๆที่แน่นอน ที่ได้ถูกรายงานไว้โดย Kanemitsu [12] ดังแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.15

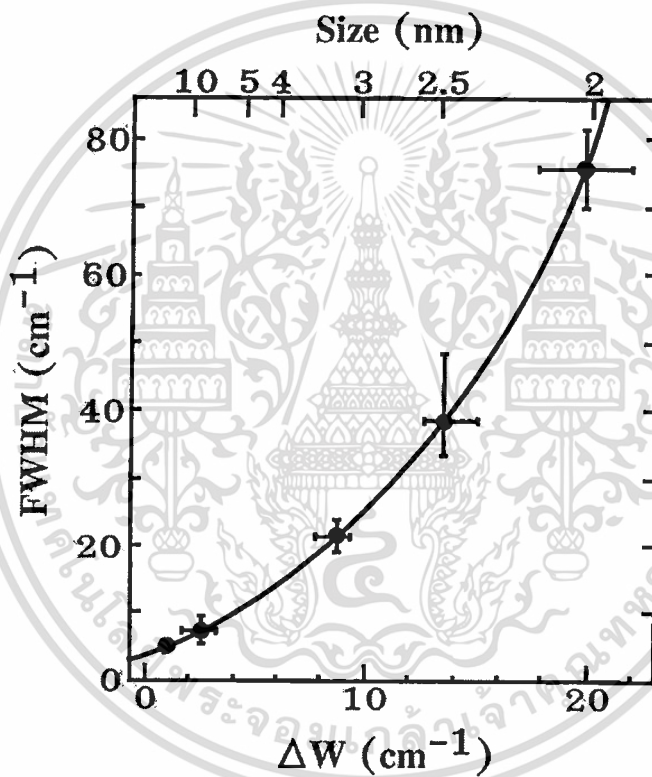


รูปที่ 6.15 แสดงสเปกตรัมรามานของผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรต่างๆ [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อขนาดของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตร (L) มีค่าลดลง สเปกตรัมรามานที่ได้จะมีค่าความกว้างที่ครึ่งของความสูงสเปกตรัม (FWHM) มากขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณสเปกตรัมรามาน ( $\Delta\omega$ ) ลดลงจากเดิมด้วย ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกว้างที่ครึ่งของความสูงสเปกตรัม และค่าการเปลี่ยนแปลงลดลงของความถี่สัญญาณสเปกตรัมรามาน กับขนาดในระดับนาโนเมตรของผลึกซิลิกอน ได้ถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความกว้างที่ครึ่งของความสูง และค่าการเปลี่ยนแปลงลดลงของความถี่สัญญาณสเปกตรัมรามาน กับขนาดของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตร [12]

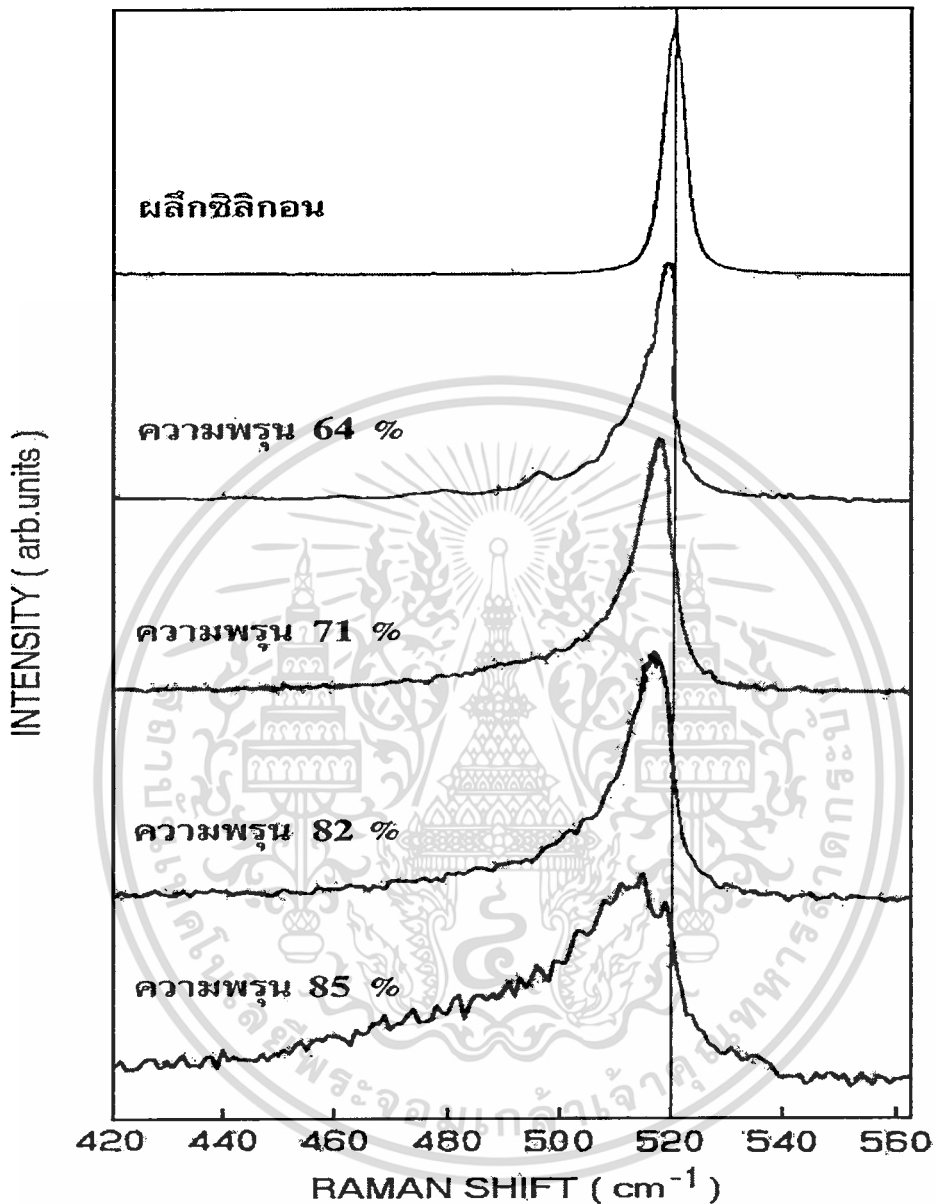
ในส่วนของชั้นพอร์ซซิลิกอนที่นำมาศึกษาในการทดลองนี้ ได้ถูกทำการสร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ที่มีค่าสภาพต้านทานเท่ากับ 10 โอห์ม-เซนติเมตร โดยมีการใช้เงื่อนไขในการ anodization ที่แตกต่างกันออกไป เพื่อให้ได้ชั้นของพอร์ซซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนค่าต่างๆ ดังแสดงเอาไว้ในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 แสดงเงื่อนไขในการ anodization เพื่อสร้างชั้นของพอร์ซซิติกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนค่าต่างๆ

เงื่อนไขในการ anodization				เปอร์เซ็นต์ความพรุน (%)
สภาพต้านทาน ( $\Omega$ -cm)	ความหนาแน่นกระแส ( $\text{mA/cm}^2$ )	HF (%)	เวลา (นาที)	
10 $\Omega$ -cm	10 $\text{mA/cm}^2$	47 %	10 นาที	$\approx 64$ %
10 $\Omega$ -cm	20 $\text{mA/cm}^2$	47 %	10 นาที	$\approx 71$ %
10 $\Omega$ -cm	10 $\text{mA/cm}^2$	47 %	20 นาที	$\approx 82$ %
10 $\Omega$ -cm	10 $\text{mA/cm}^2$	20 %	10 นาที	$\approx 85$ %

ต่อจากนั้นจึงนำชั้นพอร์ซซิติกอนเหล่านี้ ไปทำการวัดสเปกตรัมรามานด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มรามานสเปกโตรมิเตอร์ (FT-Raman Spectrometer) ของ Renishaw รุ่น System 2000 ซึ่งผลการวัดสเปกตรัมรามานของชั้นพอร์ซซิติกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ เปรียบเทียบกับสเปกตรัมรามานของผลึกซิติกอน ได้ถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.17 แสดงสเปกตรัมรามานของพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนค่าต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่า สเปกตรัมรามานของพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่แตกต่างกัน จะมีค่าความกว้างที่ครึ่งของความสูงสเปกตรัม (FWHM) และมีค่าการเปลี่ยนแปลงลดลงของความถี่สัญญาณสเปกตรัมรามาน ( $\Delta\omega$ ) ที่แตกต่างกันออกไปด้วย ซึ่งค่าทั้งสองนี้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 6.16 แล้ว ทำให้สามารถทราบถึงขนาด โครงสร้างของพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ค่าต่างๆ ได้ ดังสรุปข้อมูลต่างๆเอาไว้ในตารางที่ 6.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.2 แสดงข้อมูลต่างๆของสเปกตรัมรามานของชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน  
ค่าต่างๆ

เปอร์เซ็นต์ความพรุน (%)	รามานชิฟท์ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\Delta\omega$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	FWHM ( $\text{cm}^{-1}$ )	ขนาด* (nm)
ผลึกซิลิกอน	520	0	3	-
$\approx 64\%$	519	1	5	$\approx 12$
$\approx 71\%$	517	3	7.5	$\approx 7$
$\approx 82\%$	516	4	10	$\approx 5$
$\approx 85\%$	512	8	25	$\approx 3.5$

\* ตัวเลขได้มาจากการเปรียบเทียบข้อมูลกับกราฟในรูปที่ 6.16

จากตารางที่ 6.2 ข้างต้น จะเห็นได้ว่าเมื่อชั้นพอร์สซิลิกอนมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้น คือตั้งแต่ 65% ถึง 85% นั้น สเปกตรัมรามานที่ได้จะมีการกระจายตัวมากขึ้นกว่าเดิม โดยสามารถสังเกตได้จากค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงสเปกตรัม (FWHM) ที่มีค่าเพิ่มขึ้นจาก  $5 \text{ cm}^{-1}$  ไปถึง  $25 \text{ cm}^{-1}$  และมีค่าการเปลี่ยนแปลงลดลงของความถี่สัญญาณสเปกตรัมรามาน ( $\Delta\omega$ ) มากขึ้น คือตั้งแต่  $1 \text{ cm}^{-1}$  ไปถึง  $8 \text{ cm}^{-1}$  เมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมรามานของผลึกซิลิกอนซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง  $520 \text{ cm}^{-1}$  และจากการนำข้อมูลเหล่านี้ไปเปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 6.16 นั้น พบว่าพอร์สซิลิกอนจะมีขนาดของโครงสร้างเล็กกลงๆ เมื่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนมีค่าสูงขึ้น โดยชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน 64% จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ประมาณ 12 นาโนเมตร ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน 71% มีขนาดของโครงสร้างประมาณ 7 นาโนเมตร ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน 82% มีขนาดของโครงสร้างประมาณ 5 นาโนเมตร และค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน 85% จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ประมาณ 3.5 นาโนเมตร การลดลงของขนาดโครงสร้างพอร์สซิลิกอนในระดับนาโนเมตรนี้ จะมีผลต่อขนาดช่องว่างพลังงานของพอร์สซิลิกอน เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ Quantum wire effect ซึ่งเราสามารถศึกษาปรากฏการณ์นี้ได้จากคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอน จากผลการทดลองในหัวข้อต่อไป

## 6.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของโครงสร้างของชั้นพอร์สซิติคอนที่มีต่อคุณสมบัติโฟโตรีโวลต์

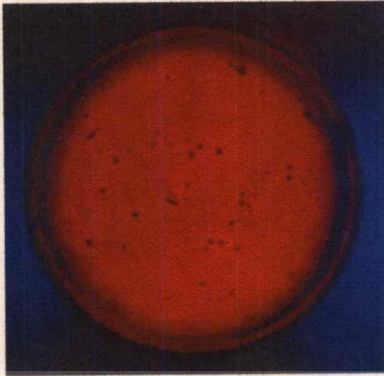
ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาดังผลของโครงสร้างชั้นพอร์สซิติคอนที่มีต่อคุณสมบัติโฟโตรีโวลต์ ลูมินิสเซนซ์ ทั้งในส่วนของความยาวคลื่น และความเข้มแสง โดยโครงสร้างของชั้นพอร์สซิติคอน ที่นำมาศึกษานี้จะถูกทำการสร้างขึ้นมาให้มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่แตกต่างกัน ซึ่งเราสามารถพิจารณาอย่างคร่าวๆได้ โดยการสังเกตจากสีที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์สซิติคอน ดังแสดงในรูปที่ 6.18



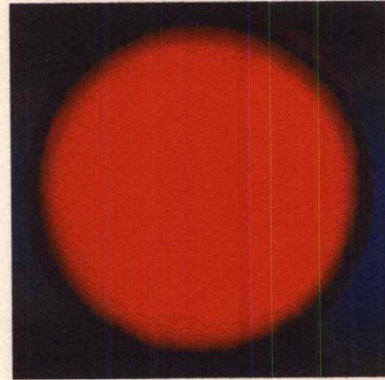
รูปที่ 6.18 แสดงสีที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอร์สซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนค่าต่างๆ

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อชั้นพอร์สซิติคอนถูกสร้างให้มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้น สีที่บริเวณผิวหน้าด้านบนจะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนไปด้วย โดยการเปลี่ยนแปลงจะเริ่มต้นจากสีน้ำตาลอมดำ ไปสู่น้ำตาลอมแดง และสีเหลือง ในที่สุด เมื่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอนมีค่ามากขึ้นตั้งแต่ 60 % ไปจนถึง 85 % และเมื่อนำชั้นพอร์สซิติคอนที่แสดงในรูปที่ 6.18 เหล่านี้ ไปทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ก็จะเกิดปรากฏการณ์โฟโตรีโวลต์ลูมินิสเซนซ์ โดยชั้นพอร์สซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างกันจะให้สีของแสงโฟโตรีโวลต์ลูมินิสเซนซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆ แตกต่างกันไป ดังแสดงในรูปที่ 6.19

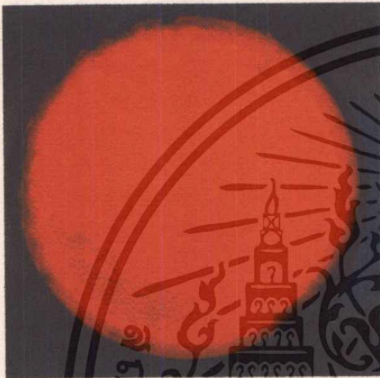
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความยาวคลื่น 615 นาโนเมตร (60%)



ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (68%)



ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร (76%)

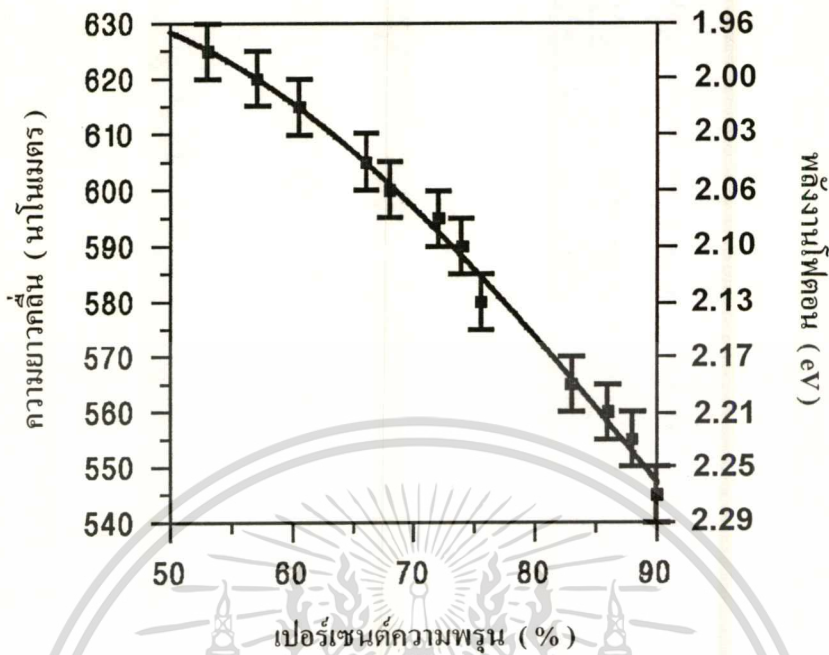


ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร (85%)

รูปที่ 6.19 แสดงสีของแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ซึ่งได้จากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่แตกต่างกัน

จากรูปข้างต้น สีของแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน โดยการเปลี่ยนแปลงจะเริ่มจากสีแดงเข้มที่ความยาวคลื่น 615 นาโนเมตร ที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 60% ไปสู่ สีแดงอมส้มที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 68% สีส้มอมเหลืองที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร ที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 76% และสีเหลืองที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 85% จะเห็นได้ว่าสีเหล่านี้มีค่าความยาวคลื่นแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์เปลี่ยนแปลงลดลง เมื่อชั้นพอร์สซิลิกอนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มสูงมากขึ้นนั่นเอง และจากการทดลองในหัวข้อที่ 6.2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของเงื่อนไขในการ anodization ต่างๆ ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนของโครงสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนนั้น ในการทดลองนี้ได้ทำการรวบรวมความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน กับคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในส่วนของความยาวคลื่นแสง เอาไว้ในรูปที่ 6.20

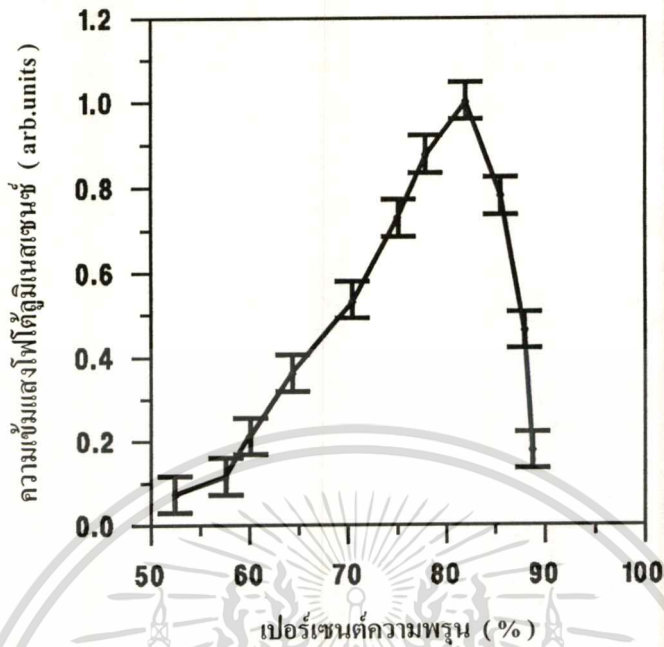
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอนกับความยาวคลื่นแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อเราทำการลดขนาดโครงสร้างในระดับนาโนเมตรของพอร์สซิลิกอนลง โดยการเพิ่มค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนให้แก่ชั้นพอร์สซิลิกอน ด้วยการใช้เงื่อนไขในการ anodization ต่างๆ อาทิเช่น การเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส การลดเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริก หรือการเพิ่มเวลาในการ anodization เป็นต้นนั้น จะมีผลทำให้ความยาวคลื่นแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์มีค่าลดลง หรืออีกความหมายหนึ่งก็คือ โครงสร้างพอร์สซิลิกอนมีขนาดของช่องว่างพลังงานเพิ่มสูงมากขึ้นจากเดิม โดยสามารถดูได้จากค่าพลังงานโฟตอนของยอดสเปกตรัมแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่มีค่ามากขึ้นนั่นเอง ซึ่งจากผลการทดลองนี้พบว่าชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่ำกว่า 50 % ลงไปนั้น จะไม่แสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์แต่อย่างใด ส่วนชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ 54 % จนไปถึง 90 % จะแสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ โดยจะมีความยาวคลื่นแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ลดลงจาก 625 นาโนเมตร ไปสู่ 545 นาโนเมตร หรือมีค่าพลังงานโฟตอนของยอดสเปกตรัมเพิ่มขึ้นจาก 1.98 eV ไปถึง 2.27 eV นั่นเอง ซึ่งทั้งหมดที่ได้แสดงมานี้สามารถยืนยันถึงการเกิดปรากฏการณ์ Quantum size effect หรือ Quantum wire effect ได้เป็นอย่างดี

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน กับคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในส่วนของความเข้มแสง จะถูกนำมาแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.21 ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

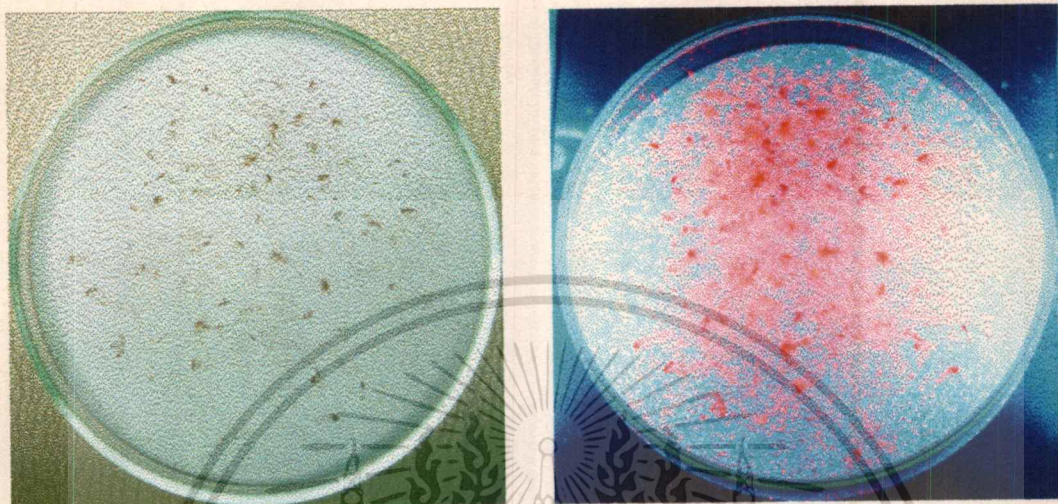


รูปที่ 6.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซีลิกอนกับความเข้มแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์

จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นได้ว่าเมื่อชั้นพอร์สซีลิกอนมีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้น ปริมาณความเข้มแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ได้ออกมาจะมีความมากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากชั้นพอร์สซีลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้นไปจะมีพื้นที่ผิวของโครงสร้างพอร์สซีลิกอนมากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งเท่ากับเป็นการไปเพิ่มพื้นที่ในการเปล่งแสง ดังนั้นเมื่อเกิดปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ จึงทำให้ชั้นพอร์สซีลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงกว่า มีปริมาณความเข้มแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์สูงขึ้นตามด้วย ซึ่งจากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 6.21 พบว่าปริมาณความเข้มแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซีลิกอนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยความเข้มแสงจะมีปริมาณสูงที่สุด เมื่อชั้นพอร์สซีลิกอนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 81% - 83% ต่อจากนั้นปริมาณความเข้มแสงก็จะมีค่าลดลง เมื่อเปอร์เซ็นต์ความพรุนมีค่าสูงเกินกว่านี้ขึ้นไป สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากชั้นพอร์สซีลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงมากานั้น โครงสร้างจะมีความอ่อนแอ และมีความเปราะบางสูงมากตามไปด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โครงสร้างที่มีขนาดเล็กหลายๆบางส่วนสามารถหลุดออกมาในระหว่างกระบวนการสร้าง หรือกระบวนการทำความสะอาดผิวหน้าได้ ชิ้นส่วนของพอร์สซีลิกอนที่หลุดออกมานี้เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นผงละเอียดที่มีขนาดเล็กมากๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.22 (ก) โดยผง

ละเอียดเหล่านี้สามารถแสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ได้ เมื่อถูกทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเล็ต อย่างไรก็ตามทั้งสีอื่นที่เห็นในรูปนี้ก็เป็นเพียงสีที่ปรากฏขึ้นเท่านั้น ไม่ใช่ว่าจริงแล้วสีเหล่านั้นจะเปลี่ยนสีจริงๆได้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไวโอเลต ดังแสดงในรูปที่ 6.22 ( ข ) เรียกชิ้นส่วนของพอร์สซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดเหล่านี้ว่า “ Free standing porous silicon ”



(ก)

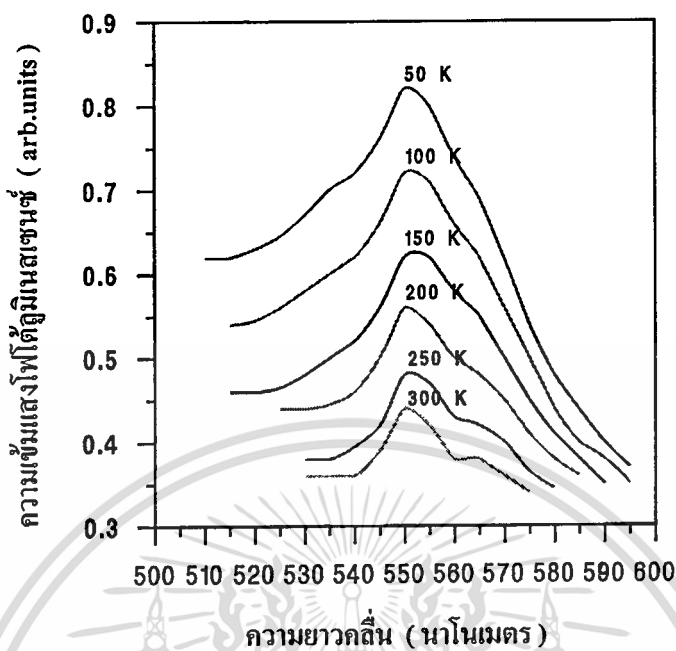
(ข)

รูปที่ 6.22 แสดงภาพถ่ายของ Free standing porous silicon ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด โดยที่  
 ( ก ) ก่อนทำการฉายแสงด้วยแสงอุลตราไวโอเลต  
 ( ข ) ขณะทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลต

## 6.5 การทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอน

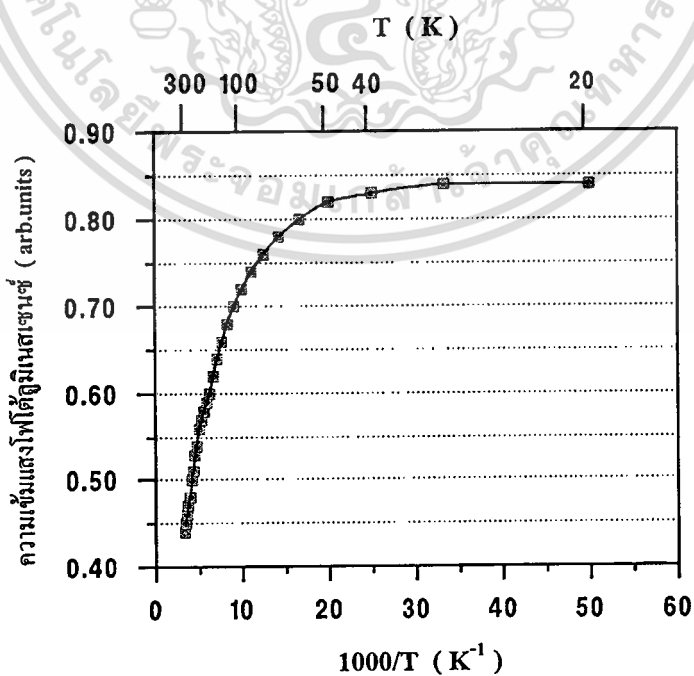
ในการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนนี้ ชิ้นส่วนของพอร์สซิลิกอนที่นำมาศึกษาจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ระบาย ( 100 ) มีสภาพต้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร ใช้ความหนาแน่นกระแสในการ anodization มีค่าเท่ากับ  $10 \text{ mA/cm}^2$  ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20% และใช้เวลาในการ anodization เท่ากับ 10 นาที พอร์สซิลิกอนที่ได้ทำการสร้างขึ้นตามเงื่อนไขเหล่านี้จะถูกนำไปบรรจุอยู่ในภาชนะระบบปิดของเครื่อง Cryostat ในสภาพแวดล้อมของสุญญากาศที่ความดัน  $6 \times 10^{-7} \text{ mbar}$  ต่อจากนั้นก็จะทำการลดอุณหภูมิภายในระบบให้มีค่าที่ต่ำลงในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 300 เคลวิน จนถึง 20 เคลวิน โดยในระหว่างการลดอุณหภูมินั้นก็จะทำการวัดสเปกตรัมของแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่างๆด้วย ดังแสดงในรูปที่ 6.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.23 แสดงสเปกตรัมแสงโฟลัดลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ตซิลิกอนที่อุณหภูมิต่างๆ

ส่วนความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่มีต่อความเข้มแสงโฟลัดลูมิเนสเซนซ์นั้น จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.24



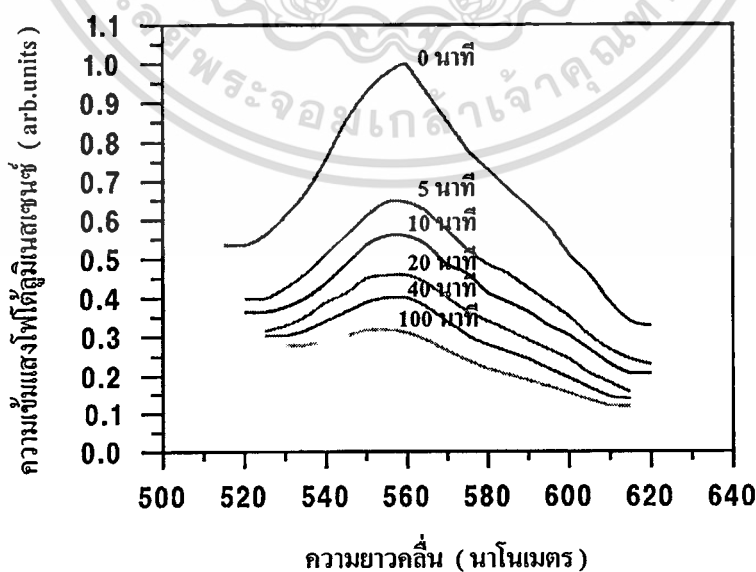
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ผู้สอนที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีในการค้า  
รูปที่ 6.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟลัดลูมิเนสเซนซ์กับอุณหภูมิ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการลดอุณหภูมิภายในระบบให้มีค่าที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องลงไปนั้น จะมีผลทำให้ความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 300 เคลวิน จนไปถึงที่อุณหภูมิประมาณ 100 เคลวิน ต่อจากนั้นความเข้มแสงก็จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนมีค่าคงที่ในที่สุด เมื่ออุณหภูมิมียุคต่ำกว่า 50 เคลวิน ลงไป ทั้งนี้ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำๆนั้น จะลดผลของพลังงานกระตุ้นเนื่องจากความร้อนที่มีต่อพาหะลง ทำให้อัตราการรวมตัวแบบเปล่งแสงที่อุณหภูมิต่ำนั้นจึงมีปริมาณที่สูงขึ้นนั่นเอง

## 6.6 การทดลองเพื่อศึกษาเสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิกอน

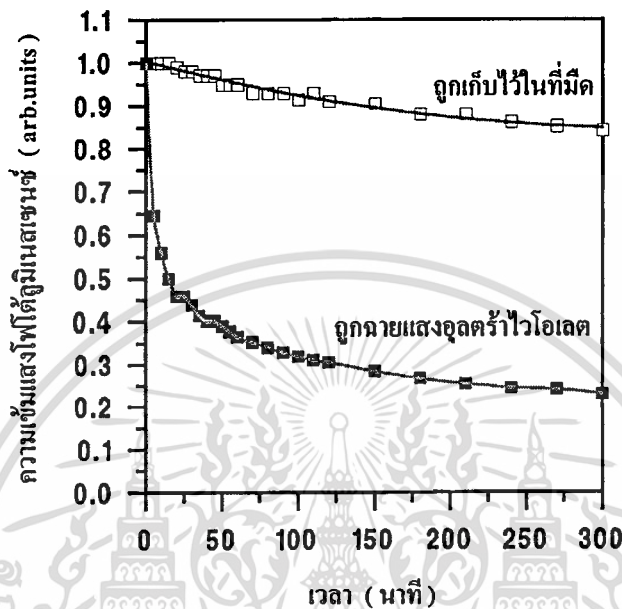
### 6.6.1 การศึกษาเสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนภายใต้แสงอุลตราไวโอเลต

ในการทดลองนี้ได้ใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ระบาย (100) มีสภาพด้านทานเท่ากับ 10 โอห์ม-เซนติเมตร เป็นวัสดุเริ่มต้น เพื่อสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนโดยใช้เงื่อนไขในการ anodization ดังต่อไปนี้คือ ใช้ความหนาแน่นกระแสในการ anodization มีค่าเท่ากับ  $10 \text{ mA/cm}^2$  ในสารละลาย กรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20% และใช้เวลาในการ anodization เท่ากับ 10 นาที หลังจากนั้น จึงนำไปทำการศึกษาถึงผลของการฉายแสงอุลตราไวโอเลตที่มีต่อเสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนที่อยู่ในอากาศ โดยกราฟในรูปที่ 6.25 จะแสดงสเปกตรัมแสงที่ได้จากโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนที่อยู่ในอากาศ ณ.เวลาในการฉายแสงอุลตราไวโอเลตต่างๆ



รูปที่ 6.25 แสดงสเปกตรัมแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนที่เวลาในการฉายแสงอุลตราไวโอเลตต่างๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอุลตราไวโอเลตนั้น ได้แสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.26

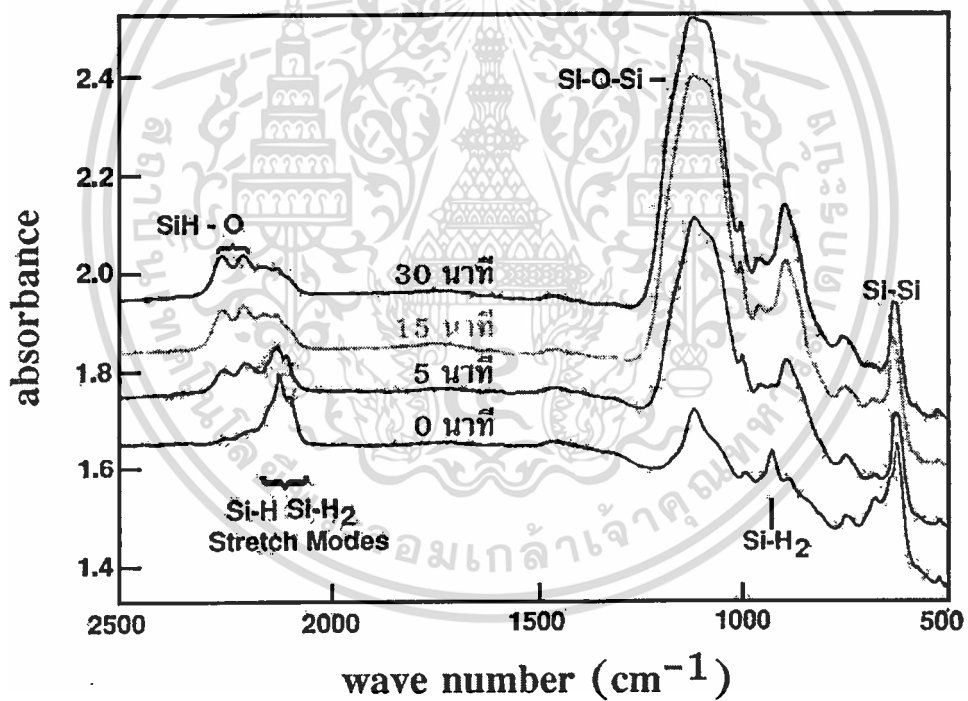


รูปที่ 6.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอุลตราไวโอเลต

จากผลการทดลองข้างต้น แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ เมื่อเวลาในการฉายแสงอุลตราไวโอเลตผ่านไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกราฟรูปที่ 6.26 จะแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างของการลดลงของความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตร ระหว่างพอร์สซิลิกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตอยู่ตลอดเวลา กับพอร์สซิลิกอนที่ถูกเก็บไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดในอากาศ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าในอากาศนั้นเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 ชั่วโมง พอร์สซิลิกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตอยู่ตลอดเวลาจะมีปริมาณความเข้มของแสงลดลงอย่างรวดเร็ว โดยจะมีปริมาณความเข้มแสงเหลืออยู่เพียงประมาณ 25% จากปริมาณความเข้มแสงเริ่มต้น ส่วนพอร์สซิลิกอนที่ถูกเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลา จะมีปริมาณความเข้มของแสงลดลงเหลืออยู่ประมาณ 85% เท่านั้น จะเห็นได้ว่าพอร์สซิลิกอนที่ไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลาในอากาศ จะมีการลดลงของความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ในปริมาณที่น้อยกว่าพอร์สซิลิกอนที่ถูกทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองข้างต้นทำให้สามารถยืนยันได้ว่า การฉายแสงอุลตราไวโอเลตให้แก่พอร์ซซิลิกอนเป็นเวลานานๆจะมีผลต่อความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซิลิกอน โดยการลดลงของความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์นี้ น่าจะมีสาเหตุที่สำคัญมาจากการสูญเสียไฮโดรเจนอะตอมที่ปกคลุมอยู่ที่ผิวของนาโนพอร์ซซิลิกอน ซึ่งการจับพันธะกันของไฮโดรเจนและซิลิกอนนั้นมีได้หลายรูปแบบด้วยกัน [28] เช่น  $\text{SiH}$  ,  $\text{SiH}_2$  ,  $(\text{SiH}_2)_n$  และเพื่อเป็นการสนับสนุนข้อสันนิษฐานนี้ จึงได้ทำการทดลองเพื่อตรวจสอบชนิดและปริมาณของพันธะที่บริเวณผิวของนาโนพอร์ซซิลิกอน ด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องวัดฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของ Perkin Elmer ซึ่งผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของชั้นพอร์ซซิลิกอนที่ถูกทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตเป็นเวลาต่างๆ ในสภาพแวดล้อมของอากาศ ได้ถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.27



รูปที่ 6.27 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของชั้นพอร์ซซิลิกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตเป็นเวลาต่างๆ ในสภาพแวดล้อมของอากาศ

โดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของพอร์ซซิลิกอนที่ตำแหน่งเลขคลื่น (wave number) ต่างจากกราฟในรูปที่ 6.27 ข้างต้นนี้ จะบอกถึงชนิดและลักษณะของพันธะที่อยู่บริเวณผิวของนาโนพอร์ซซิลิกอนได้ ดังแสดงในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 แสดงชนิดและลักษณะของพันธะที่ตำแหน่งเลขคลื่นต่างๆของพอร์สซิลิกอน [27]

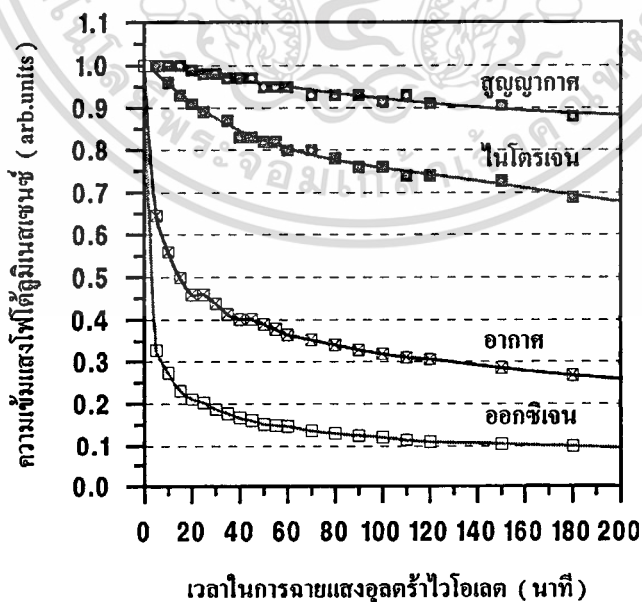
เลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	โหมด
617	Si - Si stretching
907	Si - H <sub>2</sub> bending
1105	Si - O - Si asymmetric stretching
2089	Si - H stretching
2135	Si - H <sub>2</sub> stretching
2202 - 2253	Si - H - O stretching

พิจารณาจากกราฟในรูปที่ 6.27 และตารางที่ 6.3 จะสามารถสังเกตเห็นการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่  $907 \text{ cm}^{-1}$  และ  $2089 - 2135 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งการดูดกลืนทั้งสองตำแหน่งในที่นี้จะเกิดจากการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของอะตอมซิลิกอน Si-H ที่มีการสั่นแบบ การงอตัว (Bending) และแบบการยืดตัว (Stretching) ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการฉายแสงอุลตราไวโอเลตให้แก่พอร์สซิลิกอนเป็นเวลานานๆ จะมีผลทำให้จำนวนพันธะระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่อยู่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอนมีปริมาณที่ลดลง โดยจะสังเกตได้จากการลดลงของสเปกตรัมการดูดกลืนของอะตอมซิลิกอน Si-H ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $907 \text{ cm}^{-1}$  และ  $2089 - 2135 \text{ cm}^{-1}$  นั้นเอง ทั้งนี้เนื่องจากแสงอุลตราไวโอเลตที่ทำการฉายให้แก่พอร์สซิลิกอนเป็นเวลานานๆ ได้ไปทำลายพันธะระหว่างซิลิกอน กับไฮโดรเจนอะตอม (Si-H) ที่จับตัวกันอยู่ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอน เกิดพันธะแขวนขาด (dangling bonds) ของซิลิกอนขึ้น พันธะแขวนขาดของซิลิกอนเหล่านี้เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมของอากาศปกติจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศ ทำให้ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอนเกิดพันธะระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจน (Si-O-Si) ขึ้นมาแทนพันธะระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอม ดังจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่ง  $1105 \text{ cm}^{-1}$  และการปรากฏสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดขึ้นใหม่ที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่  $2202 - 2253 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นของพันธะ Si-H-O เมื่อทำการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตให้แก่

พอร์สซิติคอนเป็นเวลานานๆ พันธะแขนขาดและพันธะระหว่างซิติคอนกับออกซิเจนที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ จะเป็นจุดที่ทำให้การรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของนาโนพอร์สซิติคอน มีลักษณะเป็นการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง (nonradiative recombination) ขึ้นได้ ซึ่งเป็นสาเหตุของการที่ปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิติคอนลดลง จากผลการทดลองนี้เองได้สนับสนุนสาเหตุ และที่มาของการเปล่งแสงแบบโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิติคอนได้ว่า เกิดขึ้นเนื่องจากการรวมตัวแบบเปล่งแสง (radiation recombination) ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิติคอน นั่นเอง

### 6.6.2 การศึกษาเสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิติคอนที่อยู่ในสภาพบรรยากาศของก๊าซชนิดต่างๆ

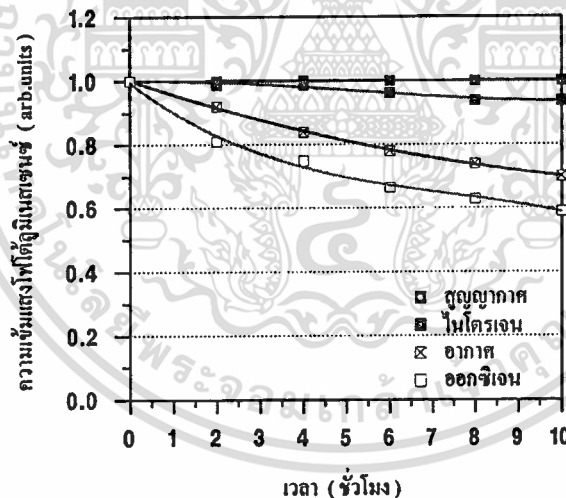
ในการทดลองนี้ ได้ทำการศึกษาถึงผลของก๊าซชนิดต่างๆ ที่มีต่อเสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิติคอน ณ. ที่อุณหภูมิห้อง ทั้งที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตอยู่ตลอดเวลา และที่ถูกเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลา โดยพอร์สซิติคอนที่นำมาศึกษานี้จะถูกบรรจุอยู่ในภาชนะระบบปิดซึ่งภายในจะบรรจุเต็มไปด้วยบรรยากาศของก๊าซออกซิเจน ก๊าซไนโตรเจน อากาศ และสุญญากาศ เพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยกราฟในรูปที่ 6.28 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอุลตราไวโอเลตให้แก่พอร์สซิติคอน ในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ



รูปที่ 6.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอุลตราไวโอเลตให้แก่พอร์สซิติคอน ในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในกรณีของพอร์สซิติคอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซออกซิเจน พบว่าจะมีปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ลดลงเหลืออยู่เพียงประมาณ 10% จากปริมาณความเข้มแสงเริ่มต้น เมื่อเวลาฉายแสงอุตราไวโอเลตผ่านไปประมาณ 3 ชั่วโมง ซึ่งจะแตกต่างกันกับในกรณีของพอร์สซิติคอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมอื่นๆ อันได้แก่ อากาศ ไนโตรเจน และในสุญญากาศ จะมีปริมาณความเข้มของแสงลดลงเหลืออยู่ประมาณ 30% , 70% และ 90% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากในสภาพแวดล้อมของก๊าซออกซิเจนหรือในอากาศนั้น ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิติคอนสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างซิติคอนกับออกซิเจนขึ้นได้ ทำให้การรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของนาโนพอร์สซิติคอนมีลักษณะเป็นการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสงขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการที่ปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิติคอนลดลงอย่างรวดเร็ว ในสภาพแวดล้อมที่มีก๊าซออกซิเจนอยู่ด้วยนั่นเอง ในส่วนกรณีของพอร์สซิติคอนที่ถูกเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายแสง อุตราไวโอเลตตลอดเวลา และอยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้ทำการแสดงความสัมพันธ์เอาไว้ในรูปที่ 6.29



รูปที่ 6.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์กับเวลาในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ

จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 3 ชั่วโมง ปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์จะลดลงเหลืออยู่ประมาณ 80% และ 90% สำหรับพอร์สซิติคอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซออกซิเจน และในอากาศ ตามลำดับ ส่วนพอร์สซิติคอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซไนโตรเจนจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ในปริมาณที่น้อยมากๆ และพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์เลย เมื่อพอร์สซิติคอนอยู่ในสภาพแวดล้อมของสุญญากาศ

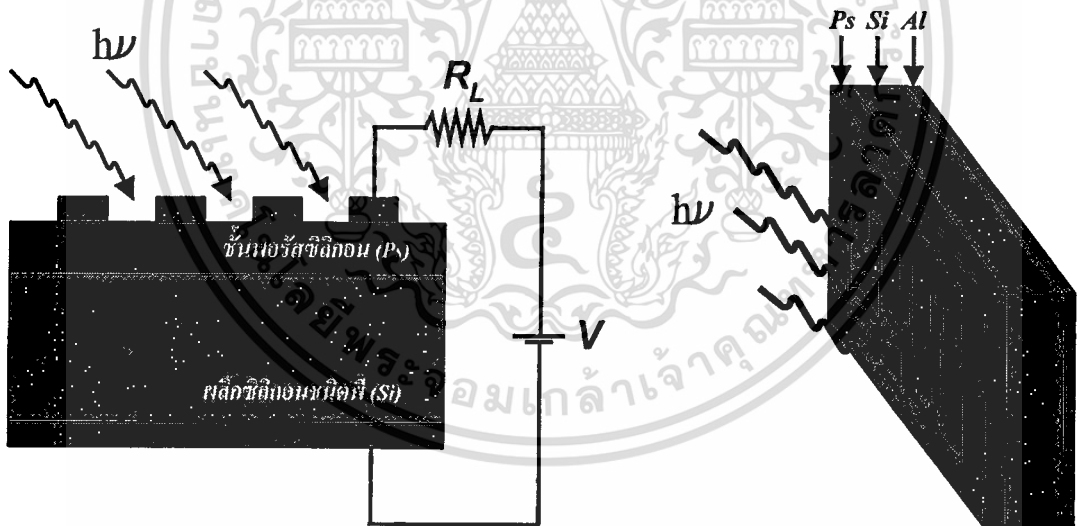
## บทที่ 7

# แนวทางการประยุกต์ใช้พอร์สซิลิกอนเพื่อสร้างเป็น อุปกรณ์ตรวจจับแสง

จากผลการศึกษาทางด้านโครงสร้าง และคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟลโดมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอน แสดงให้เห็นว่าชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นสามารถเปล่งแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ออกมา โดยมีความยาวคลื่นที่ขุดสเปกตรัมอยู่ในช่วงตั้งแต่ 545 นาโนเมตร ถึง 625 นาโนเมตร หรือที่พลังงานโฟตอนตั้งแต่ 1.98 eV ไปถึง 2.27 eV ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการ anodization ซึ่งเป็นกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีที่สามารถลดขนาดโครงสร้างของพอร์สซิลิกอนลงสู่ในระดับนาโนเมตรได้ นอกจากนี้แล้วยังเป็นกระบวนการที่สามารถเข้ากันได้กับกระบวนการสร้างของวงจรรวม (IC) มาตรฐาน จากเหตุผลนี้เองจึงทำให้เกิดแนวทางและความเป็นไปได้ที่สามารถจะนำเอาพอร์สซิลิกอนมาใช้เป็นวัสดุทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง ทั้งนี้ก็นำไปประยุกต์ใช้งานสร้างเป็นอุปกรณ์ทางแสงต่างๆ ที่สามารถรวมอยู่กันกับอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่น ๆ บนฐานรองซิลิกอนเดียวกันได้

โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางในการนำเอาพอร์สซิลิกอนมาประยุกต์ใช้งานสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสง (Photodetector) ที่เรียกว่าอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟลโดมิเนเตอร์ ซึ่งเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์แสงชนิดหนึ่ง ที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ จากการศึกษาในการทดลองบทที่ 6 พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำเอาพอร์สซิลิกอนมาใช้งานเป็นตัวตรวจจับแสงในย่านที่สามารถมองเห็นได้ (visible light) ทั้งนี้เป็นผลจากการที่ชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นมีขนาดของช่องว่างพลังงานที่กว้างมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อผลึกซิลิกอนปกติ จนมีค่าพลังงานเข้าสู่ย่านความยาวคลื่นแสงที่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งเป็นผลจากการทดลองได้ถูกนำเสนอมาแล้วนั่นเอง ส่งผลทำให้อุปกรณ์โฟลโดมิเนเตอร์ที่สร้างขึ้นจากพอร์สซิลิกอน มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากอุปกรณ์ซิลิกอนโฟลโดมิเนเตอร์โดยทั่วไป ซึ่งมีช่องว่างพลังงานเพียง 1.14 eV และมีการตอบสนองต่อแสงดีในย่านอินฟราเรด

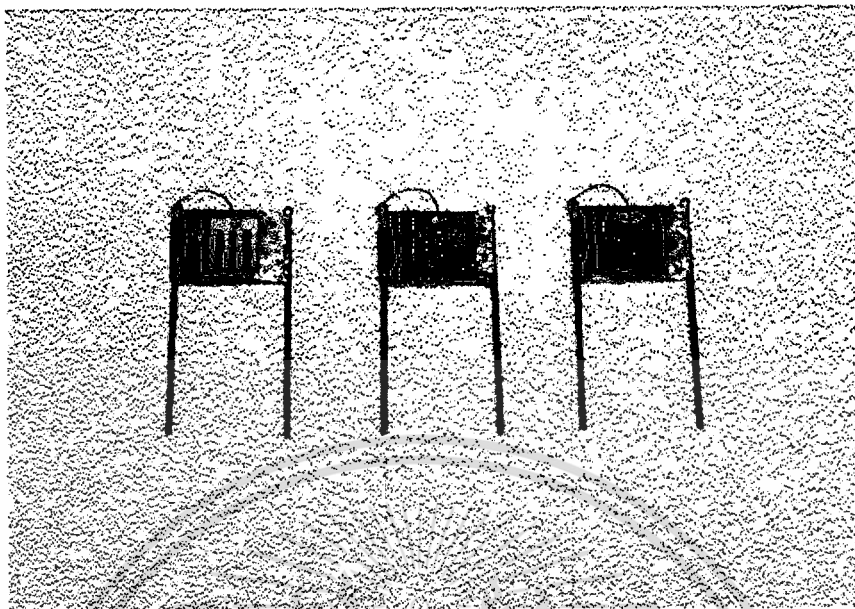
ในส่วนของการสร้างอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโวลต์เทคเตอร์นั้น ชั้นพอร์สซิลิกอนเริ่มต้นจะถูกสร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ที่มีค่าสภาพต้านทานเท่ากับ 10 โอห์ม-เซนติเมตร โดยใช้ความหนาแน่นกระแสในระหว่างการ anodization มีค่าเท่ากับ  $10 \text{ mA/cm}^2$  ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 47 % เป็นเวลานานเท่ากับ 10 นาที ซึ่งภายหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการ anodization ชั้นพอร์สซิลิกอนที่ได้จะถูกนำไปจุ่มลงในน้ำปราศจากประจุไฟฟ้า (DI water) เพื่อชำระล้างสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ยังตกค้างอยู่บริเวณผิวหน้า และนำไปเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน เมื่อกระบวนการสร้างมาถึงขั้นตอนนี้แล้วชั้นพอร์สซิลิกอน จะต้องไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี หรือกระบวนการทางความร้อนใดๆอีก โดยชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้นจะถูกนำไปจัดเก็บเอาไว้ในภาชนะสุญญากาศของเครื่องระเหยสารด้วยความร้อนทันที ทั้งนี้ก็เพื่อเตรียมเข้าสู่กระบวนการสร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมบนชั้นพอร์สซิลิกอน ซึ่งอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโวลต์เทคเตอร์ที่สร้างขึ้นจะมีขนาดเท่ากับ  $7 \times 7 \text{ mm}^2$  ดังแสดงในรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 แสดงแบบจำลองโครงสร้างอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโวลต์เทคเตอร์

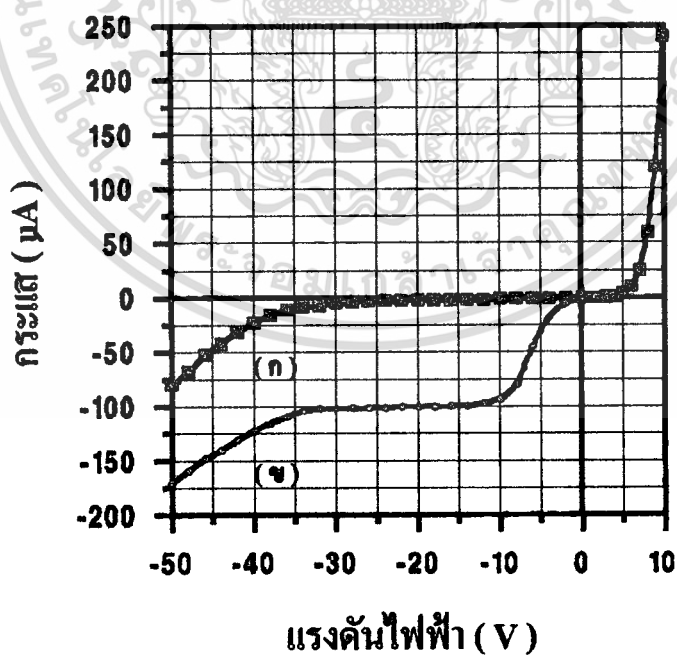
ส่วนภาพถ่ายของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโวลต์เทคเตอร์ที่สร้างขึ้นได้ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 7.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.2 แสดงภาพถ่ายของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโอดีทีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นได้

ต่อจากนั้นจึงนำเอาอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโอดีทีเทคเตอร์ที่สร้างไปทำการวัดคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้า ซึ่งผลที่ได้จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 7.3

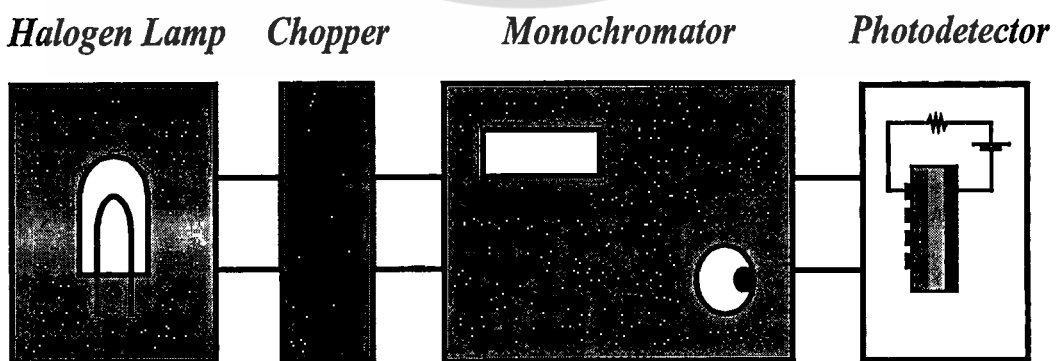


รูปที่ 7.3 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโอดีทีเทคเตอร์ โดย (ก) อุปกรณ์ถูกจัดเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายแสง

(ข) อุปกรณ์ได้รับการฉายแสง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส (ข) อุปกรณ์ได้รับการฉายแสง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส วิชาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโพลีไดดีเทคเตอร์ มีพฤติกรรมแบบ rectifying ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดกำแพงศักย์แบบ Schottky ขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมกับชั้นพอร์สซิลิกอนนั่นเอง โดยการไบอัสแบบไปหน้า อุปกรณ์จะเริ่มมีกระแสไหลที่แรงดันไฟฟ้าประมาณ 5 โวลต์ ซึ่งเป็นผลจากการที่ผิวสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมกับชั้นพอร์สซิลิกอนมีค่าความต้านทานสูงนั่นเอง ส่วนการไบอัสแบบย้อนกลับพบว่าอุปกรณ์จะมีกระแสรั่วย้อนกลับมีค่าประมาณ  $2 \mu\text{A}$  ( $I_p$ ) และเมื่อทำการฉายแสงไฟจากหลอดฮาโลเจนให้กับอุปกรณ์จะมีผลทำให้กระแสรั่วย้อนกลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้นโดยจะมีค่าอยู่ประมาณ  $100 \mu\text{A}$  ( $I_p$ ) ซึ่งผลต่างของกระแสทั้งสองนี้ ( $I_p = I_p - I_p$ ) ก็คือกระแสโฟโต้ที่เกิดขึ้นจากการฉายแสงให้กับอุปกรณ์นั่นเอง โดยกระแสโฟโต้ ( $I_p$ ) ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอุปกรณ์ นอกจากนี้ยังมีค่าที่เปลี่ยนแปลงได้ตามปริมาณความเข้มแสงและค่าความยาวคลื่นของแสงที่ทำการฉายให้แก่อุปกรณ์

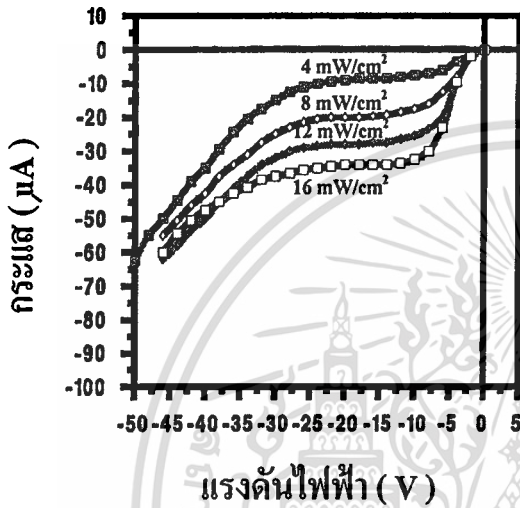
โดยในการทดลองนี้จะทำการศึกษาถึงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโพลีไดดีเทคเตอร์ ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ (ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในระหว่างการ anodization เป็นค่าต่างๆคือ 10 , 20 และ  $40 \text{ mA/cm}^2$  จนได้ชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 65% , 70% และ 80% ตามลำดับ) อุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโพลีไดดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นเหล่านี้จะถูกทำการไบอัสแบบย้อนกลับ และได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มแสงค่าต่างๆ โดยการอาศัยต้นกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนส่องผ่านเครื่อง monochromator เพื่อกำหนดค่าความยาวคลื่นและความเข้มแสง ที่จะออกไปยังอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโพลีไดดีเทคเตอร์ซึ่งการจัดลำดับอุปกรณ์เครื่องมือวัดที่กล่าวมานี้ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 7.4



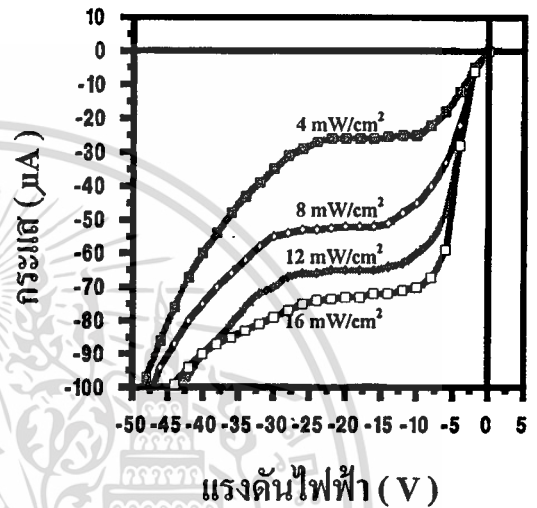
รูปที่ 7.4 แสดงแผนภาพของอุปกรณ์เครื่องมือวัดการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโพลีไดดีเทคเตอร์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

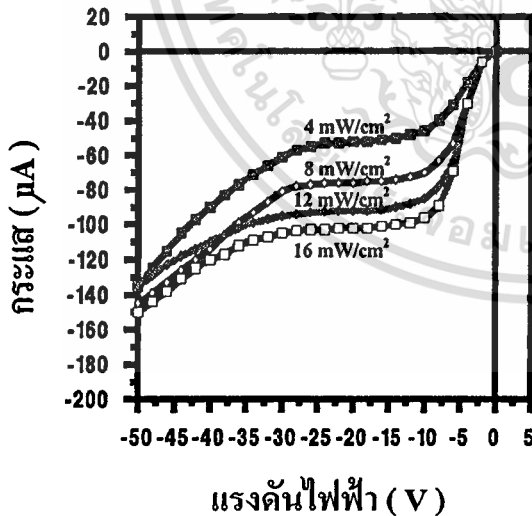
ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ทำการไบอัสแบบย้อนกลับของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโอดีทีเทคเตอร์ ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนเท่ากับ 65% , 70% และ 80% ซึ่งได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มแสงค่าต่างๆ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปแบบที่ 7.5 , 7.6 และ 7.7 ตามลำดับ ดังนี้



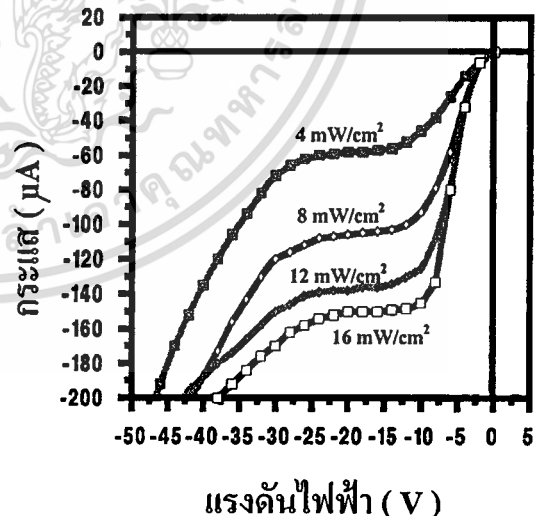
(ก) ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร



(ข) ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร

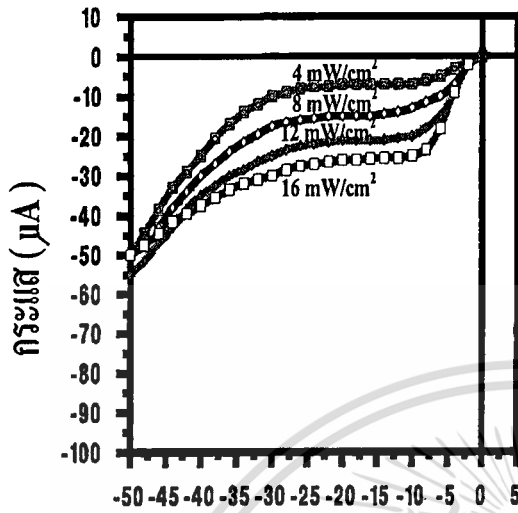


(ค) ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร



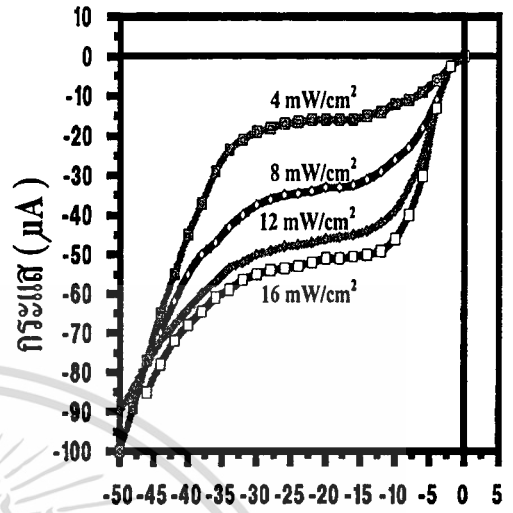
(ง) ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร

รูปที่ 7.5 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ทำการไบอัสแบบย้อนกลับของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 65% ซึ่งได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นเอกสารนี้เป็นเอกสารและความเข้มแสงค่าต่างๆขึ้นงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



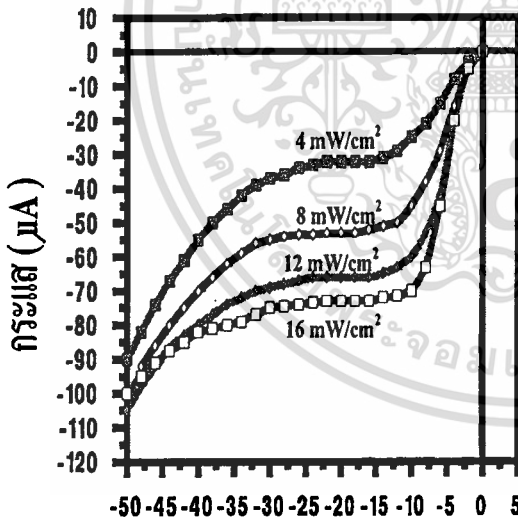
แรงดันไฟฟ้า (V)

(ก) ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร



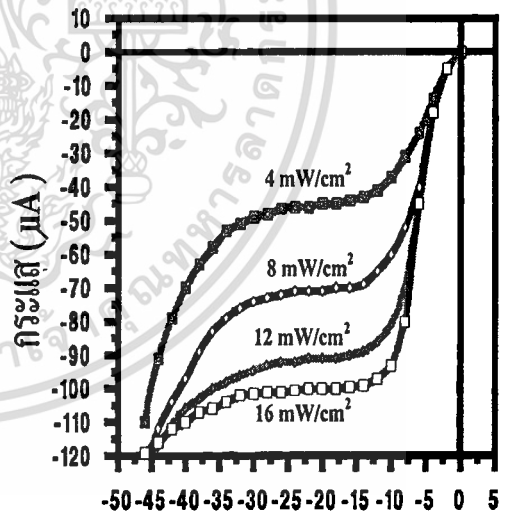
แรงดันไฟฟ้า (V)

(ข) ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร



แรงดันไฟฟ้า (V)

(ค) ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร

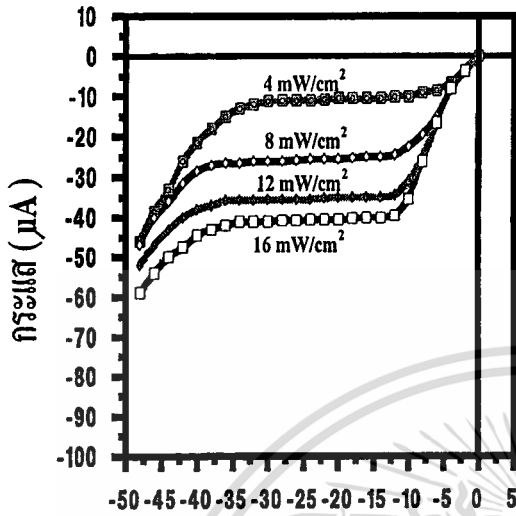


แรงดันไฟฟ้า (V)

(ง) ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร

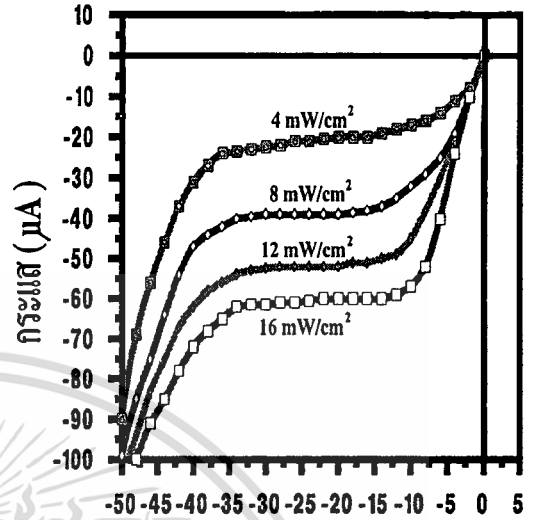
รูปที่ 7.6 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ทำการไบอัสแบบย้อนกลับของอุปกรณ์  
 พอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 70% ซึ่งได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่น  
 และความเข้มแสงค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



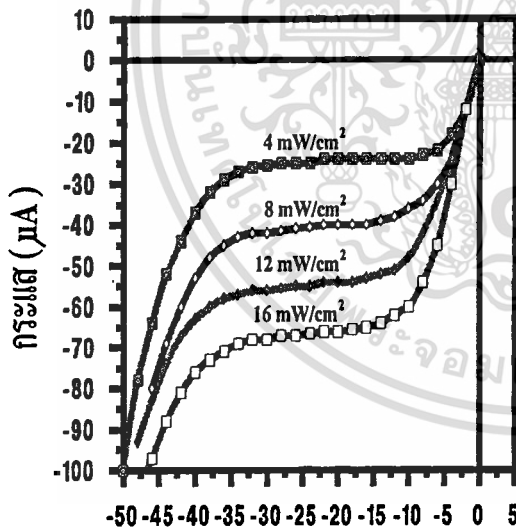
แรงดันไฟฟ้า (V)

(ก) ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร



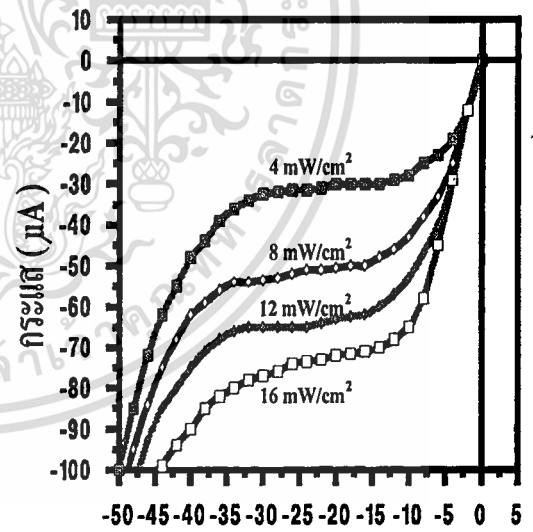
แรงดันไฟฟ้า (V)

(ข) ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร



แรงดันไฟฟ้า (V)

(ค) ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร



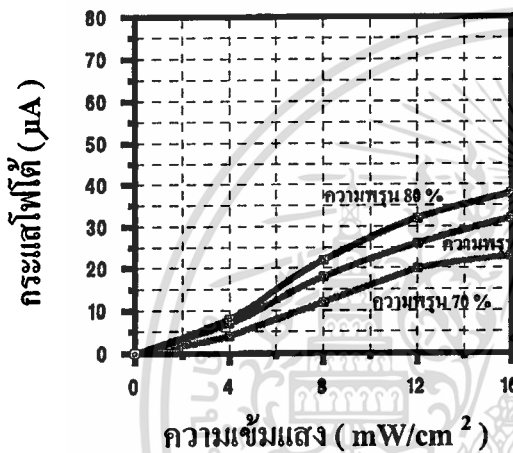
แรงดันไฟฟ้า (V)

(ง) ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร

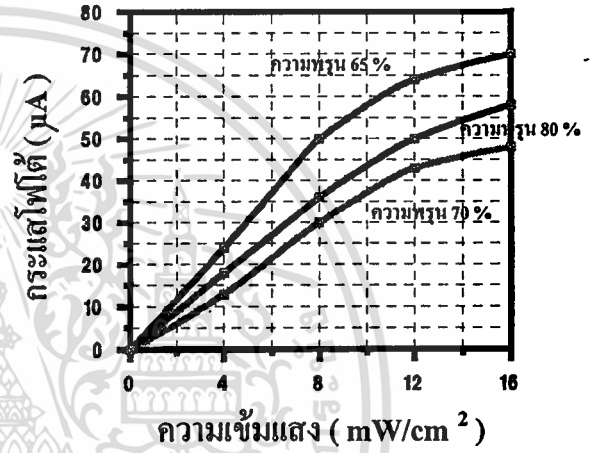
รูปที่ 7.7 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่ทำการไบอัสแบบย้อนกลับของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 80% ซึ่งได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มแสงค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

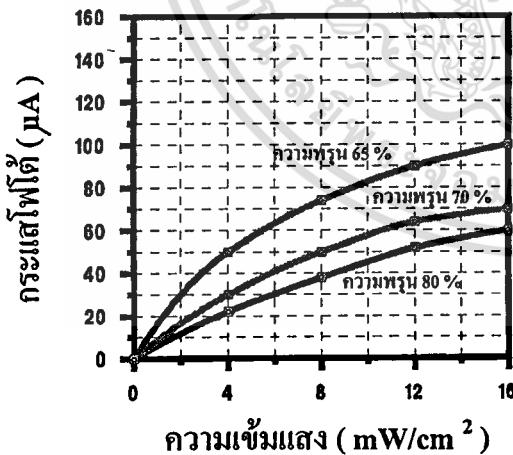
จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 7.5 , 7.6 และ 7.7 ข้างต้น จะเห็นได้ว่าปริมาณกระแสที่เกิดขึ้นมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปริมาณความเข้มแสง และค่าความยาวคลื่นของแสงที่ฉายให้แก่อุปกรณ์ ซึ่งจากข้อมูลที่ได้สามารถนำมาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต้กับค่าความเข้มแสงของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอน โฟโอดีทีเทคโนโลยีที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุน 65% , 70% และ 80% ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ ในขณะที่ทำการไบอัสแบบย้อนกลับที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ -15 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 7.8



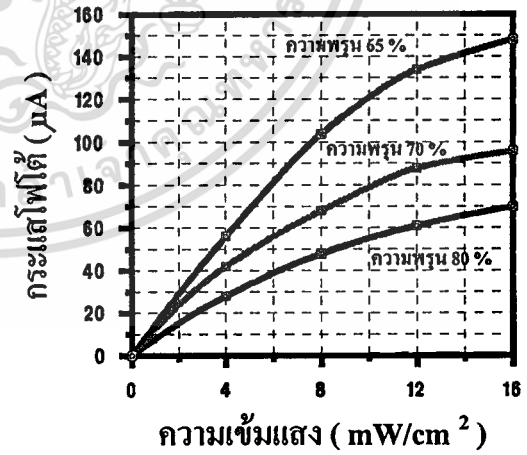
(ก) ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร



(ข) ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร



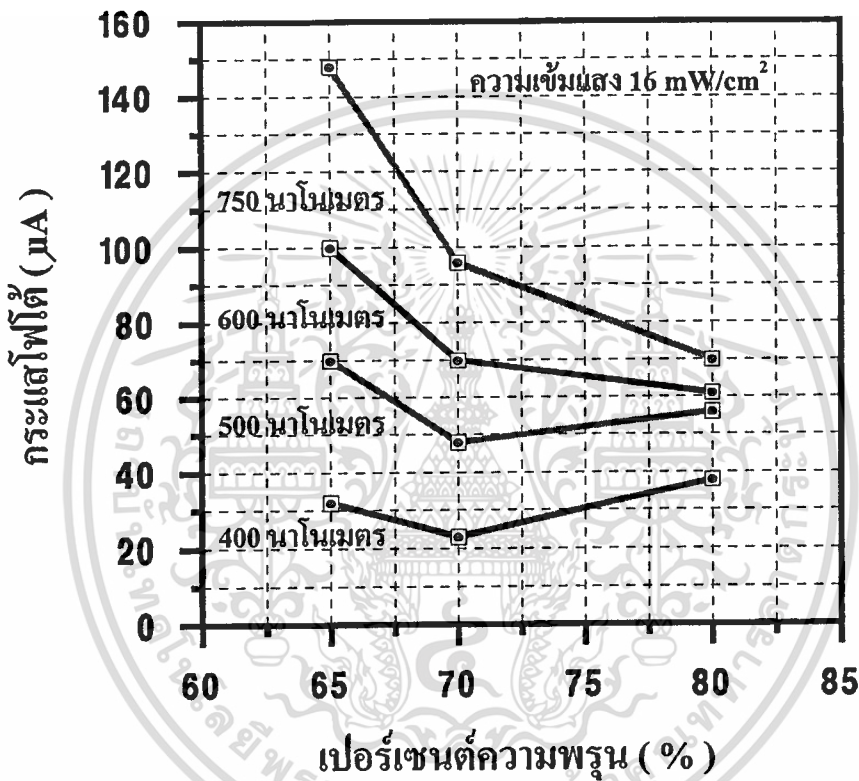
(ค) ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร



(ง) ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร

รูปที่ 7.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต้กับค่าความเข้มแสงในขณะที่ทำการไบอัสแบบย้อนกลับที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ -15 โวลต์ ของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอน โฟโอดีทีเทคโนโลยีที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 65% , 70% และ 80% ตามลำดับ ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ

จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโอดีทีเทคเตอร์ทุกตัวมีปริมาณกระแสไฟได้เพิ่มสูงขึ้น ตามปริมาณความเข้มแสงที่ฉายให้แก่อุปกรณ์ในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่ากระแสไฟได้ที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณที่แตกต่างกันออกไปตามค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอนที่นำมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์โฟโอดีทีเทคเตอร์ และตามค่าความยาวคลื่นแสงที่ได้ทำการฉายให้แก่อุปกรณ์ โดยมีความสัมพันธ์ดังแสดงเอาไว้ในรูปที่ 7.9



รูปที่ 7.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟได้กับเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ

จากกราฟข้างต้นจะพบว่าอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโอดีทีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างกัน จะให้ปริมาณกระแสไฟได้ที่แตกต่างกันออกไปด้วย โดยจะมีปริมาณกระแสไฟได้เรียงตามลำดับจากมากไปน้อย ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ ดังนี้คือ

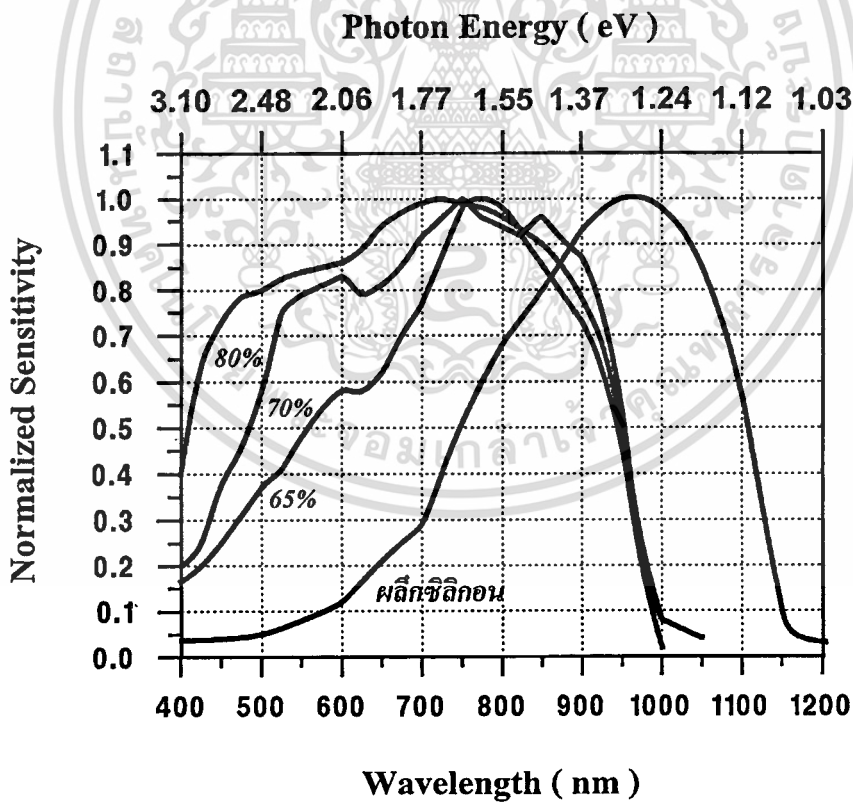
$$\text{ที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร : } I_{p65\%} > I_{p70\%} > I_{p80\%}$$

$$\text{ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร : } I_{p65\%} > I_{p70\%} > I_{p80\%}$$

$$\text{ที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร : } I_{p65\%} > I_{p80\%} > I_{p70\%}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร :  $I_{p80\%} > I_{p65\%} > I_{p70\%}$  ไม่ใช่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าที่ความยาวคลื่นแสง 500 , 600 และ 750 นาโนเมตร อุปกรณ์พอร์สซิลิกอน โฟโอดีคิเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 65% ให้กระแสโฟโอดีคิเทคเตอร์ที่มากกว่าอุปกรณ์พอร์สซิลิกอน โฟโอดีคิเทคเตอร์อื่นๆ ยกเว้นที่ความยาวคลื่นแสง 400 นาโนเมตร อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 80% จะกลับให้กระแสโฟโอดีคิเทคเตอร์ที่มากกว่าอุปกรณ์พอร์สซิลิกอน โฟโอดีคิเทคเตอร์อื่น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ที่แตกต่างกันของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอน โฟโอดีคิเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นนั่นเอง โดยอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงๆจะตอบสนองต่อแสงความยาวคลื่นสั้นได้ดี ทั้งนี้เป็นผลจากการที่ชั้นพอร์สซิลิกอนดังกล่าวมีความกว้างของช่องว่างพลังงานเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงได้ทำการตรวจวัดการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆในช่วงตั้งแต่ 400-1200 นาโนเมตร ที่ความเข้มแสงขาเข้ามีค่าเท่ากัน ของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอน ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ (65% , 70% และ 80% ตามลำดับ) เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ซิลิกอน โฟโอดีคิเทคโอดีคิ PIN ดังแสดงผลเอาไว้ในรูปที่ 7.10



รูปที่ 7.10 แสดงผลการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอน โฟโอดีคิเทคโอดีคิ ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ซิลิกอน โฟโอดีคิเทคโอดีคิ PIN

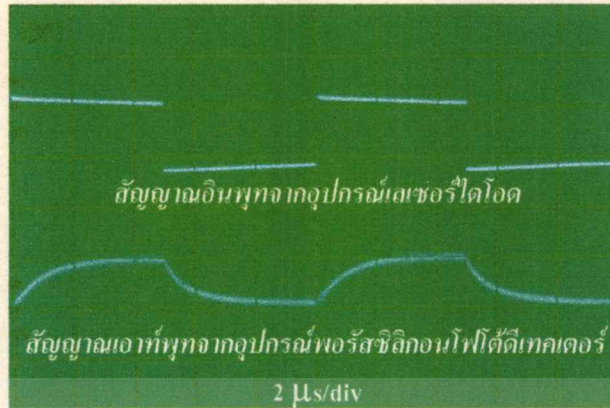
จากผลการทดลองพบว่า ผลการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโตดีเทคเตอร์ ที่ผ่านการ normalized ด้วยความเข้มแสงที่ให้ออกมาจากต้นกำเนิดแสงแล้ว จะมีการตอบสนองในช่วงความยาวคลื่นสั้นได้ดี นอกจากนี้ยังมีย่านในการตอบสนองที่กว้างมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ซิลิกอนโฟโตไดโอด โดยมีรายละเอียดข้อมูลตามตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 แสดงข้อมูลการตอบสนองทางแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโตดีเทคเตอร์ ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ซิลิกอนโฟโตไดโอด

อุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นจากวัสดุชนิดต่างๆ	ช่วงความยาวคลื่นในการตอบสนองทางแสงที่ตำแหน่ง FWHM ( นาโนเมตร )
ผลึกซิลิกอน	750 - 1100
ชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 65 %	550 - 950
ชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 70 %	480 - 950
ชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 80 %	410 - 950

จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 7.10 และข้อมูลในตารางที่ 7.1 จะเห็นได้ว่าย่านในการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโตดีเทคเตอร์จะขยายไปยังด้านความยาวคลื่นสั้น และมีความกว้างครอบคลุมความยาวคลื่นแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ (visible light) เมื่ออุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโตดีเทคเตอร์ได้รับการสร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้น โดยจะเกิดสเปกตรัมของการตอบสนองทางแสงในย่านที่ตามองเห็นได้ในช่วงประมาณ 500 ถึง 625 นาโนเมตร ขึ้นอีกด้วย ทั้งนี้เป็นผลจากการที่โครงสร้างแถบพลังงานของพอร์สซิลิกอนมีค่าความกว้างของช่องว่างพลังงานมากขึ้น เมื่อขนาดโครงสร้างในระดับนาโนเมตรมีค่าลดลง ซึ่งเป็นไปตามปรากฏการณ์ quantum size effect ที่ได้ทำการเสนอมาแล้ว

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาผลการตอบสนองเชิงเวลา ของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโตดีเทคเตอร์ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงความเร็วในการทำงานของอุปกรณ์ โดยอินพุตคือแสงสีแดงจากอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอด (LD) ความถี่ 100 KHz จากผลการศึกษาพบว่าอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโตดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนประมาณ 65 % 70% และ 80 % มีค่าความเร็วในการตอบสนอง (Rise Time :  $T_r$ ) ประมาณ 2  $\mu$ s 1.4  $\mu$ s และ 0.8  $\mu$ s ตามลำดับ ที่  $R_L$  เท่ากับ 1 K $\Omega$  ดังแสดงผลเอาไว้ในรูปที่ 7.11



( ก )



( ข )



( ค )

รูปที่ 7.11 แสดงผลการตอบสนองเชิงเวลาของอุปกรณ์พอร์สซิติคอนโพโตดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นจาก

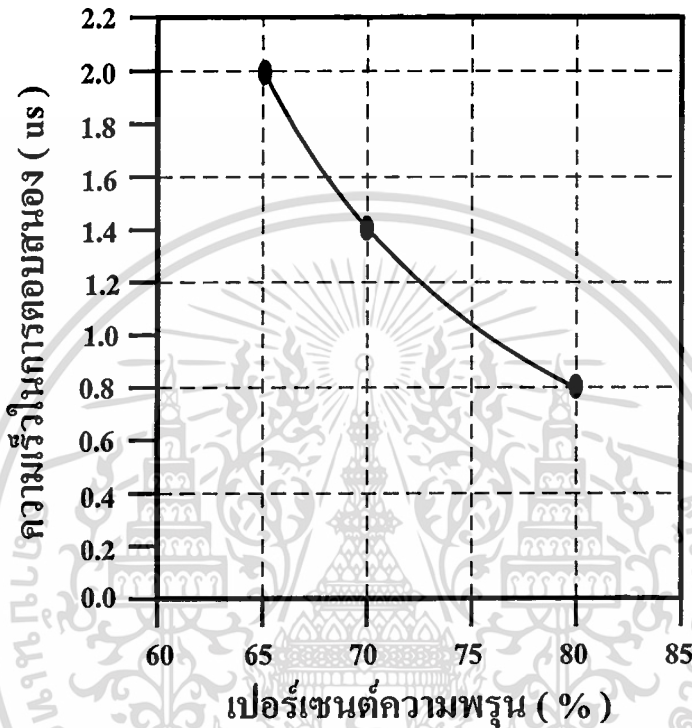
( ก ) ชั้นพอร์สซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพูนประมาณ 65 %

( ข ) ชั้นพอร์สซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพูนประมาณ 70 %

( ค ) ชั้นพอร์สซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพูนประมาณ 80 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่...ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการตอบสนอง (T) ของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโอดีดีเทคเตอร์ กับเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอนที่นำมาใช้สร้างอุปกรณ์นั้น จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 7.12



รูปที่ 7.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการตอบสนองของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโอดีดีเทคเตอร์กับเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน

จากผลการทดลองนี้ทำให้ทราบว่าอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโอดีดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูง จะมีความเร็วในการทำงานที่สูงกว่าอุปกรณ์ที่ได้รับการสร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่ำ ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพอร์สซิลิกอนที่มีค่าความต้านทานสูง โดยค่าความต้านทานนี้จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นอีกเมื่อชั้นพอร์สซิลิกอนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้น ส่งผลทำให้เมื่ออุปกรณ์ทำงานจะมีสนามไฟฟ้าคกร้อมบริเวณชั้นพอร์สซิลิกอนในปริมาณที่สูงขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อเกิดพาหะนำกระแสขึ้นภายในชั้นพอร์สซิลิกอนเนื่องจากผลของการฉายแสง พาหะเหล่านั้นจะถูกสนามไฟฟ้าภายในปิดอกมาสู่ขั้วไฟฟ้าภายนอกอย่างรวดเร็วกว่าเดิมมากขึ้นด้วย ด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้อุปกรณ์ตรวจจับแสงที่ได้รับการสร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงๆนั้น จึงมีความเร็วในการตอบสนองต่อ

แสงที่สูงขึ้นตามไปด้วย สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 8

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 8.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการวิจัยพื้นฐานที่เกี่ยวกับลักษณะ โครงสร้างและคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอน เพื่อการประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ แสง โดยพอร์สซิลิกอนนั้นเป็นชั้นวัสดุที่สามารถสร้างขึ้นได้จากกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า anodization ของแผ่นผลึกซิลิกอน ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดยเนื้อหาการทดลองสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ

1. ส่วนที่เป็นการทดลองและผลการทดลองที่เกี่ยวกับลักษณะ โครงสร้างของพอร์สซิลิกอน ซึ่งได้เสนอไว้ในหัวข้อการทดลองที่ 6.1 6.2 และ 6.3
2. ส่วนที่เป็นการทดลองและผลการทดลองที่เกี่ยวกับคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอน ซึ่งได้เสนอไว้ในหัวข้อการทดลองที่ 6.4 6.5 และ 6.6

นอกจากนี้แล้วจากการศึกษาพบว่าเนื้อหาทั้งสองส่วนข้างต้น ยังมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวของกันอยู่อีกด้วย โดยรายละเอียดทั้งหมดที่ได้กล่าวมานี้สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้คือ จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 6.1 6.2 6.3 และ 6.4 แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขในการ anodization ซึ่งก็คือเงื่อนไขในการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนนั่นเอง อันได้แก่ ชนิดและค่าสภาพต้านทานของผลึกซิลิกอน ความหนาแน่นกระแส เปรอร์เซนต์ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก และเวลาที่ใช้ในการ anodization จะมีผลต่อลักษณะ โครงสร้างและคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิกอน โดย

##### 1. เกี่ยวกับโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน

จากผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการ anodization ต่างๆอย่างใดอย่างหนึ่ง คือ

- การเพิ่มค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี (0.1 - 30 โอห์ม-เซนติเมตร)
- การลดค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น (30 - 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร)
- การเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส (10 - 90 mA/cm<sup>2</sup>)
- การลดเปอร์เซนต์ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (47 % - 10 %)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานที่การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีผลทำให้ชั้นพอร์ซซิติคอนที่สร้างขึ้นมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงชันกว่าเดิมได้ ซึ่งการที่ชั้นพอร์ซซิติคอนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงชันนั้น สามารถสรุปได้ว่าเป็นผลมาจากการที่โครงสร้างของพอร์ซซิติคอนมีขนาดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีตามเงื่อนไขในการ anodization แบบต่างๆที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั่นเอง โดยเราสามารถสังเกตการลดลงของขนาดโครงสร้างพอร์ซซิติคอนอย่างหยาบๆได้จากภาพถ่ายของเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 - 15,000 เท่า สำหรับพอร์ซซิติคอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิติคอนชนิดเอ็น และที่กำลังขยาย 50,000 เท่า สำหรับพอร์ซซิติคอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิติคอนชนิดพี นอกจากนี้แล้วยังได้มีการนำเอาเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (FT-Raman) มาใช้วิเคราะห์หาขนาดของโครงสร้างพอร์ซซิติคอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ โดยจะเปรียบเทียบกับสเปกตรัมรามานของผลึกซิติคอนที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยตรงให้มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรค่าต่างๆ ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลมาตรฐานในงานวิจัยนี้ จากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่า พอร์ซซิติคอนที่ถูกสร้างให้มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงชัน จะมีขนาดของโครงสร้างในระดับนาโนเมตรลดลงได้ โดย

- พอร์ซซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 64 % จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 12 nm
- พอร์ซซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 71 % จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 7 nm
- พอร์ซซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 82 % จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 5 nm
- พอร์ซซิติคอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุน 85 % จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 3.5 nm

## 2. เกี่ยวกับคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซิติคอน

จากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการ anodization ต่างๆอย่างใดอย่างหนึ่ง คือ

- การเพิ่มค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิติคอนชนิดพี (0.1 - 30 โอห์ม-เซนติเมตร)
- การลดค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิติคอนชนิดเอ็น (30 - 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร)
- การเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส (10 - 90 mA/cm<sup>2</sup>)
- การลดเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (47 % - 10 %)
- การเพิ่มเวลาในการ anodization (5 - 30 นาที)

จะมีผลทำให้แสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ที่ให้ออกมาจากพอร์ซซิติคอนมีค่าความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงลดลง หรืออีกความหมายหนึ่งก็คือมีค่าพลังงานโฟตอนของแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์เพิ่มมากขึ้น โดยสามารถสังเกตได้ จากการเคลื่อนของยอดสเปกตรัมแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ไปทางด้านความยาวคลื่นสั้น นั่นแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างแถบพลังงานของพอร์ซซิติคอนนั้นๆ จะต้องมีค่าความกว้างของช่องว่างพลังงานเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้แล้วผลการทดลองทั้ง 4 หัวข้อ ( 6.1 6.2 6.3 และ 6.4 ) ยังได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันระหว่างขนาดโครงสร้างในระดับนาโนเมตรของพอร์ซซิลิกอน กับคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโวลูมิเนสเซนซ์ โดยสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ดังนี้คือ การกำหนดเงื่อนไขในการ anodization แบบต่างๆข้างต้น ส่งผลทำให้โครงสร้างในระดับนาโนเมตรของพอร์ซซิลิกอนมีขนาดลดลงได้ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์ซซิลิกอน นอกจากนี้ยังมีผลต่อคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโวลูมิเนสเซนซ์ โดยทำให้ความยาวคลื่นแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์มีค่าลดลงนั้นแสดงว่าการลดขนาดโครงสร้างในระดับนาโนเมตรของพอร์ซซิลิกอนลง มีผลทำให้ขนาดช่องว่างพลังงานของพอร์ซซิลิกอนมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่าพลังงานโฟตอนของแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ที่มีค่ามากขึ้นนั่นเอง และจากการทดลองพบว่าชั้นพอร์ซซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนต่ำกว่า 50 % ลงไปนั้น ไม่สามารถแสดงคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ได้ ส่วนชั้นพอร์ซซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ 54 % ไปจนถึง 90 % สามารถแสดงคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ได้ โดยจะมีค่าความยาวคลื่นแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ลดลงจาก 625 นาโนเมตร ไปสู่ 545 นาโนเมตร หรือมีค่าพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้นจาก 1.98 eV ไปถึง 2.27 eV ได้ ซึ่งทั้งหมดที่สรุปมานี้สามารถยืนยันได้ถึงการเกิดปรากฏการณ์ Quantum size effect ได้เป็นอย่างดี

ส่วนการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโวลูมิเนสเซนซ์พบว่าเมื่อทำการลดอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมภายในระบบปิดลง จะมีผลทำให้ปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม และจะมีค่าคงที่ในที่สุดเมื่ออุณหภูมิมีค่าต่ำกว่า 50 K ลงไป

สุดท้ายเป็นการศึกษาถึงเสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์ซซิลิกอน จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 6.6 จะเห็นได้ว่าการฉายแสงอุลตราไวโอเลตให้แก่พอร์ซซิลิกอนเป็นเวลานานๆ มีผลทำให้ความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์มีการเปลี่ยนแปลงลดลงได้ ซึ่งจากผลการศึกษาข้างต่อไปอีกว่าในการเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์นี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างรวดเร็วมาก เมื่อพอร์ซซิลิกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลาอยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซออกซิเจน ส่วนพอร์ซซิลิกอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมของสุญญากาศพบว่ามีเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงน้อยที่สุด และไม่มีการเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงเลยเมื่อพอร์ซซิลิกอนถูกจัดเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลา ในสภาพแวดล้อมของสุญญากาศ ดังสรุปผลการทดลองเอาไว้ในตารางที่ 8.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.1 แสดงข้อมูลปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลา กับพอร์สซิลิกอนที่ถูกจับเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลต ในสภาพแวดล้อมของก๊าซต่างๆ เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง

สภาพแวดล้อม	ปริมาณความเข้มแสงของพอร์สซิลิกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลตตลอดเวลา	ปริมาณความเข้มแสงของพอร์สซิลิกอนที่ถูกเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตราไวโอเลต
ออกซิเจน	10 %	80 %
อากาศ	30 %	90 %
ไนโตรเจน	70 %	99 %
สูญญากาศ	90 %	100 %

โดยการลดลงของปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์นี้ มีสาเหตุที่สำคัญมาจากการสูญเสียไฮโดรเจนอะตอมที่ปกคลุมอยู่ที่ผิวของนาโนพอร์สซิลิกอน ทำให้ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอนเกิดพันธะแขวนขาดของซิลิกอนอะตอม (dangling bonds) และพันธะระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจน (Si-O-Si) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนในอากาศ โดยในงานวิจัยนี้สามารถทำการวิเคราะห์ตรวจสอบชนิดและปริมาณของพันธะต่างๆ ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอนได้จากเครื่องวัดฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (absorbance) พันธะแขวนขาดและพันธะระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจนที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ จะเป็นจุดที่ทำให้การรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอนมีลักษณะเป็นการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง (nonradiative recombination) ขึ้นได้ ซึ่งเป็นสาเหตุของการที่ปริมาณความเข้มแสงโฟโวลูมิเนสเซนซ์ลดลง ผลการทดลองนี้ได้สนับสนุนถึงสาเหตุและที่มาของการเปล่งแสงแบบโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอนได้ว่า น่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากการรวมตัวแบบเปล่งแสง (radiative recombination) ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอนนั่นเอง ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองสถานะของระดับพลังงาน 3 ระดับ (three-level luminescent state model) ที่ถูกเสนอขึ้นมา

จากผลการทดลองทางด้านโครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของพอร์สซิลิกอนที่ได้สรุปมาข้างต้น งานวิจัยนี้ได้นำผลการศึกษาเหล่านี้มาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน เพื่อนำเอาพอร์สซิลิกอนมาประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง ด้วยการสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในงานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการนำเอาพอร์สซิลิกอนมาใช้งานสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสง จากผลการศึกษาพบว่าอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโตดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นสามารถตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นสั้นได้ดี และมีความกว้างในการตอบสนองครอบคลุมความยาวคลื่นแสงในย่านที่ตามองเห็นได้ (visible light) มากขึ้น เมื่ออุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโตดีเทคเตอร์นั้นๆ ได้รับการสร้างขึ้นจากชั้นพอร์สซิลิกอนที่มีเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงขึ้น โดยจะเกิดสเปกตรัมของการตอบสนองทางแสงในย่านที่ตามองเห็นได้ในช่วงประมาณ 500 ถึง 625 นาโนเมตรขึ้น ทั้งนี้เป็นผลจากปรากฏการณ์ quantum size effect และจากผลการทดลองนี้เองทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะนำเอาอุปกรณ์ดังกล่าวไปพัฒนาเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดสีของแสง (color sensor) หรือผลิตเป็นตัวตรวจวัด (detector) สัญญาณแสงภายในชิพวงจรรวมที่มีการสื่อสารด้วยแสงต่อไปภายอนาคตได้

## 8.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนด้วยเทคนิคกราฟิเมตริก และการวัดค่าความยาวคลื่นแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิกอน ที่สร้างขึ้นจากการใช้เงื่อนไขในการ anodization แบบเดียวกัน พบว่าวิธีการทั้งสองในการวัดแต่ละครั้งให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนและค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกันออกไปบ้าง ดังนี้คือ

ตารางที่ 8.2 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนและค่าความยาวคลื่นแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้น โดยใช้เงื่อนไขในการ anodization แบบเดียวกัน

	พอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้น โดยใช้			พอร์สซิลิกอนที่สร้างขึ้น โดยใช้		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี 10 <math>\Omega</math>-cm</li> <li>■ ความหนาแน่นกระแส 10 mA/cm<sup>2</sup></li> <li>■ สารละลายกรด HF 47 %</li> <li>■ เวลาในการ anodization 10 นาที</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>■ แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี 10 <math>\Omega</math>-cm</li> <li>■ ความหนาแน่นกระแส 10 mA/cm<sup>2</sup></li> <li>■ สารละลายกรด HF 20 %</li> <li>■ เวลาในการ anodization 10 นาที</li> </ul>		
เปอร์เซ็นต์ความพรุน (%)	68 %	64 %	65 %	85 %	87 %	86 %
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	600	605	605	560	555	560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ถึงความคลาดเคลื่อนของเปอร์เซ็นต์ความพรุน และค่าความยาวคลื่นแสงโฟโตนิกของชั้นพอร์สซิติคอน ที่สร้างขึ้นโดยใช้เงื่อนไขในการ anodization แบบเดียวกัน โดย

- สำหรับค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนของชั้นพอร์สซิติคอน พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงประมาณ 2-3 % และสำหรับชั้นพอร์สซิติคอนที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่สูงเกินกว่า 81-83 % ขึ้นไป ค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนที่คำนวณมีแนวโน้มว่าจะมีค่าสูงกว่าความเป็นจริงได้ ทั้งนี้เนื่องจากผลของโครงสร้างที่เปราะบางของชั้นพอร์สซิติคอน โดยสามารถสังเกตได้จากการลดลงของความเข้มแสงโฟโตนิกของชั้นพอร์สซิติคอนเมื่อพอร์สซิติคอนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความพรุนสูงกว่า 81-83 % ขึ้นไป

- ส่วนค่าความยาวคลื่นแสงโฟโตนิกของชั้นพอร์สซิติคอน พบว่า จะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ประมาณ  $\pm 5$  นาโนเมตร หรือประมาณ  $\pm 0.018$  eV สำหรับค่าพลังงานโฟตอนของแสงโฟโตนิกที่ให้ออกมา ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองได้ทำการวัดค่าความยาวคลื่นแสงโฟโตนิกที่คลาดเคลื่อนประมาณ 5 นาโนเมตร นั่นเอง

## เอกสารอ้างอิง

- [ 1 ] A. Uhler, *“Electrochemical Etching of Silicon in HF Acid”*, Tech. J. , Vol. 35, pp. 333, 1956.
- [ 2 ] L. Canham , *“A glowing future for silicon”* , NEW SCIENTIST , 10 April 1995.
- [ 3 ] K. Imai , *“A New Dielectric Isolation Method Using Porous Silicon”* , Solid State Electronics , Vol. 24 , pp. 155 - 164 , 1980.
- [ 4 ] K. Imai and H. Unno , *“FIPOS ( Full Isolation by Porous silicon Oxidized Silicon ) Technology and Its Application to LSI's”* , IEEE TRANSACTION ON ELECTRON DEVICES , Vol. ED-31 , NO. 3 , MARCH 1984.
- [ 5 ] D. A. Neamen , SEMICONDUCTOR PHYSICS AND DEVICES , IRWIN, INC , 1992
- [ 6 ] สมเกียรติ สุภเดช , อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ , พิมพ์ครั้งที่ 1 , 2521
- [ 7 ] F. Kozlowski and W. Lang , *“Spatially resolved raman measurement at electroluminescent porous silicon”* , J. Appl. Phys. , Vol. 72 , No. 11 , pp. 5401 - 5408 , 1992.
- [ 8 ] C. Tsai , K.H. Li , J. Sarathy , J.C. Campbell , B.K. Hance and J.M. White , *“Thermal treatment studies of the photoluminescence intensity of porous silicon”* , Appl. Phys. Lett. , Vol. 59 , pp. 2814 - 2816 , 1992.
- [ 9 ] C. Tsai , K.H. Li , D.S. Kinosky , R.Z. Qian , T.C. Hus , J.T. Irby , S.K. Banerjee , A.F. Tasch and J.C. Campbell , *“Correlation between silicon hydride species and the photoluminescence intensity of porous silicon”* , Appl. Phys. Lett. Vol. 60 , pp. 1700 - 1702 , 1992.
- [ 10 ] Y. Kanemitsu , T. Matsumoto , T. Futagi and H. Mimura , *“Hydrogen termination and optical properties of porous silicon : photochemical etching effect”* , Jpn. J. Appl. Phys. , Vol. 32 , Part 1 , No. 1B , pp. 411 - 414 , 1993.
- [ 11 ] H. F. Wolf , SEMICONDUCTORS , WILEY - INTERSCIENCE a division of John & Sons , pp. 50 , 1971.
- [ 12 ] Y. Kanemitsu , *“Light emission from porous silicon and related materials”* , Physics reports , Vol. 263 , No. 1 , pp. 8 , 1995.
- [ 13 ] T.E. Jenkin , SEMICONDUCTOR SCIENCE GROWTH and CHARACTERIZATION TECHNIQUES , pp. 177

[ 14 ] Y. Kang and J. Jorne , *“Porous silicon formation : Morphological Stability Analysis”* , Appl. Phys. Lett. , Vol. 62 , No. 8 , pp. 2224 - 2226 , 1993.

- [ 15 ] W. Lang , P. Steiner , H. Sandmaier , “*Porous silicon: a novel material for microsystems*”, Sensors and Actuators A51, pp. 31-36, 1995
- [ 16 ] V. Lehmann and U. Gosele , “*Porous silicon formation : A Quantum Wire Effect , Appl. Phys. Lett.*” , Vol. 58 , No. 8 , pp. 856 - 858 , 1991.
- [ 17 ] J. Singh , Semiconductor Optoelectronics Physics and Technology , MCGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS , pp. 339.
- [ 18 ] A. Halimaoui , C. Oules and G. Bomchil , “*Electroluminescence in the visible rang during anodic oxidation of porous silicon films*” , Appl. Phys. Lett. , Vol. 59 , No. 3 , pp. 304 - 306 , 1991.
- [ 19 ] Y. Kanemitsu , “*Luminescence properties of nanometer- size Si crystallites : core and surface states*” , Phys. Rev. B , Vol. 49 , No. 23 , pp. 16845 - 16848 , 1994.
- [ 20 ] H. Mimura , T. Futagi , T. Matsumoto , T. Nagamura and Y. Kanemitsu , “*Blue light emission from rapid-thermal-oxidized porous silicon*” , Jpn. J. Appl. , Vol. 33 , Part 1 , No. 1B , pp. 586 - 589 , 1994.
- [ 21 ] H. Takagi , M. Mitome , R. Yano and T. Nakagiri , Solid State Phys , Vol. 27 , 1992 , pp. 875
- [ 22 ] Y. Kanemitsu , T. Ogawa , K. Shiraishi and K. Takeda , Phys. Rev. , B48 , 1993 , pp.4883.
- [ 23 ] T. Kawaguchi and S. Miyazima , Japan J. Appl. Phys. , Vol. 32 , pp. L215 , 1993.
- [ 24 ] R.E. Hummel , A. Morrone , M. Ludwig and S.S. Chang , Appl. Phys. Lett. , Vol. 63 , pp. 2771 , 1993.
- [ 25 ] M.H. Ludwig , E.E. Hummel and M. Stora , Thin Solid Films , Vol. 255 , pp. 103 , 1995.
- [ 26 ] R. Herino , G. Bomchil , K. Barla and C. Bertrand , “*Porosity and pore size distributions of porous silicon*” , J. Electrochem Soc : Solid State Science and Technology , Vol. 14 , No. 8 , pp. 1994 - 2000 , 1987.
- [ 27 ] แม้น อมรสิทธิ์ , อมร เพชรสม , “*หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ*” , พิมพ์ครั้งที่ 1 , 2523.
- [ 28 ] G. Lucovsky and W.B. Pollard , “*Vibrational Properties in The Physics of Hydrogenated Amorphous Silicon II*” , edited by J.D. Joannopoulos ( Springer - Verlay ) , pp. 301 , 1984.
- [ 29 ] S.M. SZE , VLSI Technology, McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, pp. 656, 1998.



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## 1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ชื่อ	สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	q	$1.60 \times 10^{-19}$	C
ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์	k	$1.38 \times 10^{-23}$	J/K
ค่าคงที่ของพลังค์	h	$6.63 \times 10^{-34}$	J-s
ค่าเพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ	$\epsilon_0$	$8.85 \times 10^{-14}$	F/cm
ค่าความเร็วแสง	c	$3 \times 10^8$	m/s

## 2. คุณสมบัติของซิลิกอน [29]

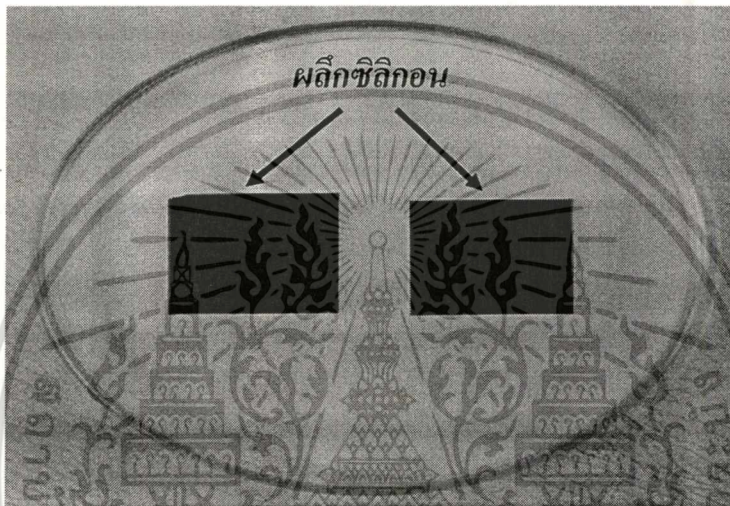
เลขอะตอม	14	
น้ำหนักอะตอม	28.09	
ความหนาแน่นอะตอม	$2.96 \times 10^{22}$	cm <sup>3</sup>
ความหนาแน่น	2.33	g/cm <sup>3</sup>
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	11.9	
พลังงานแถบต้องห้าม	1.14	eV
สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของพลังงานแถบต้องห้าม	$-2.3 \times 10^{-4}$	eV/°C
จุดหลอมเหลว	1412	°C
ดัชนีหักเห	3.42	
การนำความร้อน	1.5	W/cm-°C
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	$2.6 \times 10^{-6}$	(°C) <sup>-1</sup>
ค่าคงที่ของผลึก	5.4307	°A
ความดันต่อหน่วยปริมาตร	$0.98 \times 10^{12}$	cm <sup>2</sup> /dyn
ความร้อนในการละลาย	1000	J/g
ความหนาแน่นพาหะของซิลิกอนบริสุทธิ์	$1.45 \times 10^{10}$	cm <sup>-3</sup>
ความดันไอ	$2.8 \times 10^{-4}$	mm Hg

เอกสารโครงสร้างผลึกที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุ diamond ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

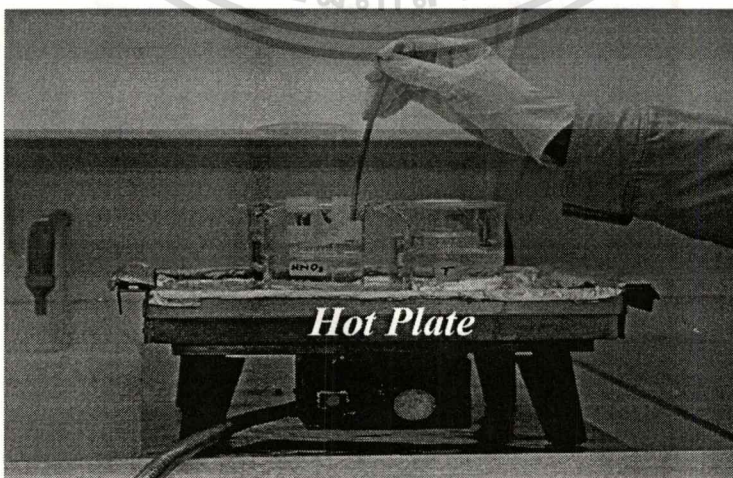
### 1. ลำดับภาพขั้นตอนในการสร้างชั้นพอร์ซเซิลิกอน

#### 1. การเตรียมแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น



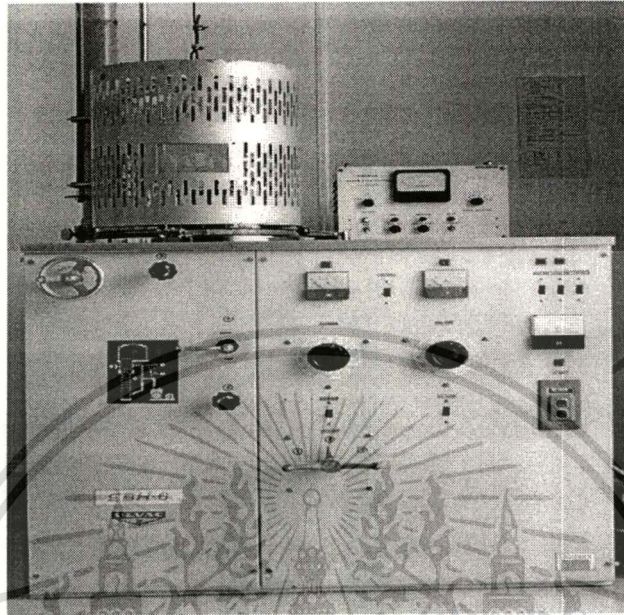
รูปที่ 1ข แสดงแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้นที่มีผิวด้านหน้าขม้นเป็นกระจกเงา

#### 2. การทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น



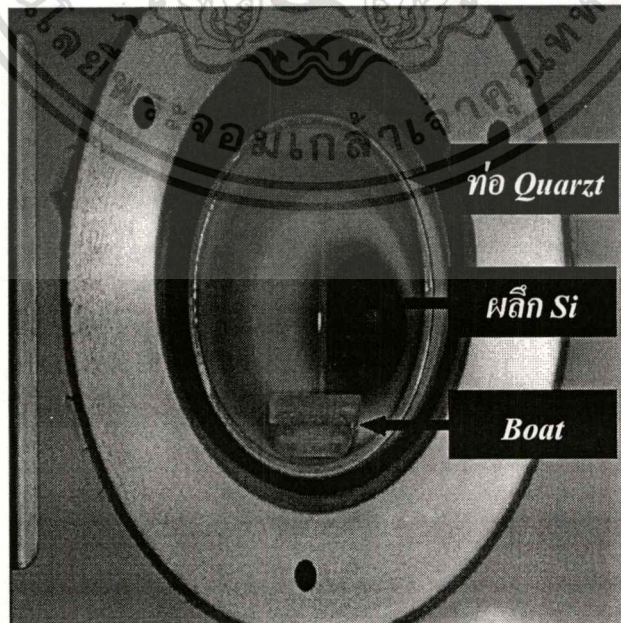
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานวิจัยของศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อการผลิตเซมิคอนดักเตอร์ในประเทศไทย  
รูปที่ 2ข แสดงการทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกซิลิกอน  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ



รูปที่ 3 ข แสดงการเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง vacuum evaporator

### 4. กระบวนการซินเตอร์ริง



รูปที่ 4 ข แสดงการซินเตอร์ริงโลหะอลูมิเนียมด้านหลังแผ่นผลึกซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. การสร้างชั้นพอร์ซซิลิกอน



รูปที่ 5ข แสดงการบรรจุแผ่นผลิตภัณฑ์ซิลิกอนเข้าสู่ชุดกักทางไฟฟ้าเคมี

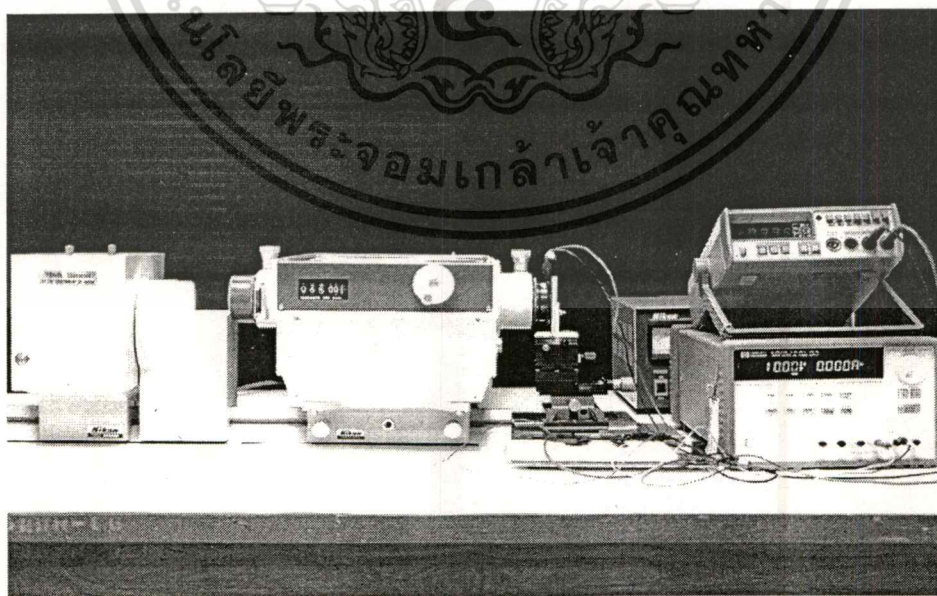


เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 6ข แสดงกระบวนการกักทางไฟฟ้าเคมีเพื่อสร้างชั้นพอร์ซซิลิกอน ระโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ภาพแสดงการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองทางแสง ของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโอดีทีเทคเตอร์



รูปที่ 7ข แสดงการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโอดีทีเทคเตอร์



รูปที่ 8ข แสดงการวัดการตอบสนองทางแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สพอร์สซิลิกอนโฟโอดีทีเทคเตอร์ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์ทางวิชาการ

- เกียรติชัย มากเกษม , นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง , สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล และสมเกียรติ สุภเดช , “การศึกษาคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิกอน” , วิศวกรรมลาดกระบัง , ปีที่ 12 , ฉบับที่ 1 , หน้า 8 - 14 , 2538.
- นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง , ผศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล และรศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช , “เสถียรภาพโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอน” , การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18 , หน้า 678 - 683 , พฤศจิกายน 2538.
- สุรเชษฐ์ วัฒนไพโรจน์ , นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง , ผศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล และรศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช , “ผลของเงื่อนไข anodization ที่มีต่อโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิกอน” , การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19 , หน้า EL 27-32 , 7 - 8 พฤศจิกายน 2539.
- กฤติดา สวาทะสุข , นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง , สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล และสมเกียรติ สุภเดช , “การศึกษาลักษณะโครงสร้างและความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอน” , การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 , หน้า 680 - 683 , 12 - 13 พฤศจิกายน 2541.
- อุบล ศรีจิง , นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง , สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล และสมเกียรติ สุภเดช , “การศึกษาอุปกรณ์พอร์สซิลิกอนโฟโวลูมิเนสเซนซ์” , การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 , หน้า 676 - 679 , 12 - 13 พฤศจิกายน 2541.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายนรินทร์ อติวงศ์แสงทอง
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2512
ภูมิลำเนา	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (สาขาวัสดุศาสตร์)
สถานที่สำเร็จการศึกษา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2534
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	รายละเอียดในภาคผนวก ก.
ประสบการณ์ทำงาน	ปัจจุบันรับราชการตำแหน่ง เจ้าหน้าที่วิจัย 4 ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง กรุงเทพฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้