สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การพัฒนานาโนพอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์แสงในช่วงที่ตามองเห็นเพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดสี

Development of Nanoporous Silicon Visible Light Photodetector For Application to Color Sensor

จัดทำโดย

นายนรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

RCH
QC
611.8
.S5
เลขหมู่ 69965
เลขทะเบียน
วัน,เดือน,ปี 22 ก.พ. 2550

b 11909881
i

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประจำปีงบประมาณ 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์ได้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมด้วยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2549 และขอขอบคุณ รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยนี้ ท้ายสุดขอขอบคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือการใช้เครื่องมือและให้กำลังใจมาโดยตลอด

นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง

1 ก.พ. 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการเสนอผลการวิจัยที่เกี่ยวกับการพัฒนานาโนพอรัสซิลิกอนสำหรับงานทางด้านโฟโต้ดีเทคเตอร์แสงในช่วงที่ตามองเห็นเพื่อประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดสี โดยจะศึกษาลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ ณ ที่อุณหภูมิห้องของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนที่สามารถสร้างขึ้นได้จากปฏิกริยาการกัดทางไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า anodization ของแผ่นผลึกซิลิกอนในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งเมื่อทำการฉายแสงอุลตร้าไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ให้แก่ชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนก็จะเกิดปรากฏการณ์การเปล่งแสงแบบโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ขึ้น ในการทดลองได้ทำการศึกษาถึงโครงสร้างและคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนในส่วนของความยาวคลื่นและความเข้มแสง ที่เงื่อนไขใน anodization ต่างๆ นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ ตลอดจนเสถียรภาพโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนที่อยู่ภายใต้แสงอุลตร้าไวโอเลตและสภาพบรรยากาศของก๊าซชนิดต่างๆด้วย

จากผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขใน anodization อย่างใดอย่างหนึ่ง เช่น การเพิ่มค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี การลดค่าสภาพต้านทานของผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น การเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส การลดปริมาณความเข้มข้นสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก หรือการเพิ่มเวลาใน anodization มีผลทำให้ขนาดของโครงสร้างในระดับนาโนเมตรและความยาวคลื่นแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนเปลี่ยนแปลงลดลงได้ ทั้งนี้เป็นผลจากปรากฏการณ์ quantum size effect ส่วนการศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วงตั้งแต่ 300 เคลวิน ไปจนถึง 20 เคลวิน พบว่าความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อทำการลดอุณหภูมิภายในระบบให้มีค่าต่ำลง ในส่วนของการศึกษาผลของแสงอุลตร้าไวโอเลต และผลของก๊าซชนิดต่างๆ อันได้แก่ ไนโตรเจน , ออกซิเจน , อากาศ และสูญญากาศ พบว่าการฉายแสงอุลตร้าไวโอเลตให้แก่ชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนเป็นเวลานานๆ มีผลทำให้ความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์มีการเปลี่ยนแปลงลดลงได้ และจะลดลงอย่างรวดเร็วมากเมื่อชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนอยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซออกซิเจน จากผลการทดลองนี้สนับสนุนว่าการเปล่งแสงแบบโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของนาโนพอรัสซิลิกอนน่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากการรวมตัวแบบเปล่งแสงที่บริเวณผิวของนาโนพอรัสซิลิกอน สุดท้ายเป็นการนำเอาชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนมาประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง โดยจะถูกนำมาสร้างเป็นโฟโต้ดีเทคเตอร์ที่สามารถตอบสนองต่อแสงในย่านที่ตามองเห็นได้ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ARSTRACT

This research presents the development of nanoporous silicon visible light photodetector for application to color sensor. The study on structure and photoluminescence properties of nanoporous silicon layer performed at a room temperature. The nanoporous silicon layer is formed by electrochemical etching reaction of silicon wafers in hydrofluoric solution which is called anodization. When the nanoporous silicon layer was excited by 365 nm of ultraviolet light , the photoluminescence was observed. The experiment showed study of structure and photoluminescence properties of nanoporous silicon layer 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 the resistivity of p-type silicon increase , the resistivity of n-type silicon decrease , the current density increase , the concentration of hydrofluoric solution decrease or the anodization time increase causes decreases in its nanostructure and photoluminescence wavelength 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 vaccum. 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 nanoporous silicon layer is illumineted in oxygen gas. This experiment supports that the photoluminescence of nanoporous silicon layer occurs from radiative recombination of carriers at surface of nanoporous silicon. Finally , The nanoporous silicon layer was applied to be optoelectronic device such as nanoporous silicon photodetector , which can response to visible light for application to color sensor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อภาษาไทย	II
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญภาพ	IX
สัญลักษณ์	XVIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 การประยุกต์ใช้นาโนพอรัสซิลิกอนในงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมา	3
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 ผลึกซิลิกอน	6
2.1.1 โครงสร้างของผลึกซิลิกอน	6
2.1.2 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอน	9
2.1.3 ชนิดของผลึกซิลิกอน	12
2.2 นาโนพอรัสซิลิกอน	17
2.2.1 โครงสร้างของนาโนพอรัสซิลิกอน	17
2.2.2 ลักษณะแถบพลังงานของนาโนพอรัสซิลิกอน	18
2.3 เซลไฟฟ้าเคมี	21
2.3.1 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลไฟฟ้าเคมี	23
2.3.2 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอนกับ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก	26
2.3.3 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลไฟฟ้าเคมี	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 กลไกในการเกิดนาโนพอรัสซิลิกอน..... 30

2.4.1 ปฏิกริยาเคมีในการกัดที่ผิวของผลึกซิลิกอน..... 30

2.4.2 การเกิดรูพรุนของนาโนพอรัสซิลิกอน..... 32

2.4.3 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของนาโนพอรัสซิลิกอน..... 37

2.5 ความพรุนของนาโนพอรัสซิลิกอน..... 41

บทที่ 3 พฤติกรรมทางแสง

3.1 พฤติกรรมทางแสงของสารกึ่งตัวนำ..... 43

3.1.1 การดูดกลืนแสง..... 44

3.1.2 การเปล่งแสง..... 45

3.2 พฤติกรรมทางแสงของผลึกซิลิกอน..... 49

3.3 พฤติกรรมทางแสงของนาโนพอรัสซิลิกอน..... 51

บทที่ 4 กระบวนการสร้าง

4.1 เทคนิคในการสร้างแบบต่างๆ..... 53

4.1.1 เทคนิควิธีการสร้างแบบ Microwave plasma decomposition ของก๊าซไซเรน (SiH_4)..... 53

4.1.2 เทคนิควิธีการสร้างแบบ Laser breakdown ของก๊าซไซเรน (SiH_4)..... 54

4.1.3 เทคนิควิธีการสร้างแบบ High-frequency spark discharge..... 55

4.2 การสร้างนาโนพอรัสซิลิกอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี..... 56

บทที่ 5 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และการวัด

5.1 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอน... 61

5.1.1 เทคนิคกราวิเมตตริก (Gravimetric method)..... 61

5.1.2 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)..... 62

5.1.3 ฟูเรียร์ทรานฟอร์มรามานสเปกโตรสโทปี (FT-Raman)..... 64

5.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้วัดปรากฏการณ์โฟโต้ลูมิเนสเซนซ์..... 66

5.3 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์พันธะที่ผิวของนาโนพอรัสซิลิกอน..... 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

5.4 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์โฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนที่อุณหภูมิต่ำ..... 70

บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง

6.1 การทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนด้วย SEM..... 72

6.2 การทดลองเพื่อศึกษาค่าความพรุนของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนที่เงื่อนไข anodization ต่างๆ..... 77

6.2.1 การศึกษาผลของชนิดและสภาพต้านทานของผลึกซิลิกอนที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อความพรุนของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอน..... 78

6.2.2 การศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization ที่มีผลต่อความพรุนของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอน..... 80

6.2.3 การศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อความพรุนของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอน..... 81

6.2.4 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization ที่มีต่อความพรุนของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอน..... 82

6.3 การทดลองเพื่อศึกษาขนาดโครงสร้างพอรัสซิลิกอนที่เปอร์เซนต์ความพรุนต่างๆ. 84

6.4 การทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนที่เงื่อนไข anodization ต่างๆ..... 88

6.4.1 การศึกษาผลของชนิดและสภาพต้านทานของผลึกซิลิกอนที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของนาโนพอรัสซิลิกอน... 88

6.4.2 การศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของนาโนพอรัสซิลิกอน..... 91

6.4.3 การศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของนาโนพอรัสซิลิกอน..... 93

6.4.4 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization ที่มีต่อคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของนาโนพอรัสซิลิกอน..... 95

6.5 การทดลองเพื่อศึกษาผลของโครงสร้างของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนที่มีต่อคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์..... 97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

6.6 การทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของนาโนพอรัสซิลิกอน..... 101
6.7 การทดลองเพื่อศึกษาเสถียรภาพโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอน... 103
6.7.1 การศึกษาเสถียรภาพโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของนาโนพอรัสซิลิกอนภายใต้แสงอุลตร้าไวโอเลต..... 103
6.7.2 การศึกษาเสถียรภาพโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของนาโนพอรัสซิลิกอนที่อยู่ในสภาพบรรยากาศของก๊าซชนิดต่างๆ..... 107

บทที่ 7 แนวทางการใช้นาโนพอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์แสงในช่วงที่ตามองเห็นเพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดสี..... 109

บทที่ 8 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง
8.1 สรุปผลการทดลอง..... 122
8.2 วิจารณ์ผลการทดลอง..... 126

เอกสารอ้างอิง..... 128
ภาคผนวก ก 1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์..... 130
2. คุณสมบัติของผลึกซิลิกอน..... 130
ภาคผนวก ข 1. ลำดับภาพขั้นตอนในกระบวนการสร้างชั้นนาโนพอรัสซิลิกอน..... 131
2. ภาพแสดงการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์นาโนพอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์..... 134
ภาคผนวก ค ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์ทางวิชาการ..... 135
ประวัติผู้เขียน..... 136

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สรุปลักษณะสำคัญๆที่เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะการไบอัสเซลไฟฟ้าเคมีที่แตกต่างกัน.....	24
3.1	แสดงการเปล่งแสงชนิดต่างๆแบ่งตามวิธีการกระตุ้น.....	47
6.1	แสดงเงื่อนไขในการ anodization เพื่อสร้างชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนค่าต่างๆ.....	86
6.2	แสดงข้อมูลต่างๆของสเปกตรัมรามานของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนค่าต่างๆ.....	87
6.3	แสดงชนิดและลักษณะพันธะที่ตำแหน่งเลขคลื่นต่างๆของพอรัสซิลิกอน.....	106
7.1	แสดงข้อมูลการตอบสนองทางแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆของอุปกรณ์นาโนพอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นจากชั้นนาโนพอรัสซิลิกอน ที่มีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนต่างๆ เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ซิลิกอนโฟโต้ไดโอด.	119
8.1	แสดงข้อมูลปริมาณความเข้มแสงของนาโนพอรัสซิลิกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตตลอดเวลา กับนาโนพอรัสซิลิกอนที่ถูกจัดเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลต ในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆเมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง.....	125
8.2	แสดงค่าเปอร์เซนต์ความพรุนและค่าความยาวคลื่นแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้น โดยใช้เงื่อนไขในการ anodization แบบเดียวกัน.....	126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 1.1	แสดงขั้นตอนในกระบวนการสร้าง SOI โดยใช้เทคนิคพอรัสซิลิกอนโดย (ก) เป็นรอยต่อพี-เอ็น ในแผ่นผลึกซิลิกอน (ข) ทำการสร้างชั้นพอรัสซิลิกอนปกคลุมผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น (ค) ทำการออกซิเดชั่นชั้นพอรัสซิลิกอนเพื่อทำให้เป็นชั้นฉนวน.....	4
รูปที่ 1.2	แสดงภาพตัดขวางโครงสร้างของ SOI ที่ใช้เทคนิคนาโนพอรัสซิลิกอน.....	4
รูปที่ 2.1	แสดงแบบจำลองง่ายๆของอะตอมซิลิกอน.....	6
รูปที่ 2.2	แสดงแบบจำลองพันธะโควาเลนท์ระหว่างอะตอมซิลิกอน.....	7
รูปที่ 2.3	แสดงโครงผลึกหนึ่งหน่วยของโครงสร้างรูปเพชร.....	7
รูปที่ 2.4	แสดงโครงสร้างแบบ Tetrahedral Structure ที่อยู่ภายใน Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร.....	8
รูปที่ 2.5	แสดงส่วนต่างๆของ Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร โดย (ก) แสดงส่วนครึ่งล่างของ Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร (ข) แสดงส่วนครึ่งบนของ Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร.....	8
รูปที่ 2.6	แสดงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในกรณีที่ 7 อะตอมถูกนำเข้ามาใกล้ชิดกัน.....	10
รูปที่ 2.7	แสดงการแตกแยกของระดับพลังงาน 3s และ 3p ของผลึกซิลิกอน ที่ตำแหน่งระยะห่างระหว่างอะตอมต่างๆ.....	11
รูปที่ 2.8	แสดงแผนภูมิแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนในมิติของ k-space.....	12
รูปที่ 2.9	แสดงลักษณะโครงสร้างพลังงานของผลึกซิลิกอนบริสุทธิ์.....	13
รูปที่ 2.10	แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอนบริสุทธิ์.....	13
รูปที่ 2.11	แสดง (ก) ลักษณะผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น (ข) โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น.....	16
รูปที่ 2.12	แสดง (ก) ลักษณะผลึกซิลิกอนชนิดพี (ข) โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนชนิดพี.....	16
รูปที่ 2.13	แสดงภาพจำลองโครงสร้างของชั้นพอรัสซิลิกอน.....	17
รูปที่ 2.14	แสดงลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.15	แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆ และทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะภายใน.....	19
รูปที่ 2.16	แสดงลักษณะแถบพลังงานของพอรัสซิลิกอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอน.	20
รูปที่ 2.17	แสดงลักษณะการไบอัสเซลไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่างๆ.....	22
รูปที่ 2.18	แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลไฟฟ้าเคมีระหว่างผลึกซิลิกอน (ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก...	23
รูปที่ 2.19	แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลไฟฟ้าเคมี ในส่วนที่มีการไบอัสแบบ anodic bias.....	25
รูปที่ 2.20	แสดงลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอน (ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก.....	27
รูปที่ 2.21	แสดงแผนภาพการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่างๆภายในเซลไฟฟ้าเคมี โดยที่ d เป็นความหนาของผลึกซิลิกอน , W เป็นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (SCR) ส่วน d_1 เป็นความกว้างของบริเวณ diffusion layer ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก..	28
รูปที่ 2.22	แสดงขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน.....	30
รูปที่ 2.23	แสดงแบบจำลองการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนทั้งสองลักษณะ โดยที่ (ก) ลักษณะการกัดแบบ electropolishing (ข) ลักษณะการกัดแบบ porous etching.....	33
รูปที่ 2.24	แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลที่ถูกดึงมารวมกันที่บริเวณก้นหลุมเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า.....	34
รูปที่ 2.25	แสดงบริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นรอบๆผนังของรูหรือหลุมที่บริเวณผิวของผลึกซิลิกอน.....	35
รูปที่ 2.26	แสดงการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน.....	36
รูปที่ 2.27	แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน.....	36
รูปที่ 2.28	แสดงการกระจายตัวของกระแสรอบๆผนังของรูพรุน.....	37
รูปที่ 2.29	แสดงกลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของชั้นพอรัสซิลิกอนชนิดพี โดยที่ (ก) แสดงโครงสร้างของพอรัสซิลิกอนและทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะโฮล	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

(ข) แสดงลักษณะแถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลจากผลึกซิลิกอนผ่านเข้าไปในโครงสร้างของพอรัสซิลิกอน
(ค) แสดงลักษณะแถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลจากผลึกซิลิกอนผ่านไปยังสารละลายกรด HF ที่บริเวณผิวสัมผัสที่ก้นหลุมของรูพรุน..... 38

รูปที่ 2.30 แสดงแผนภาพบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (SCR) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอรัสซิลิกอนที่สร้างจากผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น โดยที่
(ก) โครงสร้างของพอรัสซิลิกอนที่มีขนาดมากกว่า 2W
(ข) โครงสร้างของพอรัสซิลิกอนที่มีขนาดน้อยกว่า 2W..... 40

รูปที่ 2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อผลึกซิลิกอน (q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอรัสซิลิกอน..... 41

รูปที่ 2.32 แสดงแผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอรัสซิลิกอนที่เปอร์เซนต์ความพรุนต่างๆ..... 42

รูปที่ 3.1 แสดงการกระจายตัวของระดับพลังงาน (ก) localized state และ (ข) surface state ภายในช่องว่างพลังงาน..... 43

รูปที่ 3.2 แสดงกระบวนการรวมตัวของพาหะแบบเปล่งแสงในสารกึ่งตัวนำ
(ก) Band-to-Level emission (ข) Donor-Accepter emission
(ค) Band-to-Band emission..... 46

รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพสีของแสงที่ความยาวคลื่นและค่าพลังงานต่างๆ..... 48

รูปที่ 3.4 แสดงแผนภาพโครงสร้างของแถบพลังงานแบบ direct band gab..... 49

รูปที่ 3.5 แสดงแผนภาพโครงสร้างของแถบพลังงานแบบ indirect band gab..... 50

รูปที่ 3.6 แสดงแบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้งสามระดับภายในพอรัสซิลิกอน..... 52

รูปที่ 4.1 แสดงอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการ microwave plasma decomposition ของก๊าซไซเรน (SiH_4)..... 54

รูปที่ 4.2 แสดงการ Spark ที่เกิดขึ้นระหว่างปลายลวดทังสเตนกับแผ่นผลึกซิลิกอน. 55

รูปที่ 4.3 แสดงภาคตัดขวางของอุปกรณ์เซลไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการ anodization..... 56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.4	แสดงภาคตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น.....	57
รูปที่ 4.5	แสดงภาคตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิกอนที่ผ่านการเคลือบโลหะอลูมิเนียมที่บริเวณด้านหลังของแผ่นแล้ว.....	58
รูปที่ 4.6	แสดงภาคตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิกอนที่เกิดชั้นพอรัสซิลิกอนที่บริเวณผิวหน้าด้านบน.....	59
รูปที่ 4.7	แสดงรูปถ่ายของพอรัสซิลิกอนที่ได้ทำการสร้างจนเสร็จสมบูรณ์.....	60
รูปที่ 5.1	แสดงภาพถ่ายของเครื่องชั่งน้ำหนักของบริษัท Sartorius รุ่น 1602 MP ที่มีความละเอียดสูง.....	61
รูปที่ 5.2	แสดงแผนภาพหลักการทำงานของเครื่อง SEM.....	62
รูปที่ 5.3	แสดงภาพถ่ายเครื่อง SEM ของ JEOL รุ่น JSM-6301F.....	63
รูปที่ 5.4	แสดงการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานที่ทำให้เกิด Raman Scattering...	64
รูปที่ 5.5	แสดงภาพถ่ายของเครื่อง FT-Raman Spectrometer ของ Renishaw รุ่น System 2000.....	65
รูปที่ 5.6	แสดงส่วนประกอบต่างๆของเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโต้มิเตอร์.....	66
รูปที่ 5.7	แสดงภาพถ่ายของเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ของ Nikon รุ่น G250.....	67
รูปที่ 5.8	แสดงแผนภาพองค์ประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโต้มิเตอร์..	68
รูปที่ 5.9	แสดงภาพถ่ายของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโต้มิเตอร์ รุ่น System 2000.....	69
รูปที่ 5.10	แสดงภาพถ่ายของเครื่อง Cryostat ของ LEYBOLD.....	71
รูปที่ 6.1	แสดงภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร.....	72
รูปที่ 6.2	แสดงภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร.....	73
รูปที่ 6.3	แสดงภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทาน 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร.....	73
รูปที่ 6.4	แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.5 แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร..... 74

รูปที่ 6.6 แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทาน 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร..... 75

รูปที่ 6.7 แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพีที่มีสภาพต้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร..... 76

รูปที่ 6.8 แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพีที่มีสภาพต้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร..... 76

รูปที่ 6.9 แสดงภาพตัดขวางจำลองของแผ่นผลึกซิลิกอนลักษณะต่างๆที่ถูกทำการวัดน้ำหนัก เพื่อนำไปคำนวณหาค่าเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอน โดยที่ (ก) เป็นน้ำหนักของแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น (m_1)
(ข) เป็นน้ำหนักของแผ่นผลึกซิลิกอนหลังจากผ่านกระบวนการสร้างชั้นพอรัสซิลิกอน (m_2)
(ค) เป็นน้ำหนักของแผ่นผลึกซิลิกอนหลังจากทำการลอกชั้นพอรัสซิลิกอนทิ้งแล้ว (m_3)..... 77

รูปที่ 6.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนกับค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี..... 79

รูปที่ 6.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนกับค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น..... 79

รูปที่ 6.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนกับค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization..... 81

รูปที่ 6.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนกับปริมาณความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ที่ใช้ในการ anodization..... 82

รูปที่ 6.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนกับเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization..... 83

รูปที่ 6.15 แสดงสเปกตรัมรามานของผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรต่างๆ..... 84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.16 แสดงความสัมพันธ์ระว่างค่าความกว้างที่ครึ่งของความสูง และค่าการเปลี่ยนแปลงลดลงของความถี่สัญญาณสเปกตรัมรามาน กับขนาดของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตร..... 85

รูปที่ 6.17 แสดงสเปกตรัมรามานของพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนค่าต่างๆ 87

รูปที่ 6.18 แสดงสเปกตรัมแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนชนิดพีที่มีค่าสภาพต้านทานค่าต่างๆ..... 89

รูปที่ 6.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี..... 89

รูปที่ 6.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น..... 90

รูปที่ 6.21 แสดงสเปกตรัมของแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้ความหนาแน่นกระแสค่าต่างๆ..... 91

รูปที่ 6.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization..... 92

รูปที่ 6.23 แสดงสเปกตรัมแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เปอร์เซนต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกค่าต่างๆ..... 93

รูปที่ 6.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับเปอร์เซนต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริก..... 94

รูปที่ 6.25 แสดงสเปกตรัมแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยใช้เวลาในการ anodization ค่าต่างๆ..... 95

รูปที่ 6.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการ anodization..... 96

รูปที่ 6.27 แสดงสีที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนค่าต่างๆ..... 97

รูปที่ 6.28 แสดงสีของแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ซึ่งได้จากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนที่แตกต่างกัน..... 98

รูปที่ 6.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนกับความยาวคลื่นแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์..... 99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนกับความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์..... 100

รูปที่ 6.31 แสดงภาพถ่ายของ Free standing porous silicon ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด โดยที่ (ก) ก่อนทำการฉายแสงด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลต (ข) ขณะทำการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลต..... 101

รูปที่ 6.32 แสดงสเปกตรัมแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนที่อุณหภูมิต่างๆ. 102

รูปที่ 6.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับอุณหภูมิ.. 102

รูปที่ 6.34 แสดงสเปกตรัมแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนที่เวลาในการฉายแสงอุลตร้าไวโอเลตต่างๆ..... 103

รูปที่ 6.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอุลตร้าไวโอเลต..... 104

รูปที่ 6.36 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของชั้นพอรัสซิลิกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตเป็นเวลาต่างๆ ในสภาพแวดล้อมของอากาศ..... 105

รูปที่ 6.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอุลตร้าไวโอเลตให้แก่พอรัสซิลิกอน ในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ..... 107

รูปที่ 6.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับเวลาในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ..... 108

รูปที่ 7.1 แสดงแบบจำลองโครงสร้างของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์.... 110

รูปที่ 7.2 แสดงภาพถ่ายของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นได้..... 111

รูปที่ 7.3 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ โดย (ก) อุปกรณ์ถูกจัดเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายแสง (ข) อุปกรณ์ได้รับการฉายแสง..... 111

รูปที่ 7.4 แสดงแผนภาพของอุปกรณ์เครื่องมือวัดการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์..... 112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 7.5 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะทำการไบอัสแบบย้อนกลับของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุน 65% ซึ่งได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มแสงค่าต่างๆ..... 113

รูปที่ 7.6 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะทำการไบอัสแบบย้อนกลับของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุน 70% ซึ่งได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มแสงค่าต่างๆ..... 114

รูปที่ 7.7 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะทำการไบอัสแบบย้อนกลับของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุน 80% ซึ่งได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มแสงค่าต่างๆ..... 115

รูปที่ 7.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต้กับความเข้มแสงในขณะทำการไบอัสแบบย้อนกลับที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ -15 โวลต์ ของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุน 65% , 70% และ 80% ตามลำดับ ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ..... 116

รูปที่ 7.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต้กับเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอน ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ..... 117

รูปที่ 7.10 แสดงผลการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนต่างๆเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ซิลิกอนโฟโต้ไดโอด..... 118

รูปที่ 7.11 แสดงผลการตอบสนองเชิงเวลาของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ ที่สร้างขึ้นจาก

(ก) ชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนประมาณ 65 %

(ข) ชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนประมาณ 80 %..... 120

รูปที่ 1ข แสดงแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้นที่มีผิวด้านหน้าขัดมันเป็นกระจกเงา..... 131

รูปที่ 2ข แสดงการทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกซิลิกอน..... 131

รูปที่ 3ข แสดงการเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่องvacuum evaporator 132

รูปที่ 4ข แสดงการซินเตอร์ริ่งโลหะอลูมิเนียมด้านหลังแผ่นผลึกซิลิกอน..... 132

รูปที่ 5ข แสดงการบรรจุแผ่นผลึกซิลิกอนเข้าสู่ชุดกัดทางไฟฟ้าเคมี..... 133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 6ข	แสดงกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีเพื่อสร้างชั้นพอรัสซิลิกอน.....	133
รูปที่ 7ข	แสดงการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอน.....	134
รูปที่ 8ข	แสดงการวัดการตอบสนองทางแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์.....	134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญลักษณ์

สัญญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
a	ค่าคงที่โครงผลึก	^{o}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	พลังงานระดับอินทรินซิค	eV
E_p	พลังงานโฟนอน	eV
E_{PS}	พลังงานแถบต้องห้ามของพอรัสซิลิกอน	eV
E_q	พลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์ quantum size effect	eV
E_S	สนามไฟฟ้ารอบๆผนังรูพรุนของพอรัสซิลิกอน	V/m
$E_S/$	สนามไฟฟ้ารอบๆก้นหลุมของรูพรุน	V/m
E_v	พลังงานแถบวาเลนซ์	eV
FWHM	ความกว้างที่ครึ่งของความสูงสเปกตรัม	cm^{-1}
h	ค่าคงที่ของแพลงค์	J.s
I	ค่ากระแสไฟฟ้า	mA
I_{PS}	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดพอรัสซิลิกอน	mA
J	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	mA/cm^2
J_{PS}	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดพอรัสซิลิกอน	mA/cm^2
k	เวฟนัมเบอร์	cm^{-1}
k_p	เวฟนัมเบอร์ของโฟนอน	cm^{-1}
L	ขนาดของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตร	nm
n	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ	cm^{-3}
n_i	ความหนาแน่นพาหะของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์	cm^{-3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญลักษณ์ (ต่อ)

p	ความหนาแน่นของโฮล	cm^{-3}
P	ค่าความพรุน	%
q	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	C
q	ขนาดโครงสร้างของเนื้อผลึกซิลิกอน	nm
T	อุณหภูมิ	K
V	ศักดาไฟฟ้า	V
V_{con}	ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับผลึกซิลิกอน	V
V_d	ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ diffusion layer	V
V_{elec}	ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโตรดกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก	V
V_{SCR}	ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะนำกระแส	V
W	ความกว้างบริเวณปลอดพาหะนำกระแส	μm
ΔE_c	พลังงานที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำ	eV
ΔE_v	พลังงานที่เปลี่ยนแปลงลดลงจากระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์	eV
$\Delta\omega$	การเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณสเปกตรัมรามาน	cm^{-1}
ε_0	ค่าเพอร์มิตติวิตี้ของสูญญากาศ	F/cm
ε_{Si}	ค่าเพอร์มิตติวิตี้ของซิลิกอน	F/cm
ρ	สภาพต้านทาน	Ω-cm
λ	ค่าความยาวคลื่น	nm
ν	ค่าความถี่	Hz
η	ประสิทธิภาพของการรวมตัวแบบเปล่งแสง	-
τ_R	เวลาอายุเฉลี่ยของพาหะที่นับตั้งแต่ถูกกระตุ้นจนถึงการรวมตัวแบบเปล่งแสง	μs
τ_N	เวลาอายุเฉลี่ยของพาหะที่นับตั้งแต่ถูกกระตุ้นจนถึงการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง	μs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในการพัฒนาทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ในปัจจุบัน จะเห็นได้ว่าผลึกซิลิกอนนั้นเป็นวัสดุพื้นฐานที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก สำหรับการนำไปใช้สร้างเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์และวงจรรวม (IC) ชนิดต่างๆ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีราคาถูก อีกทั้งยังสามารถทำการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆลงบนแผ่นผลึกซิลิกอนได้เป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ก็เพื่อที่จะนำเอาซิลิกอนชิพเหล่านี้ไปทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆที่ใช้อำนวยความสะดวกในชีวิตประจำวันของมนุษย์ นับตั้งแต่เครื่องใช้ไฟฟ้าโดยทั่วไปจนไปถึงเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล แต่สำหรับอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง (Optoelectronics) นักวิทยาศาสตร์หลายๆท่านได้คาดการณ์ไว้ว่าในอนาคตจะเข้ามามีบทบาทแทนที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน กับไม่ค่อยนิยมนำเอาผลึกซิลิกอน มาใช้เป็นวัสดุพื้นฐานแต่อย่างไร ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากผลึกซิลิกอนนั้นเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นแบบ Indirect-band gab มีขนาดของช่องว่างพลังงานเพียง 1.14 eV ซึ่งไม่สามารถให้แสงในช่วงที่สามารถมองเห็นได้ (Visible Light) ด้วยเหตุผลนี้เองทำให้ในปัจจุบันจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหันไปทำการสร้างอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์แสงนี้บนวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นแทน เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องมาจากสารประกอบแกลเลียมอาร์เซไนด์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอนพบว่ามีข้อได้เปรียบเกี่ยวกับคุณสมบัติทางแสง เช่นมีค่าความกว้างของช่องว่างพลังงานที่มากกว่าผลึกซิลิกอน คือมีค่าเท่ากับ 1.4 eV และมีลักษณะของช่องว่างพลังงานเป็นแบบ Direct-band gab ทำให้แกลเลียมอาร์เซไนด์จึงมีศักยภาพในการนำไปใช้สร้างเป็นส่วนประกอบของอุปกรณ์ที่เกี่ยวกับแสงต่างๆ เช่น เซลแสงอาทิตย์ , อุปกรณ์วัดแสง และอุปกรณ์ Light Emitting Diode (LED) เป็นต้น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ทางแสงที่สร้างจากเทคโนโลยีของแกลเลียมอาร์เซไนด์เหล่านี้จึงมีราคาที่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากเทคโนโลยีซิลิกอน

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

แต่จากการค้นพบคุณสมบัติในการเปล่งแสง (ลูมิเนสเซนซ์) ณ.ที่อุณหภูมิห้องเมื่อไม่นานมานี้ของผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆจำนวนมาก เรียกผลึกซิลิกอนที่มีโครงสร้างในลักษณะเช่นนี้ว่า **นาโนพอรัสซิลิกอน** ทำให้เกิดแนวทางที่สามารถจะนำเอาผลึกซิลิกอนมาใช้เป็นวัสดุพื้นฐานในการสร้างอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์แสงได้ โดยนาโนพอรัสซิลิกอนเป็นวัสดุที่ได้ถูกค้นพบครั้งแรกในปี คศ. 1956 ในระหว่างกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีของผลึกซิลิกอนในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดย Uhlir [1] ซึ่งในขณะนั้นได้ทำงานอยู่ที่ Bell Laboratories ในประเทศสหรัฐอเมริกา ทั้งสองได้พยายามที่จะทำการพัฒนาเทคนิคในการขัดผิวหน้าวัสดุสารกึ่งตัวนำสองชนิด ได้แก่ เยอรมันเนียมและซิลิกอน ซึ่งในขณะนั้นได้มีความพยายามที่จะนำวัสดุสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด มาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการพัฒนาเทคนิคในการขัดผิวหน้าของวัสดุทั้งสองให้เรียบ ซึ่งเทคนิคและวิธีการขัดผิวหน้าวัสดุด้วยไฟฟ้าของ Uhlir นี้ ผลที่ได้ส่วนมากจะออกมาเป็นที่น่าพอใจ แต่ในบางครั้งหลังจากการขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้าแล้ว พบว่าบนผิวหน้าของวัสดุเหล่านี้จะปรากฏฟิล์มที่มีลักษณะสีดำ แดงหรือน้ำตาลเกิดขึ้น ซึ่งฟิล์มเหล่านี้เป็นสิ่งที่พวกเขาไม่ต้องการให้เกิดขึ้นบนผิวหน้าของวัสดุ ดังนั้นจึงได้มีความพยายามที่จะแก้ไขปัญหาเหล่านี้ โดยมีการปรับเงื่อนไขในการทดลอง โดยไม่ทราบว่าฟิล์มที่พวกเขาไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในขณะนั้น ในอนาคตอีก 40 ปีข้างหน้าจะกลายมาเป็นวัสดุที่มีบทบาทและมีความสำคัญต่องานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์สมัยใหม่ โดยได้มีการนำเอานาโนพอรัสซิลิกอนไปประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีทางด้าน electronic isolation และงานทางด้าน micromachining เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

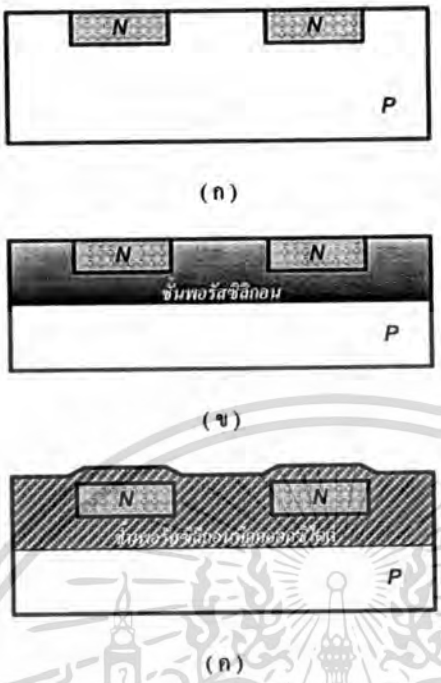
จนมาถึงในปี 1990 ได้มีการรายงานการค้นพบคุณสมบัติเปล่งแสง ณ.ที่อุณหภูมิห้องของนาโนพอรัสซิลิกอนเป็นครั้งแรกโดย Canham [1] การค้นพบคุณสมบัติเปล่งแสงของนาโนพอรัสซิลิกอนในครั้งนี้เอง ได้ทำให้เกิดแนวทางและความเป็นไปได้ที่สามารถจะนำเอาวัสดุสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม 4 ที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานแบบ Indirect-band gab โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลึกซิลิกอน มาใช้เป็นวัสดุพื้นฐานในการสร้างเป็นอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง ซึ่งจะมีผลทำให้สามารถทำการพัฒนาสร้างอุปกรณ์เปล่งแสงและอุปกรณ์รับแสง ให้รวมอยู่กันกับอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นๆบนฐานรองซิลิกอนเดียวกันได้ ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลที่กระบวนการในการสร้างชั้นของนาโนพอรัสซิลิกอนค่อนข้างจะง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน และสามารถเข้ากันได้กับกระบวนการสร้างวงจรรวม (IC) มาตราฐาน ทำให้ภายในอนาคตอันใกล้นี้การติดต่อรับส่งข้อมูลต่างๆภายในวงจรรวมหรือระหว่างวงจรรวมด้วยกัน จะมีการเปลี่ยนแปลงมาใช้สัญญาณแสงแทนการใช้สัญญาณไฟฟ้า (photon data transmission) ทั้งนี้เนื่องจากการติดต่อรับส่งข้อมูลโดยใช้สัญญาณแสงนั้นสามารถที่จะติดต่อรับส่งข้อมูลได้คราวละมากๆในเวลาเดียวกันได้ โดยไม่มีการรบกวนกันของสัญญาณเกิดขึ้นเหมือนกับสัญญาณไฟฟ้า ด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้การประมวลผลของคอมพิวเตอร์ในอนาคตจะมีการทำงานที่รวดเร็วกว่าในปัจจุบันมาก

1.2 การประยุกต์ใช้นาโนพอรัสซิลิกอนในงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมา

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นแล้วว่านาโนพอรัสซิลิกอนนั้นไม่ใช่วัสดุชนิดใหม่แต่อย่างไร โดยได้ถูกค้นพบมาเป็นเวลากว่า 40 ปีแล้ว ในช่วงเวลาที่ผ่านมาได้มีการนำเอานาโนพอรัสซิลิกอนไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่างๆมากมาย ตัวอย่างเช่น ในงานทางด้าน electronic isolation [2 ,3] โดยมีการนำเอานาโนพอรัสซิลิกอนมาใช้งานสร้างเป็นชั้นฉนวนในงานวิจัยทางด้าน silicon-on-insulator (SOI) ทั้งนี้ก็เพื่อแยกอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ในวงจรรวมออกจากกัน หรือแยกออกจากฐานรอง ทำให้พลังงานที่ใช้ในวงจรรวมมีค่าลดลงได้ โดยกระบวนการสร้างชั้นฉนวนดังกล่าวด้วยเทคนิคนาโน พอรัสซิลิกอนจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 1.1

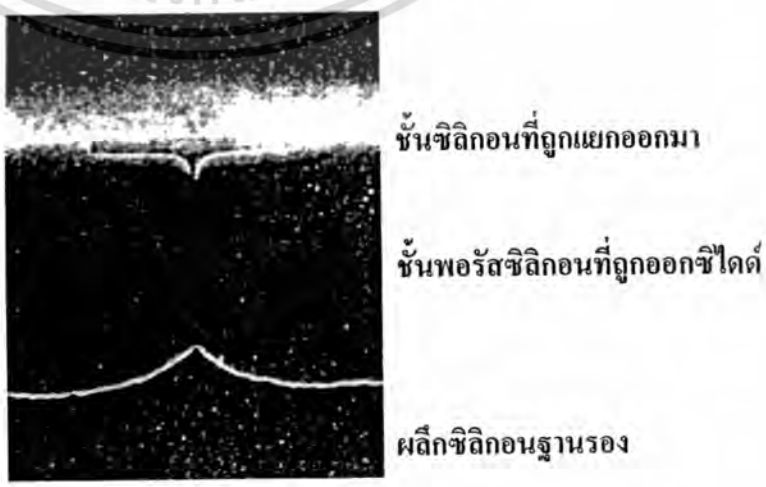
นอกจากตัวอย่างที่ได้ยกมาข้างต้นนี้แล้ว นาโนพอรัสซิลิกอนยังถูกนำไปประยุกต์ใช้งานสร้างเป็นอุปกรณ์ชนิดต่างๆอีก เช่น เซ็นเซอร์สูญญากาศ และ ก๊าซเซ็นเซอร์ อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 แสดงขั้นตอนในกระบวนการสร้าง SOI โดยใช้เทคนิคนาโนพอรัสซิลิกอน โดยที่
(ก) เป็นรอยต่อพี-เอ็น ในแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพีเริ่มต้น
(ข) ทำการสร้างชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนปกคลุมผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น
(ค) ทำการออกซิเดชั่นชั้นพอรัสซิลิกอนเพื่อทำให้เป็นชั้นฉนวน

ซึ่งภายหลังจากกระบวนการสร้างเสร็จสมบรูณ์ ก็จะได้ชั้นของซิลิกอนที่ถูกแยกออกจากผลึกซิลิกอนฐานรอง โดยชั้นของนาโนพอรัสซิลิกอนที่ถูกออกซิไดด์จนกลายเป็นชั้นฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แสดงภาพตัดขวางโครงสร้างของ SOI ที่ใช้เทคนิคนาโนพอรัสซิลิกอน [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

จากอดีตที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า นาโนพอรัสซิลิกอนมีความสำคัญและประโยชน์เป็นอย่างมากสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยต่างๆตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น และนับตั้งแต่ได้มีการค้นพบคุณสมบัติในการเปล่งแสงได้ของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนอีกด้วยแล้ว จึงทำให้นาโนพอรัสซิลิกอนกลายมาเป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่ง ที่ได้รับความสนใจว่าน่าจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสงได้

โดยการทำวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์ เพื่อ

1. ศึกษาโครงสร้างของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอน ที่เงื่อนไขในการสร้างต่างๆ
2. ศึกษาคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของนาโนพอรัสซิลิกอนที่เงื่อนไขในการสร้างต่างๆ
3. ศึกษาแนวทางการใช้นาโนพอรัสซิลิกอน เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์แสงโดยในงานวิจัยนี้นำมาใช้สร้างเป็นโฟโต้ดีเทคเตอร์แสงในช่วงที่ตามองเห็นเพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎี

2.1 ผลึกซิลิกอน

2.1.1 โครงสร้างของผลึกซิลิกอน

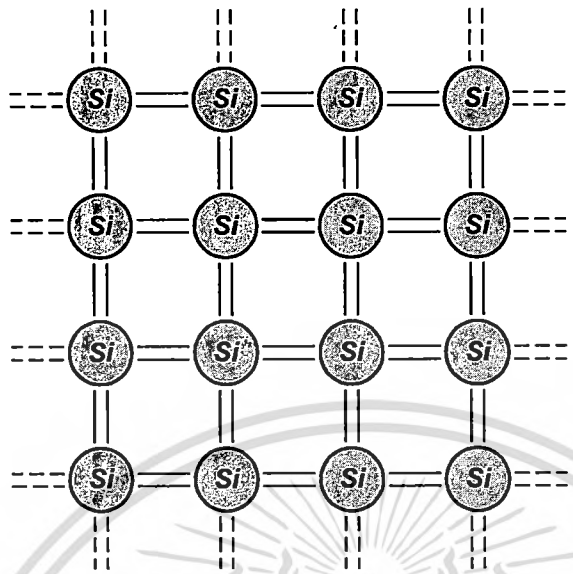
ซิลิกอนเป็นสารกึ่งตัวนำที่ประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุซิลิกอนหลายๆอะตอมมาอยู่ใกล้ชิดกัน โดยอะตอมดังกล่าวจะมีการยึดเกาะเกี่ยวซึ่งกันและกันเพื่อความมั่นคงของอะตอม การเกาะเกี่ยวกันระหว่างอะตอมซิลิกอนเหล่านี้เรียกว่า พันธะ (bond) กลไกในการเกาะเกี่ยวหรือการเกิดพันธะนี้มีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะพันธะที่เกิดขึ้นในผลึกซิลิกอนเท่านั้น

ในผลึกซิลิกอนเมื่ออะตอมของซิลิกอนเข้ามาอยู่ใกล้ชิดกันจะทำให้วงโคจรชั้นนอกสุดของแต่ละอะตอมซึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอนวงนอกสุด (valence electrons) อยู่ถึง 4 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.1

รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองง่ายๆของอะตอมซิลิกอน

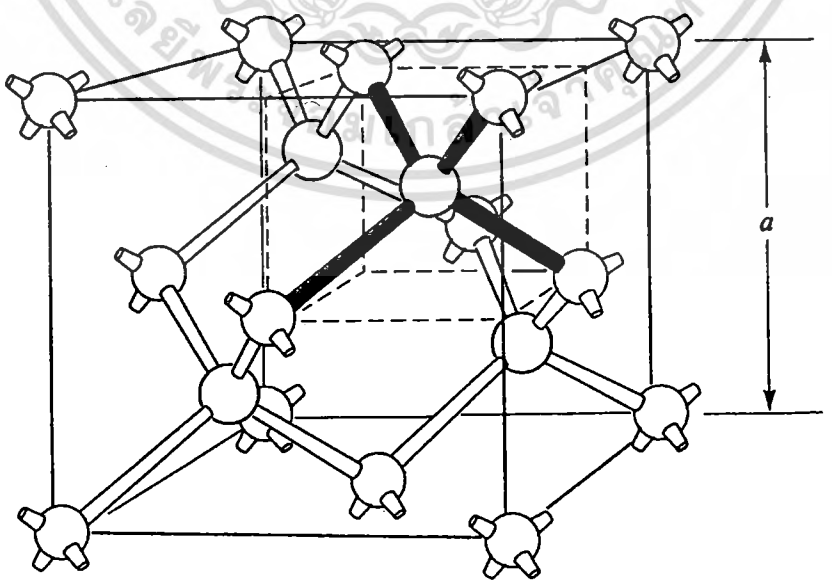
เกิดการทับซ้อนกัน อันจะทำให้เกิดพันธะแบบที่เรียกว่า พันธะโควาเลนท์ (covalent bond) เกิดขึ้น โดยพันธะดังกล่าวนี้เกิดจากอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันจะมีการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดร่วมกัน ทั้งนี้ก็เพื่อให้อะตอมอยู่ในภาวะที่มั่นคง ดังแสดงในรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงแบบจำลองพันธะโควาเลนท์ระหว่างอะตอมซิลิกอน

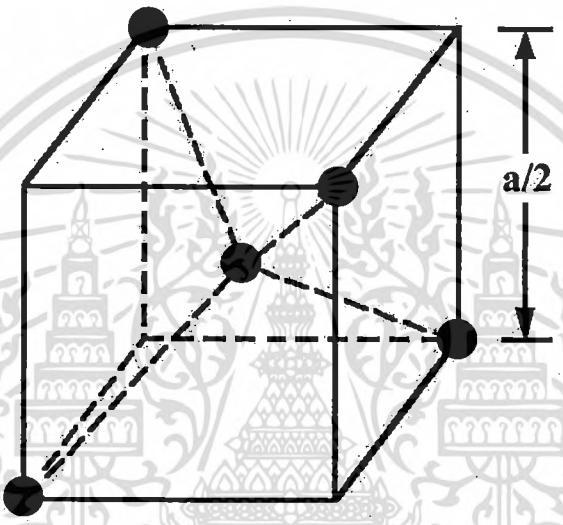
จากรูปข้างต้นจะเป็นโครงสร้างของผลึกซิลิกอนบริสุทธิ์ในแบบสองมิติ โดยแต่ละอะตอมจะมีการใช้อิเล็กตรอนวงนอกสุดทั้ง 4 ร่วมกันกับอิเล็กตรอนวงนอกสุดของอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม เกิดพันธะโควาเลนท์ขึ้น 4 พันธะด้วยกัน การใช้อิเล็กตรอนร่วมกันนี้เองทำให้อะตอมของซิลิกอนต่างๆมีความมั่นคง และสามารถประกอบรวมกันเป็นโครงสร้างของผลึกได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



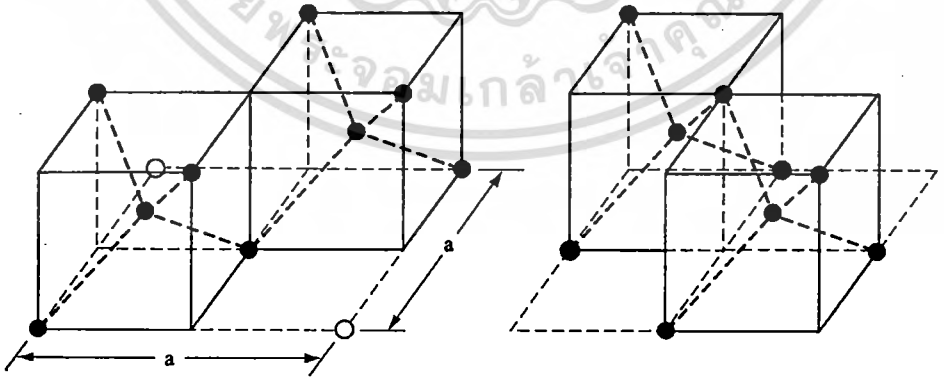
รูปที่ 2.3 แสดงโครงผลึกหนึ่งหน่วยของโครงสร้างรูปเพชร [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างแบบ Tetrahedral Structure ที่อยู่ภายใน Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร



(ก) (ข)

รูปที่ 2.5 แสดงส่วนต่างๆของ Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร โดย (ก) แสดงส่วนครึ่งล่างของ Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร (ข) แสดงส่วนครึ่งบนของ Unit Lattice ของโครงสร้างเพชร

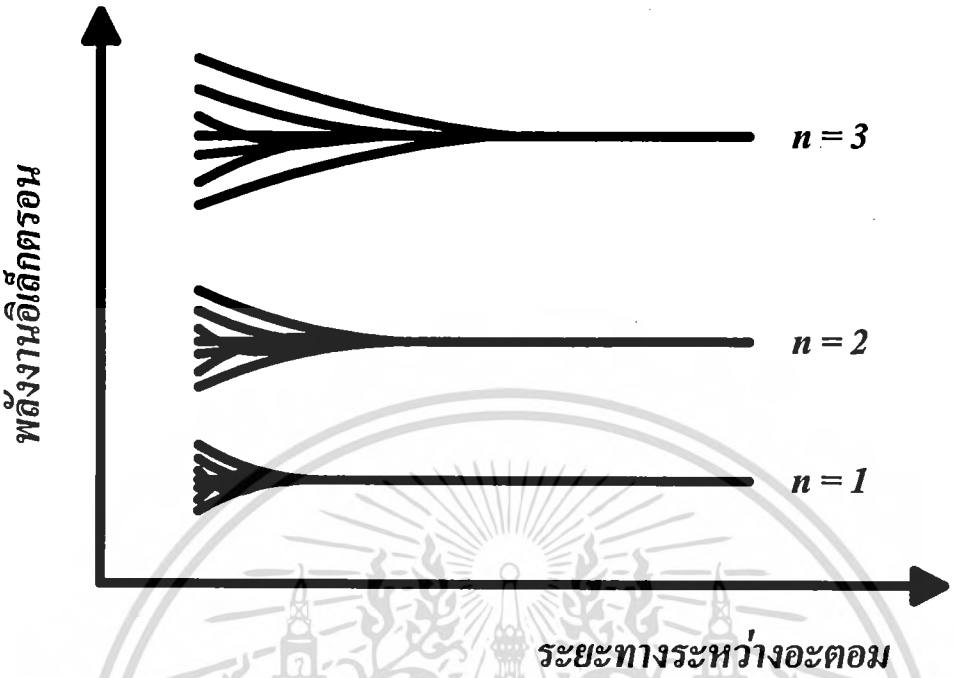
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 [5]

ในอะตอมเดี่ยวๆของวัสดุทุกชนิด จะประกอบด้วยอิเล็กตรอนโคจรอยู่ที่ระดับพลังงานต่างๆ โดยระดับพลังงานเหล่านี้เป็นระดับพลังงานที่ไม่ต่อเนื่อง และจากกฎการแยกตัว (exclusion principle) ซึ่งได้บอกไว้ว่า แต่ละระดับพลังงานที่ถูกกำหนดไว้ด้วยตัวเลขควอนตัม 3 ตัว (n , l , m) นั้น จะมีอิเล็กตรอนอยู่ได้เพียงสองตัว โดยที่อิเล็กตรอนสองตัวนี้ต้องมีการหมุนที่ไม่เหมือนกัน แต่เมื่อพิจารณาในรูปของผลึก ซึ่งประกอบด้วยอะตอมจำนวนมากมายเข้ามาอยู่ใกล้ชิดกัน จึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงกลุ่มของอิเล็กตรอนที่โคจรอยู่ในแถบพลังงาน ซึ่งหมายถึงระดับพลังงานจำนวนมากมายที่อยู่ใกล้ชิดกันมากจนเกิดเป็นแถบพลังงานขึ้นมา โดยแถบพลังเหล่านี้เกิดขึ้นจากการที่วงโคจรของอิเล็กตรอนของแต่ละอะตอมเดิมเกิดการทับซ้อนและเหลื่อมล้ำกันกับวงโคจรของอิเล็กตรอนของอะตอมข้างเคียง ทำให้วงโคจรหรือก็คือระดับพลังงานเดิมของแต่ละอะตอมมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เช่น กรณีอะตอมที่เหมือนกันสองอะตอมถูกนำเข้ามาใกล้ๆกันทีละน้อยๆ จนกระทั่งวงโคจรชั้นนอกสุดของแต่ละอะตอมเกิดการทับซ้อนกันขึ้น อิเล็กตรอนต่างๆซึ่งแต่เดิมมีพลังงานเท่ากันในแต่ละอะตอมเดิม จะเกิดมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานไปอีกเล็กน้อย ทั้งนี้ก็เพราะหลักความจริงของกฎการแยกตัว ซึ่งกล่าวว่าแต่ละระดับพลังงานจะมีอิเล็กตรอนเกินสองตัวไม่ได้ ทำให้ระดับพลังงานเดิมเกิดการแตกแยกออกเป็นระดับพลังงานสองระดับ ซึ่งอยู่ใกล้กันมากและถ้าหากอะตอมทั้งสองดังกล่าวยังคงถูกทำให้เข้ามาใกล้กันมากขึ้นไปอีก อิเล็กตรอนต่างๆในระดับวงโคจรถัดต่อไปข้างในของแต่ละอะตอมก็จะมีปฏิกริยาต่อกันอีก ทำให้ระดับพลังงานเดิมเกิดการแตกแยกออกเป็นสองระดับพลังงานอีกเช่นกัน ซึ่งจำนวนการแตกแยกของระดับพลังงานเหล่านี้จะมีจำนวนเท่ากันกับจำนวนของอะตอมที่ถูกนำเข้ามาให้อยู่ใกล้ชิดกัน ดังนั้นถ้าหากมีอะตอมจำนวน n อะตอมถูกนำเข้ามาให้อยู่ใกล้ชิดกันแล้ว ระดับพลังงานแต่ละระดับของอะตอมเดิมจะแตกแยกออกเป็นจำนวน n ระดับซึ่งอยู่ใกล้กันมาก เช่นในกรณีมี 7 อะตอมถูกนำเข้ามาใกล้ชิดกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



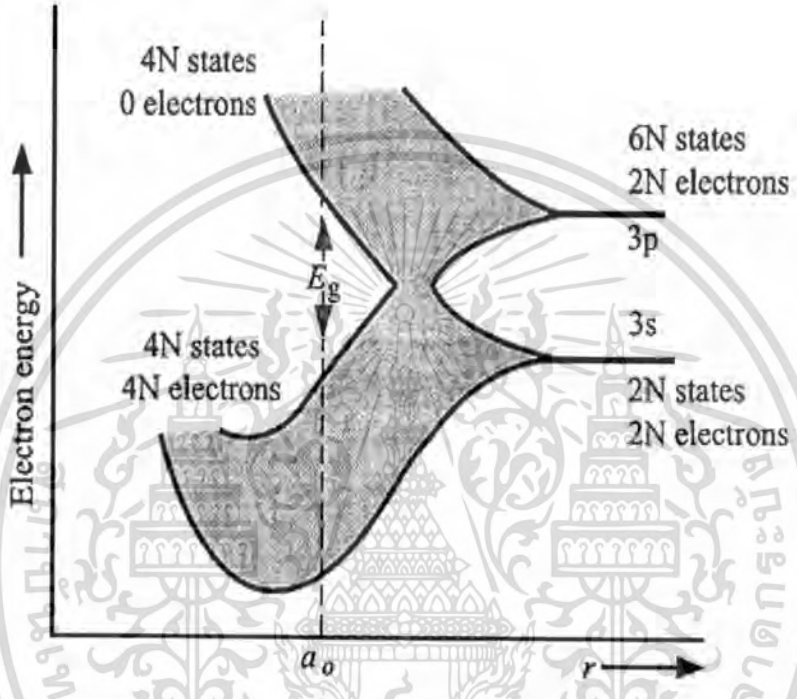
รูปที่ 2.6 แสดงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในกรณีที่ 7 อะตอมถูกนำเข้ามาใกล้ชิดกัน [5]

และจากความเป็นจริงสำหรับผลึกของแข็งแล้ว จำนวนอะตอมที่มีปฏิกริยาต่อกันนั้นมีค่ามากกว่า 2 หรือ 7 อะตอมตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นอยู่มาก เช่นอาจเป็น 10^{22} อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และช่องกว้างของแถบพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้มีค่าราวๆ 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 ซึ่งเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกสุดก็จะเกิดการแตกแยกของระดับพลังงานขึ้นดังที่ได้เคยกล่าวมาแล้ว เกิดเป็นแถบพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้ขึ้น และขณะที่ระยะห่างระหว่างอะตอมลดลงแถบพลังงานทั้งสองจะซ้อนกัน จนในที่สุดถ้าระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าลดลงต่อไปอีก แถบพลังงานที่ซ้อนกันอยู่ก็จะแยกออกเป็นสองแถบ โดยแถบพลังงานทั้งสองนี้จะอยู่แยกออกจากกันด้วยแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden gab) แต่โดยความเป็นจริงแล้วเราไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอะตอมได้อย่างต่อเนื่องตามที่เราได้กล่าวไว้ ที่เป็นเช่นนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

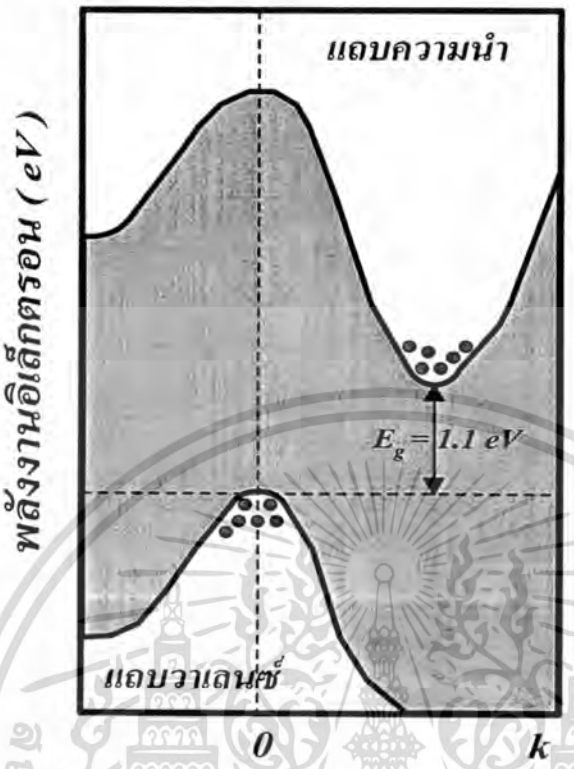
ก็เพราะว่าในผลึกของแข็งแต่ละชนิดจะมีค่าคงตัวแลททีส (lattice constant) ที่คงที่เปลี่ยนแปลงไม่ได้ ดังนั้นโครงสร้างของแถบพลังงานของผลึกของแข็งชนิดหนึ่งๆ ก็คือตำแหน่งหนึ่งๆบนแกน a_0 นั่นเอง โดยสำหรับผลึกซิลิกอนแล้วค่าคงตัวแลททีสจะมีค่าเท่ากับ 5.43 °A ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงการแตกแยกของระดับพลังงาน 3s และ 3p ของผลึกซิลิกอนที่ตำแหน่งระยะห่างระหว่างอะตอมต่างๆ [4]

พิจารณาจากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าโครงสร้างของแถบพลังงานจะประกอบด้วยแถบยินยอม (allowed bond) ซึ่งเป็นแถบพลังงานที่อิเล็กตรอนสามารถอยู่ได้อยู่ถึงสองแถบ ที่ถูกคั่นระหว่างกลางด้วยแถบต้องห้าม (forbidden gap) ซึ่งเป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนไม่สามารถอยู่ได้ โดยในสารกึ่งตัวนำแถบยินยอมแถบล่างนี้จะเรียกว่า แถบวาเลนซ์ (valence band) ซึ่งเป็นแถบพลังงานที่มีอิเล็กตรอนอยู่เกือบเต็มทุกสถานะพลังงาน ส่วนแถบบนจะเรียกว่า แถบความนำ (conduction band) ซึ่งจะเป็นแถบพลังงานที่มีอิเล็กตรอนอยู่เพียงเล็กน้อย ส่วนแถบพลังงานต้องห้ามจะถูกเรียกว่า ช่องว่างพลังงาน (energy gap) โดยในผลึกซิลิกอนค่าของช่องว่างพลังงาน (Eg) จะมีค่าเท่ากับ 1.14 eV และมีโครงสร้างของแถบพลังงานในมิติของโมเมนตัม (k-space) จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงแผนภูมิแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนในมิติของ k-space [4]

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

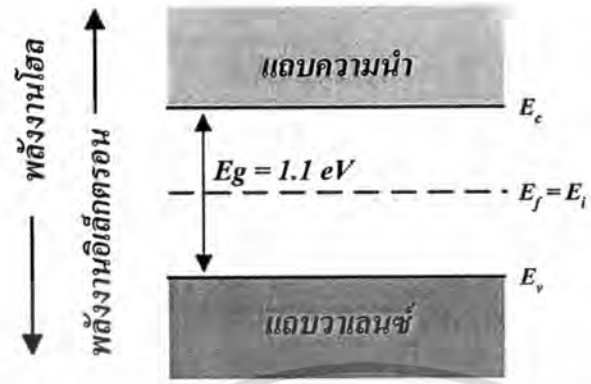
2.1.3 ชนิดของผลึกซิลิกอน

ผลึกซิลิกอนนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดใหญ่ๆ ได้คือ

2.1.3.1 ซิลิกอนบริสุทธิ์ (Intrinsic Silicon)

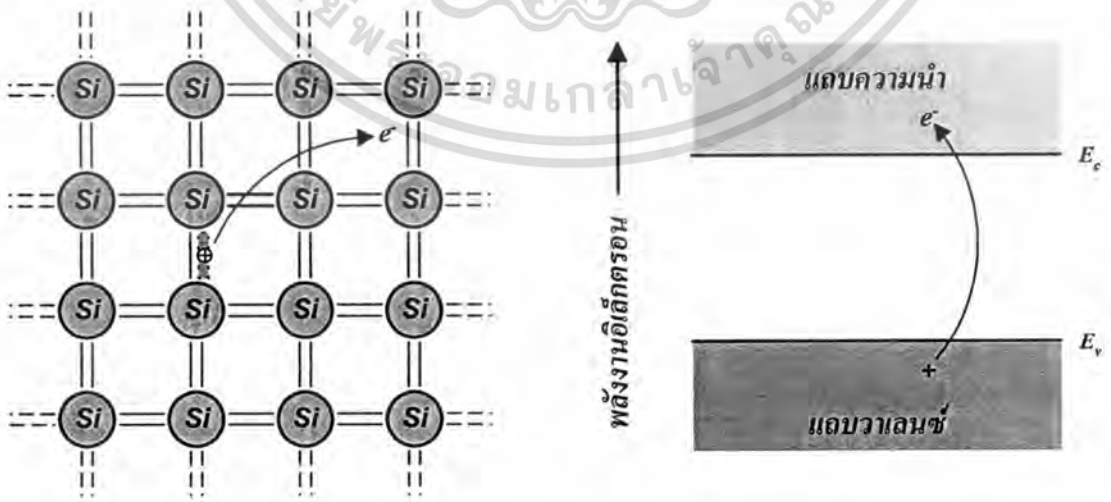
ผลึกซิลิกอนซึ่งไม่ได้ถูกเติมหรือเจือปนด้วยอะตอมของธาตุอื่น ที่ในบางครั้งนิยมเรียกว่าอะตอมสารเจือ (impurity atom) จะมีลักษณะแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะโครงสร้างพลังงานของผลึกซิลิกอนบริสุทธิ์

จากภาพเป็นลักษณะโครงสร้างพลังงานของซิลิกอนบริสุทธิ์ ที่ประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบความนำ และแถบพลังงานต้องห้าม โดยระดับพลังงานซึ่งแสดงเป็นเส้นตรงที่อยู่ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบความนำ คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิ โดยสำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิกอนบริสุทธิ์แล้ว ระดับพลังงานนี้จะถูกเรียกเป็นระดับพลังงานอินทรินซิค และเมื่อทำการพิจารณาแถบพลังงานของซิลิกอนบริสุทธิ์ การที่พันธะโควาเลนท์ถูกแตกออกเนื่องจากกระตุ้นด้วยพลังงานจากภายนอก นั่นก็คือการที่อิเล็กตรอนภายในแถบวาเลนท์ ได้รับพลังงานจากภายนอกเพิ่มขึ้นมากพอที่จะเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในระดับพลังงานในแถบความนำ และจะทำให้เกิดที่ว่าง (โฮล) ขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลภายในโครงสร้างแถบพลังงานของซิลิกอนบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสภาพนำไฟฟ้าของซิลิกอนบริสุทธิ์จะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับจำนวนของอิเล็กตรอนในแถบความนำและโฮลในแถบวาเลนซ์นี้ ซึ่งการเกิดประจุพาหะในซิลิกอนบริสุทธิ์จะเกิดได้เฉพาะในกรณีนี้เท่านั้น และจำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นในแถบความนำ จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนจำนวนของโฮลที่เกิดขึ้นในแถบวาเลนซ์ สามารถเขียนสมการได้เป็น

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

โดยที่ n = ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

p = ความหนาแน่นของโฮล

n_i = ความหนาแน่นอินทรินซิค

2.1.3.2 ซิลิกอนเจือปน (Extrinsic Silicon)

ซิลิกอนบริสุทธิ์หรือที่เรียกว่าอินทรินซิคซิลิกอนนั้น ตามความเป็นจริงแล้วจะถูกนำไปใช้งานเพื่อการสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้น้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากซิลิกอนบริสุทธิ์มีสภาพความนำไฟฟ้าต่ำและมีค่าจำกัด โดยค่าความนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงได้ก็เฉพาะในกรณีที่ได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอกเช่น ความร้อนหรือแสง เป็นต้น ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มสภาพความนำไฟฟ้าให้แก่ผลึกซิลิกอนจึงมีการเติมอะตอมของธาตุอื่นเข้าไปในผลึกด้วย ผลึกซิลิกอนที่ถูกเจือปนด้วยอะตอมของธาตุเจือปน (impurity atom) ถูกเรียกว่า ซิลิกอนเจือปน หรือ เอ็กทรินซิคซิลิกอน ทำให้ผลึกซิลิกอนดังกล่าวมีคุณสมบัติที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการนำไปใช้สร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ

สำหรับอะตอมของธาตุที่นำมาใช้เป็นสารเจือปน (impurity) เติมลงไปในผลึกซิลิกอนบริสุทธิ์นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. อะตอมธาตุเจือปนชนิดเอ็น (n-type impurity atom)

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

2. อะตอมธาตุเจือปนชนิดพี (p-type impurity atom)

ได้แก่อะตอมของธาตุในกลุ่มที่ 3 ของตารางธาตุ เช่น โบรอน อะลูมิเนียม อินเดียม เป็นต้น เมื่อเติมเข้าไปในผลึกซิลิกอนบริสุทธิ์แล้ว จะทำให้ได้ผลึกซิลิกอนชนิดพี สามารถนำไฟฟ้าได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกจำนวนมากมาย อะตอมสารเจือชนิดพีนี้จะถูกเรียกว่า อะตอมผู้รับ (acceptor atom)

ส่วนซิลิกอนเจือปนที่ได้หลังจากการเติมอะตอมสารเจือแล้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น (n-type silicon)

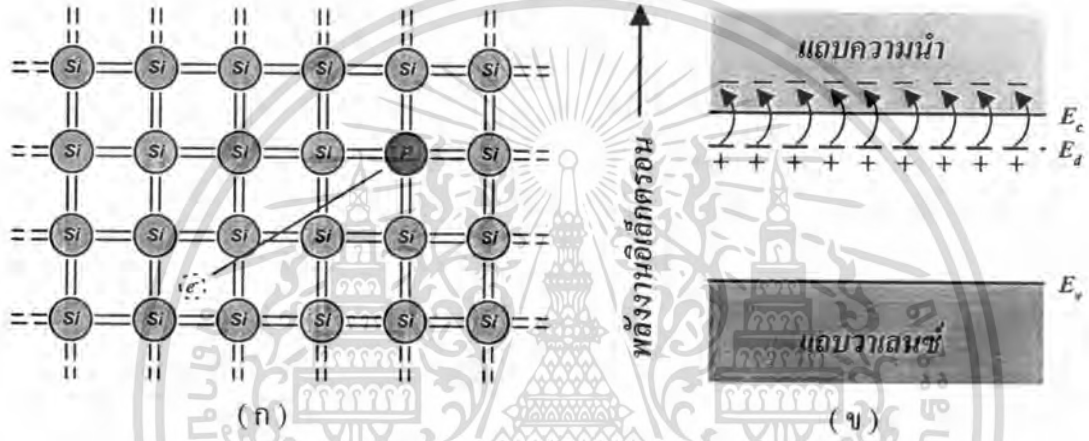
ได้แก่ผลึกซิลิกอนที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดเอ็น หรืออะตอมผู้ให้ เช่น อะตอมของฟอสฟอรัสซึ่งเป็นธาตุในกลุ่มที่ 5 ดังนั้นจึงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว เมื่ออะตอมถูกเติมเข้าไปในผลึกซิลิกอนก็จะไปเกาะเกี่ยวกับอะตอมข้างเคียงอีก 4 อะตอม ซึ่งอยู่รอบๆ เกิดเป็นพันธะโควาเลนท์ขึ้น 4 พันธะ ดังนั้นจึงเหลือวาเลนซ์อิเล็กตรอนอีก 1 ตัว ซึ่งไม่มีพันธะจับอยู่ อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้จะอยู่ในอิทธิพลของนิวเคลียสด้วยแรงยึดเหนี่ยวเพียงเล็กน้อยเกือบจะเป็นอิสระ ดังนั้นที่อุณหภูมิห้องปกติพลังงานจากความร้อนก็สามารถทำให้อิเล็กตรอนดังกล่าวได้รับพลังงานและหลุดออกมาเป็นอิสระได้ เคลื่อนที่ไปมาได้อย่างเสรีกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระอยู่ในแถบความนำ และสามารถนำไฟฟ้าได้ ในสภาพเช่นนี้อะตอมของฟอสฟอรัสซึ่งสูญเสียอิเล็กตรอนไปก็จะกลายสภาพเป็นไอออนบวก นอกจากนี้ปรากฏการณ์พันธะแตกเนื่องจากพลังงานความร้อนก็จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในพันธะโควาเลนท์หลุดออกมาเป็นอิสระได้เช่นกัน 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)

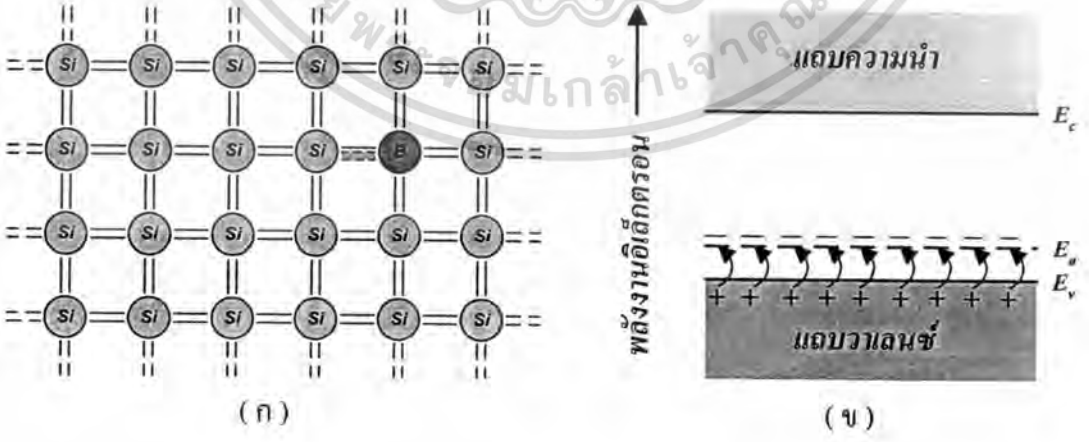
ได้แก่ผลึกซิลิกอนที่ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดพี หรือที่เรียกว่า อะตอมผู้รับ เช่น อะตอมของโบรอน ซึ่งเป็นธาตุในกลุ่มที่ 3 ดังนั้นจึงมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเพียง 3 ตัว เมื่ออะตอมสารเจือผู้รับถูกเติมเข้าไปในผลึกซิลิกอนก็จะไปเกาะเกี่ยวกับอะตอมของผลึกซิลิกอนที่อยู่ข้างเคียงอีก 4 อะตอม แต่อะตอมสารเจือชนิดนี้มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ดังนั้นจึงสามารถเกาะเกี่ยวและเกิดเป็นพันธะโควาเลนท์ได้เพียง 3 พันธะเท่านั้น ส่วนอีกหนึ่งพันธะไม่มีความสมบูรณ์เนื่องจากขาดอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในพันธะโควาเลนท์ใกล้ๆมีโอกาสที่จะเข้าไปอยู่ในที่ดังกล่าวเพื่อทำให้เป็นพันธะที่สมบูรณ์ เมื่ออิเล็กตรอนหลุดออกไปจากพันธะโควาเลนท์ก็จะทิ้งให้เกิดโฮลขึ้นมา ดังนั้นแต่ละอะตอมของสารเจือผู้รับจะทำให้เกิดโฮลขึ้นมา โฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกสามารถนำไฟฟ้าได้ และอะตอมของสารเจือชนิดนี้ เมื่อได้รับอิเล็กตรอนเพิ่มเข้ามาก็จะเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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

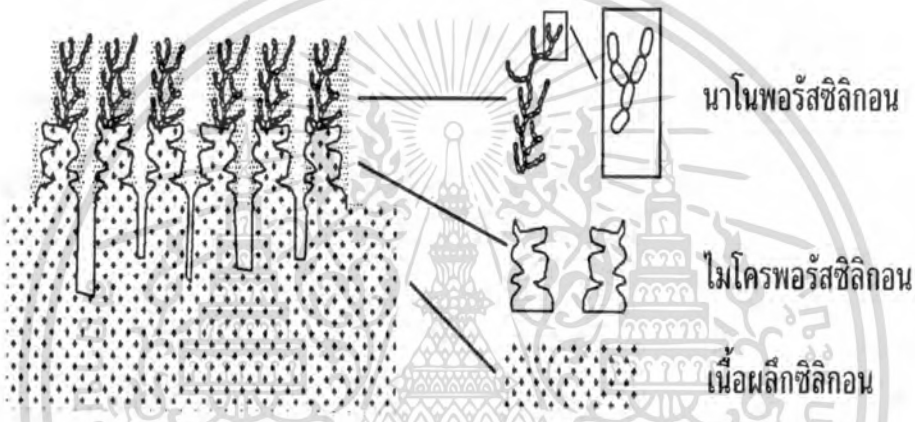
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.2 นาโนพอรัสซิลิกอน

2.2.1 โครงสร้างของนาโนพอรัสซิลิกอน

พอรัสซิลิกอนนั้นคือผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยในชั้นความพรุนนี้ จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของผลึกซิลิกอนเล็กๆที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร อยู่ถึง 2 ชั้นด้วยกันโดยในแต่ละชั้นจะมีขนาดของโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงภาพจำลองโครงสร้างของชั้นพอรัสซิลิกอน [6]

จากภาพจะเห็นได้ว่าชั้นของพอรัสซิลิกอนจะประกอบไปด้วย

1. **โครงสร้างของชั้นไมโครพอรัสซิลิกอน** เป็นชั้นของพอรัสซิลิกอนที่มีขนาดของโครงสร้างที่ใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร ขึ้นไป โดยโครงสร้างในชั้นนี้จะเป็นส่วนที่อยู่ติดกับเนื้อของผลึกซิลิกอน

2. **โครงสร้างของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอน** เป็นชั้นของพอรัสซิลิกอนที่มีขนาดของโครงสร้าง อยู่ในช่วงประมาณ 10 นาโนเมตร ลงไป

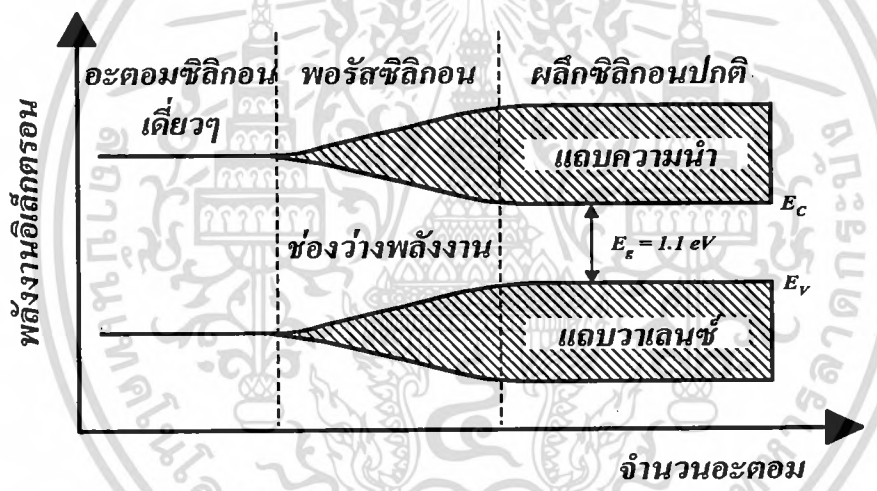
โครงสร้างของชั้นพอรัสซิลิกอนทั้งสองนี้ เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี (electrochemical etching) ซึ่งได้ทำการอธิบายเอาไว้ ในหัวข้อกลไกในการเกิดโครงสร้างของชั้นพอรัสซิลิกอน นอกจากนี้แล้วจากการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างของพอรัสซิลิกอนโดยเฉพาะในส่วนของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนยังพบต่อไปอีกว่า ที่บริเวณผิวของนาโนพอรัสซิลิกอนนั้นยังประกอบไปด้วยพันธะของ ซิลิกอนไฮไดด์ (Si : H) หรือ ซิลิกอนออกซิไฮไดด์ (Si : O : H) ปกคลุมอยู่ที่ผิวโดยทั่วไป [7 , 8 , 9] อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

69965

2.2.2 ลักษณะแถบพลังงานของนาโนพอรัสซิลิกอน

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว ในหัวข้อที่ 2.1.2 ถึงการเกิดแถบพลังงานของผลึกซิลิกอน เมื่ออะตอมของผลึกซิลิกอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จนเกิดการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงานภายในอะตอม ทำให้เกิดการแตกแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แตกแยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนของอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน ดังที่ได้แสดงมาแล้วในรูปที่ 2.6 จากหลักการนี้เองถ้าเราสามารถทำการลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ ก็จะทำให้ปฏิกริยาระหว่างอะตอมที่มีต่อกันนั้นมีจำนวนลดลงด้วย ซึ่งจะไปมีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนของช่องว่างพลังงาน (band gab energy) ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิลิกอนเดิม (ซึ่งมีจำนวนอะตอมซิลิกอนอยู่ภายในประมาณ 10^{22} อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ [10]

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

$$E_q = \Delta E_c + \Delta E_v \qquad (2.2)$$

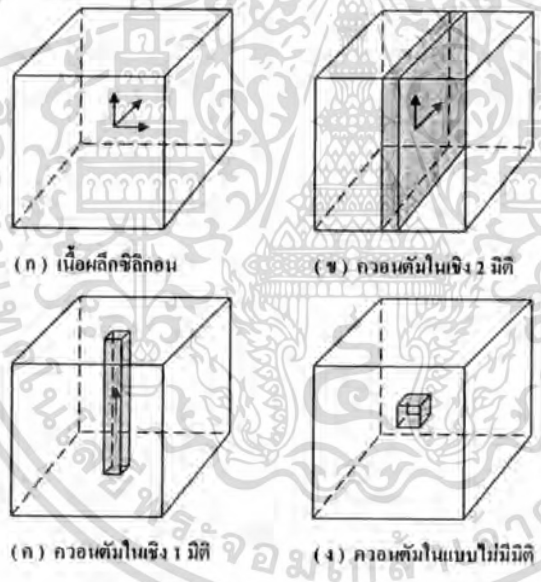
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ E_q เป็นพลังงานที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ quantum confinement effect

ΔE_c เป็นพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำเดิมของผลึกซิลิกอน

ΔE_v เป็นพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงลดลงจากระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์เดิมของผลึกซิลิกอน

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



รูปที่ 2.15 แสดงแบบจำลองลักษณะโครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆ 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 nm) พาหะนำ

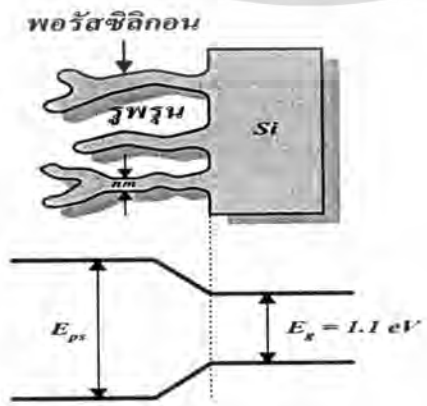
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสที่ถูกกักขังให้อยู่ภายในโครงสร้างลักษณะเช่นนี้ จะถูกบีบหรือจำกัดทิศทางในการเคลื่อนที่ โดยรวมให้สามารถเคลื่อนที่ไปมาในโครงสร้างแบบ 2 มิติ เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข)

2. ควอนตัมในเชิง 1 มิติ (quantum wire) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นเส้นหรือเสาแคบๆที่มีความหนาอยู่ในระดับของนาโนเมตร (< 10 nm) พาหะนำกระแสที่ถูกกักขังอยู่ภายในโครงสร้างลักษณะเช่นนี้ จะถูกจำกัดทิศทางในการเคลื่อนที่โดยรวมให้สามารถเคลื่อนที่ไปในโครงสร้างแบบ 1 มิติ หรือเพียงทิศทางเดียวตามความยาวของโครงสร้างที่เป็นเส้นหรือเสานี้เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ค) ซึ่งลักษณะช่องว่างพลังงานของโครงสร้าง 1 มิติแบบนี้ จะมีขนาดที่กว้างกว่าช่องว่างพลังงานของโครงสร้างแบบ 2 มิติ ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างในลักษณะแบบนี้จะมีขนาดที่เล็กกว่า และมีจำนวนอะตอมที่อยู่ภายในที่น้อยกว่าในโครงสร้างแบบ 2 มิติ นั่นเอง

3. ควอนตัมในแบบไม่มีมิติ (quantum dot) เกิดจากการลดขนาดหรือปลูกผลึกให้มีลักษณะเป็นจุดที่มีขนาดเล็กมากๆ (< 1 nm) โดยพาหะนำกระแสที่ถูกกักขังให้อยู่ภายในโครงสร้างลักษณะแบบนี้ ในทางอุดมคติแล้วจะถูกจำกัดทิศทางในการเคลื่อนที่อย่างสมบูรณ์ ให้อยู่ภายในโครงสร้างในแบบที่ไม่มีมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ง) อะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างจุดเล็กๆเหล่านี้จะมีจำนวนที่น้อยกว่าในโครงสร้างสองแบบแรก มีผลทำให้ขนาดช่องว่างพลังงานของโครงสร้างที่เป็นจุดนี้จะมีความกว้างที่มากกว่าในโครงสร้างสองแบบแรกด้วย

เมื่อย้อนกลับมาพิจารณาถึงโครงสร้างของชั้นพอรัสซิลิกอน เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเส้นหรือเสาแคบๆที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2.1 ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอรัสซิลิกอน จึงจัดอยู่ในประเภทควอนตัม 1 มิติ หรือ Quantum wire นั่นเอง โดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งความกว้างของช่องว่างพลังงาน (E_{PS}) มีค่าขึ้นอยู่กับขนาดโครงสร้างนาโนเมตรของพอรัสซิลิกอน



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะแถบพลังงานของพอรัสซิลิกอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เซลไฟฟ้าเคมี

การกัดกร่อนของสสารใดๆสามารถนิยามได้ว่าเป็นความเสื่อมโทรมของสสาร เนื่องจากการทำปฏิกริยากับสิ่งแวดล้อม ซึ่งโดยทั่วๆไปจะเป็นการเกิดจากปฏิกริยาไฟฟ้าเคมี และมักจะเริ่มจากผิวนอกของสารนั้นเสมอ โดยขบวนการทางไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกริยาทางเคมีที่มีการถ่ายเทของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นภายในระบบ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ปฏิกริยาอ็อกซิเดชั่น (oxidation reaction) เป็นปฏิกริยาที่อะตอมของสารมีการสูญเสียอิเล็กตรอนเกิดขึ้น ดังตัวอย่างเช่น สาร M มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ n คือมีอิเล็กตรอน n อนุภาคโคจรอยู่ในวงนอกสุดของอะตอม สามารถเกิดปฏิกริยาอ็อกซิเดชั่นได้ดังนี้คือ

$$M = M^{n+} + ne^- \qquad (2.3)$$

โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกริยาอ็อกซิเดชั่นเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แอโนด (anode) ดังนั้นปฏิกริยาอ็อกซิเดชั่นจึงอาจเรียกเป็นปฏิกริยาแอโนดิก (anodic reaction) ได้

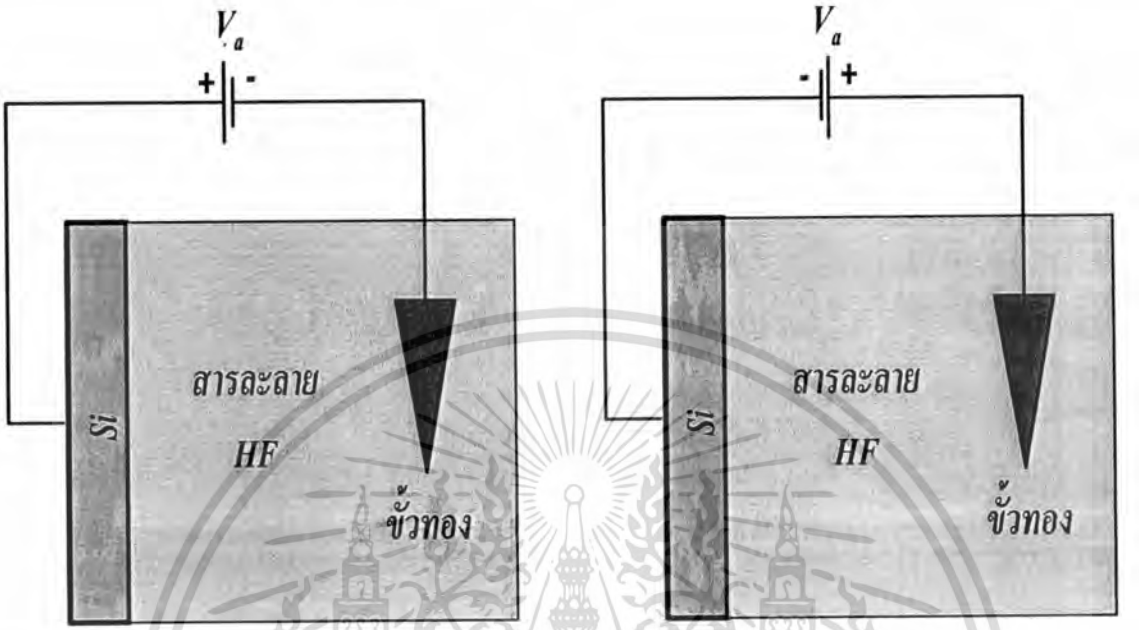
2. ปฏิกริยารีดักชั่น (reduction reaction) เป็นปฏิกริยาที่อิเล็กตรอนที่เกิดจากแต่ละอะตอมของสารชนิดหนึ่งถูกถ่ายเทและเข้ารวมเป็นส่วนหนึ่งของสารอีกชนิดหนึ่ง ดังตัวอย่างเช่น ไอออนของโลหะในสารละลาย ปฏิกริยารีดักชั่นสามารถเกิดขึ้นได้ดังนี้คือ

$$M^{n+} + e^- = M^{(n-1)+} \qquad (2.4)$$

โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกริยารีดักชั่นเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แคโทด (cathode) ดังนั้นปฏิกริยารีดักชั่นจึงอาจเรียกเป็นปฏิกริยาแคโทดิก (cathodic reaction) ได้

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปฏิกริยาทั้งระบบแล้ว ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะต้องประกอบด้วยปฏิกริยาอ็อกซิเดชั่นและปฏิกริยารีดักชั่นอย่างละหนึ่งปฏิกริยาเป็นอย่างน้อย ดังเช่นในระบบของเซลไฟฟ้าเคมีที่ประกอบด้วยสาร 2 ชนิด ที่ต่อกันในสารละลายอิเล็กโตรไลท์ โดยสารอันหนึ่งจะเป็นแอโนด หรือสารที่ถูกกัด ส่วนสารอีกชิ้นหนึ่งจะเป็นแคโทด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) anodic bias (ข) cathodic bias

รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะการไบอัสเซลไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่างๆ

พิจารณาเซลไฟฟ้าเคมีในรูปที่ 2.17 ทางด้านซ้ายจะเป็นขั้วไฟฟ้าของผลึกซิลิกอน (Si) ซึ่งจะถูกจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโตรไลท์ โดยในที่นี้ได้แก่สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ส่วนทางด้านขวาจะเป็นขั้วไฟฟ้าของทอง (Au) ซึ่งเป็นขั้วอิเล็กโตรดที่ถูกจุ่มอยู่ในสารละลายกรดเช่นกัน จากรูปจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลไฟฟ้าเคมีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกันคือ

1. การไบอัสเซลไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิก (anodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของผลึกซิลิกอนจะอยู่ทางขั้วบวก ส่วนขั้วไฟฟ้าของทองจะอยู่ทางขั้วลบ การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ผลึกซิลิกอนจะเป็นขั้วแอโนด มีผลทำให้ผลึกซิลิกอนสามารถถูกกัดได้

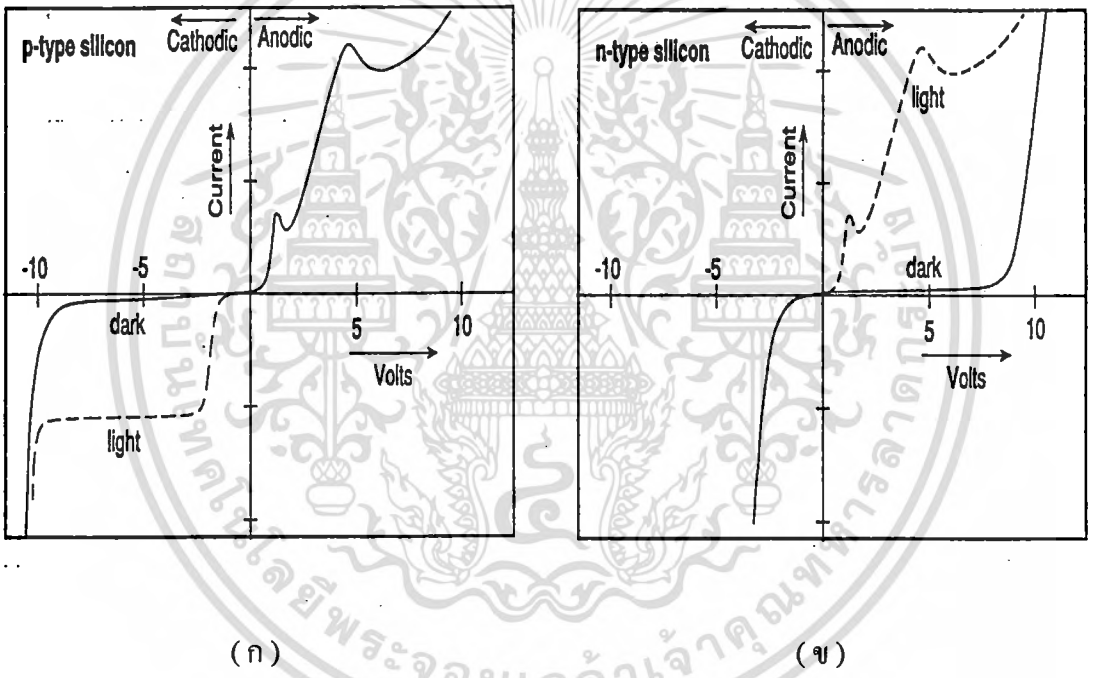
2. การไบอัสเซลไฟฟ้าเคมีแบบแคโทดิก (cathodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของผลึกซิลิกอนจะอยู่ทางขั้วลบ ส่วนขั้วไฟฟ้าของทองจะอยู่ทางขั้วบวก การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ผลึกซิลิกอนจะเป็นขั้วแคโทด ทำให้ไม่เกิดการกัดผลึกซิลิกอนขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลไฟฟ้าเคมี

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลไฟฟ้าเคมีที่ใช้สำหรับสร้างชั้นพอรัสซิลิกอนมีลักษณะและพฤติกรรมเป็นแบบชอตต์กีไดโอด (Schottky diode) ที่เกิดขึ้นจากการสัมผัส (interface) กันระหว่างวัสดุสองชนิด คือ ผลึกซิลิกอนกับสารละลายอิเล็กโตรไลท์ซึ่งในที่นี้ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลไฟฟ้าเคมี ระหว่างผลึกซิลิกอนชนิดพีและเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ที่ภายใต้เงื่อนไขในการถูกฉายแสงและไม่ถูกฉายแสง ว่ามีลักษณะความสัมพันธ์แตกต่างกันอย่างไร



(ก) (ข)

รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลไฟฟ้าเคมีระหว่างผลึกซิลิกอน (ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก [11]

จากรูปข้างต้นจะแสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลไฟฟ้าเคมี ระหว่างผลึกซิลิกอนชนิดพีและเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลไฟฟ้าเคมีอยู่สองลักษณะด้วยกัน คือ การไบอัสเซลไฟฟ้าแบบ anodic bias และแบบ cathodic bias สำหรับผลึกซิลิกอนชนิดพี การไบอัสเซลไฟฟ้าแบบ anodic bias ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้ จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการไบอัสแบบไปหน้า (forward bias) ส่วนการไบอัสเซลไฟฟ้าเคมีแบบ cathodic bias ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะเหมือนกับการไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบย้อนกลับ (reverse bias) โดยจะมีกระแสรั่วซึ่งเกิดขึ้นจากผลของพาหะส่วนน้อยภายในผลึกซิลิกอนชนิดพี และจากผลของการฉายแสง (photocurrents) เช่นเดียวกันกับไดโอดทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ก) ส่วนในผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับผลึกซิลิกอนชนิดพี โดยการไบอัสเซลไฟฟ้าแบบ anodic bias สำหรับผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) ส่วนการไบอัสเซลไฟฟ้าแบบ cathodic bias ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเดียวกันกับการไบอัสแบบไปหน้า (forward bias) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ข)

จากลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันไฟฟ้าทั้งสองแบบ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้ถูกทำการสรุปลักษณะที่สำคัญๆเอาไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1

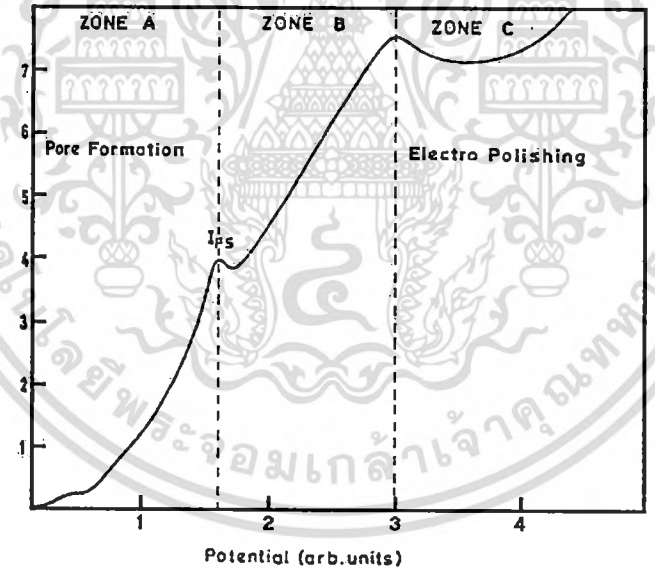
สรุปลักษณะสำคัญๆที่เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะการไบอัสเซลไฟฟ้าที่แตกต่างกัน [11]

ชนิดของผลึกซิลิกอน	ลักษณะการไบอัสเซลไฟฟ้าเคมี	
	แบบ Cathodic bias	แบบ Anodic bias
ชนิดพี	■ เนื้อของผลึกซิลิกอนจะไม่ถูกกัด ■ ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Reverse-biased Schottky	■ เนื้อของผลึกซิลิกอนถูกกัด โดย - จะเกิดโครงสร้างของพอรัสซิลิกอนที่ศักดาไฟฟ้าต่ำๆ - จะเกิดการขัดผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่ศักดาไฟฟ้ามีค่าสูงๆ ■ ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Forward-bias Schottky
ชนิดเอ็น	■ เนื้อของผลึกซิลิกอนจะไม่ถูกกัด ■ ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Forward-biased Schottky	■ เนื้อของผลึกซิลิกอนจะถูกกัดก็ต่อเมื่อทำการฉายแสง โดย - จะเกิดโครงสร้างของพอรัสซิลิกอนที่ศักดาไฟฟ้าต่ำๆ - จะเกิดการขัดผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่ศักดาไฟฟ้ามีค่าสูงๆ ■ ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Reverse-biased Schottky

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าการไบอัสเซลไฟฟ้าเคมีทั้งสองลักษณะมีพฤติกรรมเป็น rectifying เหมือนกัน โดยในการเกิดพอรัสซิลิกอนจะเกิดขึ้นเฉพาะเงื่อนไขในการไบอัสเซลไฟฟ้าเคมีแบบ anodic bias เท่านั้น ส่วนการไบอัสเซลไฟฟ้าแบบ cathodic bias จะไม่เกิดพอรัสซิลิกอนขึ้นไม่ว่าชนิดของผลึกซิลิกอนจะเป็นชนิดพีหรือชนิดเอ็นก็ตาม โดยในส่วนของผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น เนื่องจากการไบอัสเซลไฟฟ้าแบบ anodic bias นั้น เป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) ดังนั้นในระหว่างการ anodic bias จึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงลงบนผิวด้านหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นด้วย ทั้งนี้ก็เพื่อทำให้เกิดพาหะส่วนน้อย (โฮล) ขึ้นภายในผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น โดยโฮลจะเป็นตัวการที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในกลไกในการเกิดพอรัสซิลิกอน ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.4 ต่อไป

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



รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลไฟฟ้าเคมี
ในส่วนที่มีการไบอัสแบบ anodic bias [11]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูพรุนขนาดเล็กๆ ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดโครงสร้างของชั้นพอรัสซิลิกอนขึ้นมาก็ต่อเมื่อค่ากระแส (I) ภายในเซลไฟฟ้าเคมีจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าของกระแสสูงสุดที่ยอดกราฟแรก (Ips) ส่วนใน **บริเวณ B (Transition Regions)** ที่อยู่ถัดมาจะเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน จากลักษณะการกัดที่ทำให้เกิดโครงสร้างของชั้นพอรัสซิลิกอนไปสู่ลักษณะการกัดแบบขัดผิวหน้า ซึ่งอยู่ในบริเวณ **C (Electropolishing Regions)** โดยโครงสร้างของชั้นพอรัสซิลิกอนที่เกิดขึ้นในบริเวณ B นี้จะมีลักษณะเป็นรูพรุนเช่นเดียวกันกับพอรัสซิลิกอนที่เกิดขึ้นในบริเวณแรก แต่จะมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนที่ใหญ่กว่าและสามารถเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อความต่างศักย์ของเซลไฟฟ้าเคมีมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนเข้าสู่การกัดในลักษณะแบบขัดผิวหน้า (Electropolishing) ณ. ตำแหน่งที่ค่าของกระแสมีค่าสูงสุดที่ยอดกราฟที่สอง และเมื่อพิจารณาจากยอดกราฟทั้งสองจุดในรูปจะสังเกตุเห็นได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มค่าความต่างศักย์ของเซลไฟฟ้าเคมีให้มีค่ามากขึ้นจนกระแสภายในเซลไฟฟ้ามีค่าสูงสุดแล้ว หลังจากนั้นกระแสก็จะเริ่มมีค่าลดลงทั้งนี้ก็เนื่องมาจากเกิดปรากฏการณ์ Negative Impedance ขึ้น โดย

<u>ในส่วนของยอดกราฟแรก</u>

สำหรับผลึกซิลิกอนชนิดพี จะเป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์ Quantum Size Effect ขึ้นภายในโครงสร้างของพอรัสซิลิกอน มีผลทำให้ช่องว่างพลังงานภายในมีความกว้างมากขึ้นกว่าเดิมได้ จนกระทั่งทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างส่วนนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในของชั้นพอรัสซิลิกอนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งนำไปสู่การที่กระแสมีค่าลดลง

สำหรับผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น จะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นรอบๆโครงสร้างของพอรัสซิลิกอน และเมื่อโครงสร้างของพอรัสซิลิกอนมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆจนบริเวณปลอดพาหะนำกระแส สามารถครอบคลุมโครงสร้างของพอรัสซิลิกอนได้ทั้งหมด มีผลทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในชั้นพอรัสซิลิกอนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยกลไกทั้งหมดนี้จะทำการกล่าวถึงอย่างละเอียดในหัวข้อ 2.4.3 ต่อไป

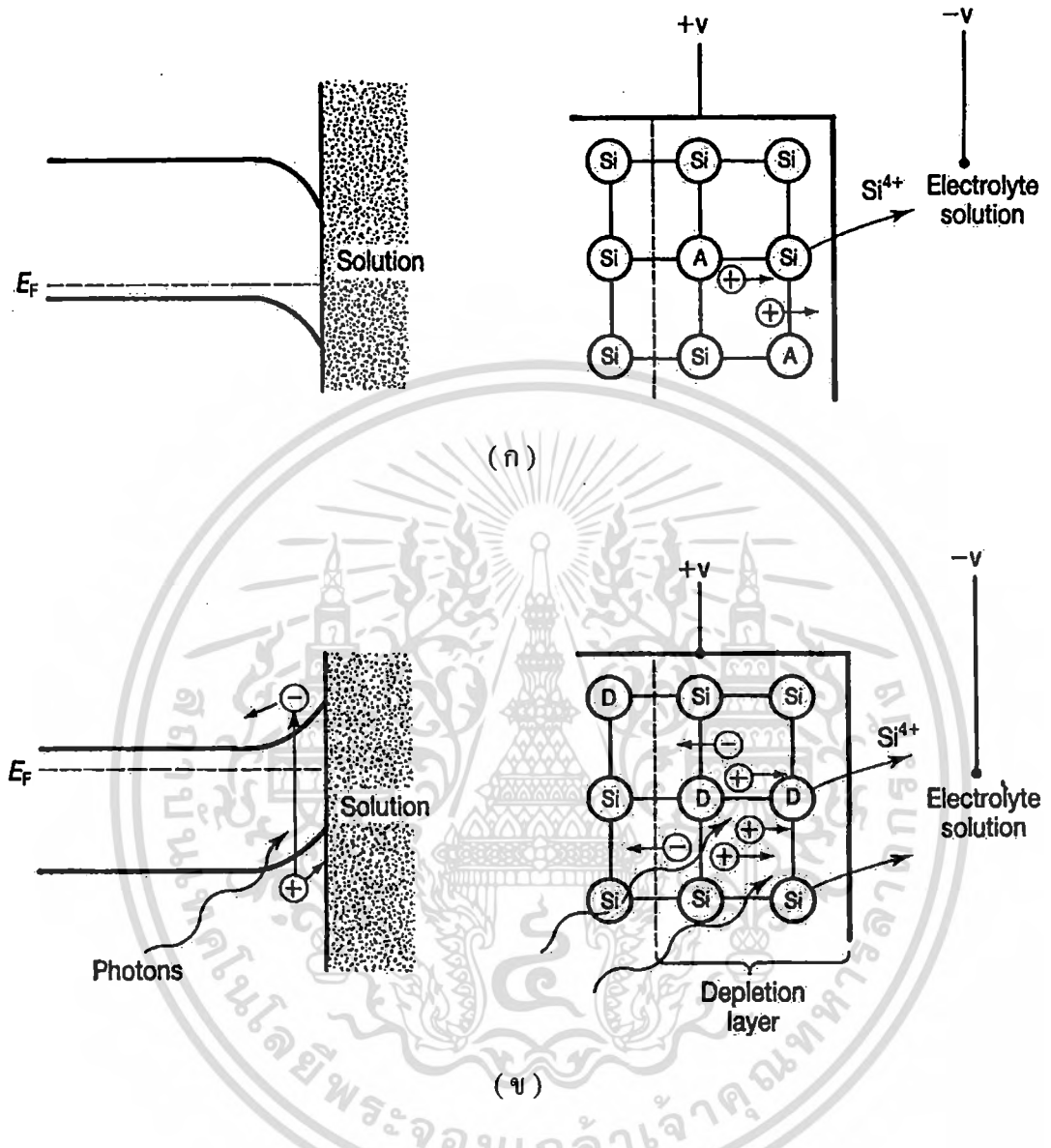
<u>ส่วนในยอดกราฟที่สอง</u>

ซึ่งอยู่ระหว่างบริเวณ transition region กับ electropolishing region การที่กระแสมีค่าลดลงเป็นผลมาจากการเกิดอ็อกไซด์ขึ้นที่บริเวณผิวของพอรัสซิลิกอนในระหว่างกระบวนการกัดนั่นเอง

2.3.2 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอน (ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก [12]

จากรูปภาพข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีการโค้งงอของแถบพลังงานเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดย

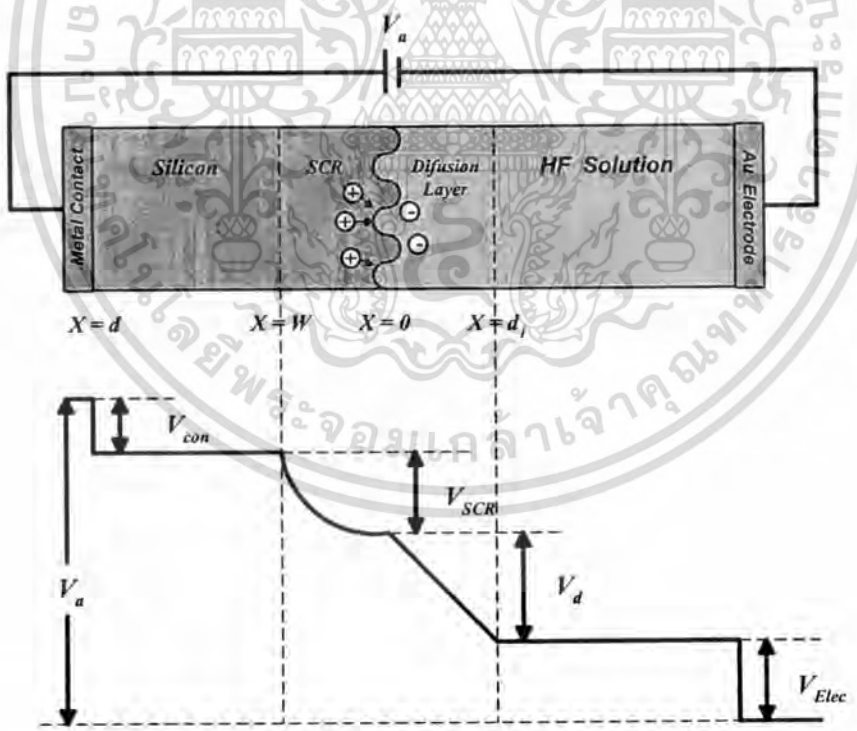
ในผลึกซิลิกอนชนิดพี การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ.บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอลง ซึ่งภายใต้การไบอัสเซลไฟฟ้าแบบ anodic bias กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านผิวสัมผัสได้ เนื่องจากเป็นการไบอัสแบบไปหน้า ทำให้เกิดกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนอย่างต่อเนื่องขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.3.3 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลไฟฟ้าเคมี [13]

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า เซลไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดแบบ porous etching จะประกอบด้วยผลึกซิลิกอน ซึ่งถูกจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยมีการไบอัสเซลไฟฟ้าเคมีในลักษณะ anodic bias ซึ่งมีผลทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสต่างๆภายในเซลไฟฟ้าเคมีจะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อม และมีการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลไฟฟ้าเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่างๆภายในเซลไฟฟ้าเคมี โดยที่ d เป็นความหนาของผลึกซิลิกอน , W เป็นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (SCR) ส่วน d_i เป็นความกว้างของบริเวณ diffusion layer ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพจะเห็นได้ว่ามีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณต่างๆภายในเซลไฟฟ้าเคมี ดังนี้คือ

■ ในเนื้อของผลึกซิลิกอน จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

1. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับผลึกซิลิกอน (V_{con})
2. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (V_{SCR})

■ ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

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

ถ้าให้ V_a เป็นศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เซลไฟฟ้าเคมี เราสามารถเขียนสมการศักดาไฟฟ้ารวมของระบบได้ดังนี้คือ

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

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

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

จากสมการที่ (2.6) จะเห็นได้ว่าศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ diffusion layer (V_d) กับศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ Space-charge region (V_{SCR}) จะเป็นตัวแปรที่สำคัญภายในเซลไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมพาหะและปฏิกริยาที่เกิดขึ้น โดย

ในผลึกซิลิกอนชนิดพี เนื่องจากเป็นการไบอัสแบบไปหน้า (forward bias) ทำให้ไม่เกิดบริเวณ Space-charge region ขึ้นในผลึกซิลิกอน ดังนั้นศักดาไฟฟ้าหลักที่ตกคร่อมอยู่ภายในเซลไฟฟ้าเคมีก็คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ diffusion layer (V_d) นั่นเอง โดย V_d นี้จะควบคุมอิออนลบของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกตรงบริเวณ diffusion layer

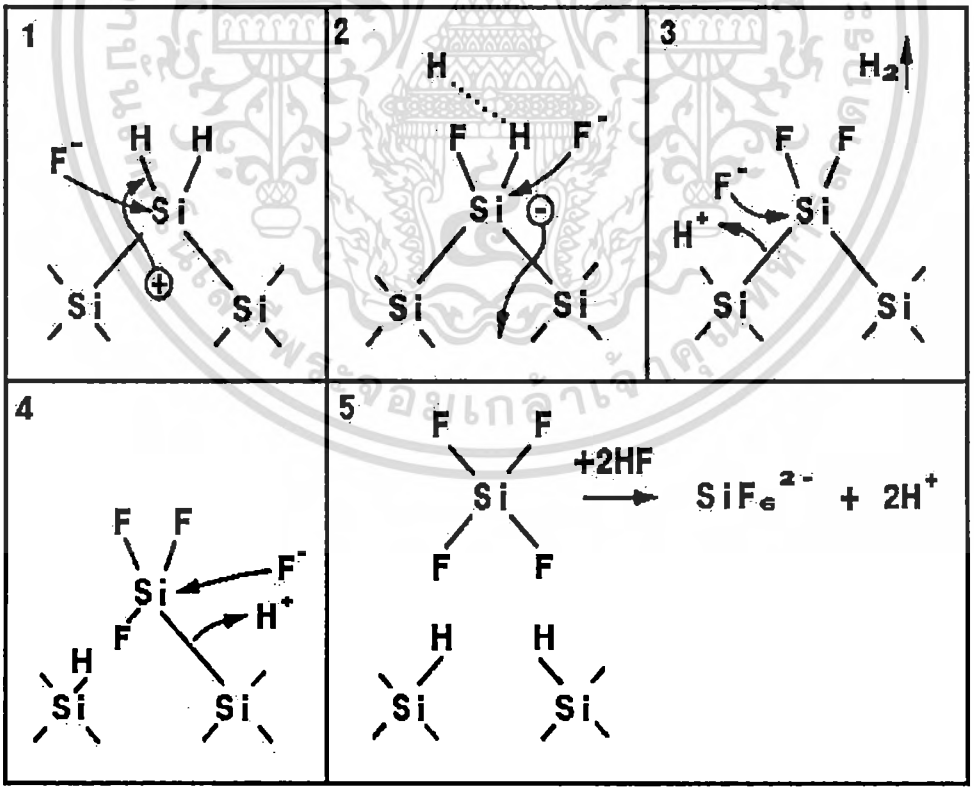
ในผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น เนื่องจากเป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) ทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นเกิดบริเวณ Space-charge region (SCR) ขึ้น และเกิดศักดาไฟฟ้า (V_{SCR}) ตกคร่มบริเวณนี้ โดย Space-charge region นี้จะเป็นตัวควบคุมพาหะนำกระแสภายในผลึกซิลิกอน ซึ่งจะมีผลต่อปฏิกริยาเคมีในการกัดและโครงสร้างของพอรัสซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 กลไกในการเกิดนาโนพอรัสซิลิกอน

2.4.1 ปฏิกริยาเคมีในการกัดที่ผิวของผลึกซิลิกอน

เพื่อที่จะเข้าใจถึงกลไกในการเกิดพอรัสซิลิกอน ก่อนอื่นจำเป็นที่จะต้องทราบถึงปฏิกริยาเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน ที่อยู่ภายใต้การไบอัสแบบ anodic bias ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าในสภาวะปกติเมื่อทำการจุ่มผลึกซิลิกอนลงไปในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกผิวหน้าของผลึกซิลิกอนจะไม่ถูกสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกกัด แต่อย่างไร แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ผลึกซิลิกอนถูกนำมาอยู่ในเซลไฟฟ้าเคมีที่มีการไบอัสแบบ anodic bias แล้ว ผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆเกิดเป็นชั้นของพอรัสซิลิกอนขึ้นมา โดยปฏิกริยาเคมีและขั้นตอนในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปข้างต้นแสดงให้เห็นถึงกลไกในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอน ที่ทำให้เกิดชั้นของพอรัสซิลิกอนขึ้นมา **เริ่มต้น**จากขั้นตอนแรกเมื่อยังไม่มีการไบอัสแบบ anodic bias ซึ่งเป็นกระบวนการในการป้อนศักดาไฟฟ้าขั้วบวกให้กับขั้วอาโนด (Si) ที่บริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิกอนจะมีอะตอมของไฮโดรเจนปกคลุมอยู่เต็ม มีผลทำให้อิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไม่สามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอมได้ (Si - H) แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่มีการไบอัสเซลไฟฟ้าเคมีแบบ anodic bias โดยมีการป้อนศักดาไฟฟ้าขั้วบวกให้แก่ขั้วอาโนด (Si) จนพาหะโฮลสามารถเคลื่อนที่มาถึงบริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่ผิวสามารถถูกทำลายได้โดยอิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรด เกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับฟลูออรีน (Si - F) ขึ้นมาแทนดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 1 และเนื่องจากอิทธิพลในการ polarizing ของพันธะฟลูออรีนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรก ส่งผลทำอิออนของฟลูออรีน (F^-) อีกตัวที่อยู่ในสารละลายกรดสามารถที่จะเข้าทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอม (Si - H) ที่ยังคงเหลืออยู่อีกข้างหนึ่งได้ พร้อมกับเกิดโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และมีการปล่อยพาหะอิเล็กตรอน 1 ตัวไปยังขั้วอาโนด ดังแสดงในขั้นตอนที่ 2 และ 3 ต่อจากนั้นก็จะเกิดการเหนี่ยวนำวาเลนท์อิเล็กตรอน (polarization induced) โดยกลุ่มของพันธะเคมีซิลิกอนกับฟลูออรีน (Si - F groups) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 และ 3 มีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับซิลิกอนที่อยู่ถัดเข้ามามีความแข็งแรงลดลง ทำให้พันธะเคมีดังกล่าวสามารถที่จะถูกทำลายได้โดยอิออนของฟลูออรีน เกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิกอนกับฟลูออรีนขึ้นมาแทน ดังแสดงในขั้นตอนที่ 3 และ 4 จากขั้นตอนนี้เองจะเห็นได้ว่าอะตอมของซิลิกอนจะถูกดึงให้หลุดออกมาจากผิวหน้าของผลึกซิลิกอน พร้อมกับการเกิดพันธะเคมีระหว่างไฮโดรเจนกับซิลิกอนอะตอมที่อยู่ถัดเข้ามา ดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 5

ส่วนปฏิกริยาเคมีในการกัดที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้คือ [14]

$$Si + 2HF + h^+ \longrightarrow SiF_2 + 2H^+ + e^- \qquad (2.7)$$

$$SiF_2 + 2HF \longrightarrow SiF_4 + H_2(g) \qquad (2.8)$$

$$SiF_4 + 2HF \longrightarrow H_2SiF_6(aq) \qquad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.8) และ (2.9) สามารถเขียนสมการปฏิกริยาเคมีรวม ใหม่ได้เป็น

$$SiF_2 + 4HF \longrightarrow H_2SiF_6(aq) + H_2(g) \qquad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการปฏิกริยาเคมีที่แสดงข้างต้น เริ่มต้นจากปฏิกริยาเคมีในสมการที่ (2.7) ที่มีผลึกซิลิกอน (Si) เป็นสารเริ่มต้น อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดยในปฏิกริยาเคมีนี้จำเป็นที่จะต้องอาศัยโฮลในการเกิดปฏิกริยาเคมี ซึ่งจะทำให้เกิด SiF_2 ขึ้นที่บริเวณผิวของผลึกซิลิกอน ต่อจากนั้นก็จะเกิดปฏิกริยาเคมีระหว่าง SiF_2 กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ดังแสดงในสมการที่ (2.8) ได้ผลลัพธ์เป็น SiF_4 หลุดออกมาจากผิวของผลึกซิลิกอน ในระหว่างกระบวนการกัดขั้นตอนนี้เอง สังเกตุได้ว่าจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ขึ้นที่ผิวหน้าของผลึกซิลิกอนที่ถูกกัด ท้ายสุดก็จะเกิดปฏิกริยาเคมีระหว่าง SiF_4 กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะได้ผลลัพธ์สุดท้ายก็คือสารละลาย H_2SiF_6 อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกนั่นเอง ดังแสดงในสมการที่ (2.9)

2.4.2 การเกิดรูพรุนของนาโนพอรัสซิลิกอน

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ผลึกซิลิกอนเมื่ออยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) จะไม่ถูกสารละลายกรดกัดแต่อย่างไร แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ทำการป้อนกระแสไฟฟ้าในลักษณะแบบ anodic bias แก่เซลไฟฟ้าเคมี ให้กระแสไหลผ่านรอยสัมผัสระหว่างผลึกซิลิกอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะมีผลทำให้เกิดปฏิกริยาการกัดทางไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้น โดยลักษณะการกัดทางไฟฟ้าเคมีจะมีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกันคือ

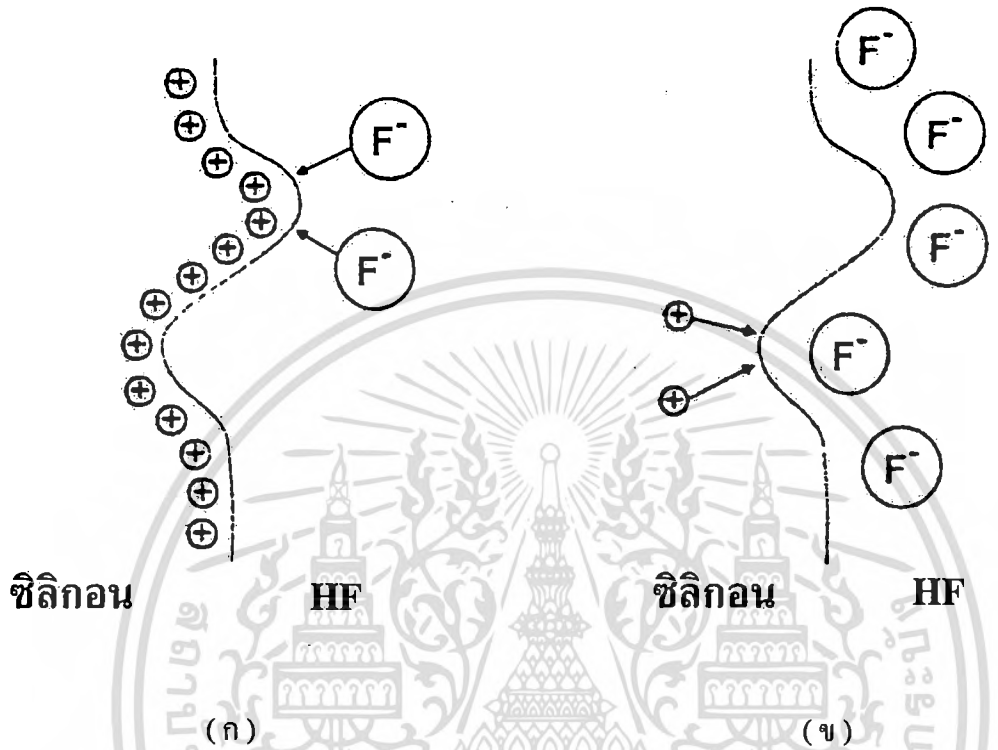
- **แบบ electropolishing**
- **แบบ porous etching**

ทั้งสองแบบมีลักษณะการกัดที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในระหว่างการ anodization โดยประจุพาหะชนิดบวก (โฮล) จะเป็นตัวที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อกระบวนการการกัดทั้งสองลักษณะ กล่าวคือ

2.4.2.1 การกัดแบบ electropolishing

การกัดในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำการป้อนความหนาแน่นกระแสให้แก่เซลไฟฟ้าเคมีในปริมาณสูงๆ ($J > J_{ps}$) ซึ่งจะทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิกอนมีปริมาณของพาหะโฮลสะสมอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้การกัดที่เกิดขึ้นจะถูกจำกัดโดยอิออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรด โดยอิออนฟลูออรีนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า ดังนั้นถ้าผิวของผลึกซิลิกอนมีส่วนที่ยื่นออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.23 (ก) จะมีผลทำให้ที่บริเวณปลายสุดของส่วนที่ยื่นออกมามีปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะดึงเอาอิออนของฟลูออรีนเข้ามาทำปฏิกริยาเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนที่บริเวณปลายสุดที่ยื่นออกมาเป็นส่วนมาก มีผลทำให้ส่วนที่ยื่นออกมาถูกกัดจนเรียบ ดังนั้นจึงเรียกการกัดในลักษณะเช่นนี้ว่า การขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า (electropolishing) นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

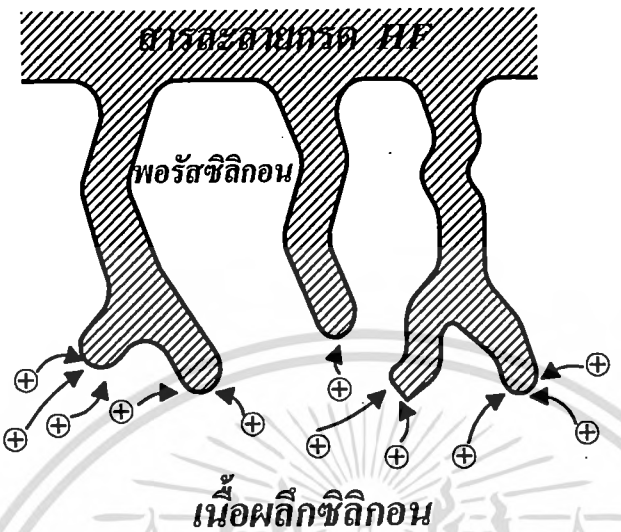


รูปที่ 2.23 แสดงแบบจำลองการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนทั้งสองลักษณะ โดยที่ [14]
(ก) ลักษณะการกัดแบบ electropolishing
(ข) ลักษณะการกัดแบบ porous etching

2.4.2.2 การกัดแบบ porous etching

ส่วนลักษณะการกัดแบบ porous etching จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำการป้อนความหนาแน่นกระแสในปริมาณต่ำๆ ($J < J_{ps}$) ซึ่งจะทำให้ปริมาณอิออนของฟลูออรีนในสารละลายกรดมีจำนวนที่มากกว่าจำนวนโฮล ที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิกอน ทำให้การกัดในลักษณะนี้จะถูกจำกัดโดยจำนวนโฮล ดังนั้นถ้าผิวของผลึกซิลิกอนมีลักษณะเป็นหลุมหรือรอยซึ่งเกิดจากความไม่เรียบของพื้นผิวหรือจุดบกพร่องต่างๆในผลึกซิลิกอน ดังแสดงในรูปที่ 2.23 (ข) เมื่อทำการไบอัสแบบ anodic bias ให้แก่เซลไฟฟ้าเคมีจะมีผลทำให้ที่บริเวณก้นหลุมหรือจุดบกพร่องเหล่านี้ มีปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงกว่าที่บริเวณอื่นๆซึ่งจะดึงเอาพาหะโฮลเข้ามายังจุดๆนี้กันมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ทำให้เกิดปฏิกริยาเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนที่บริเวณก้นหลุมจนเกิดเป็นรูพรุนลึกลงไปในเนื้อของผลึกซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



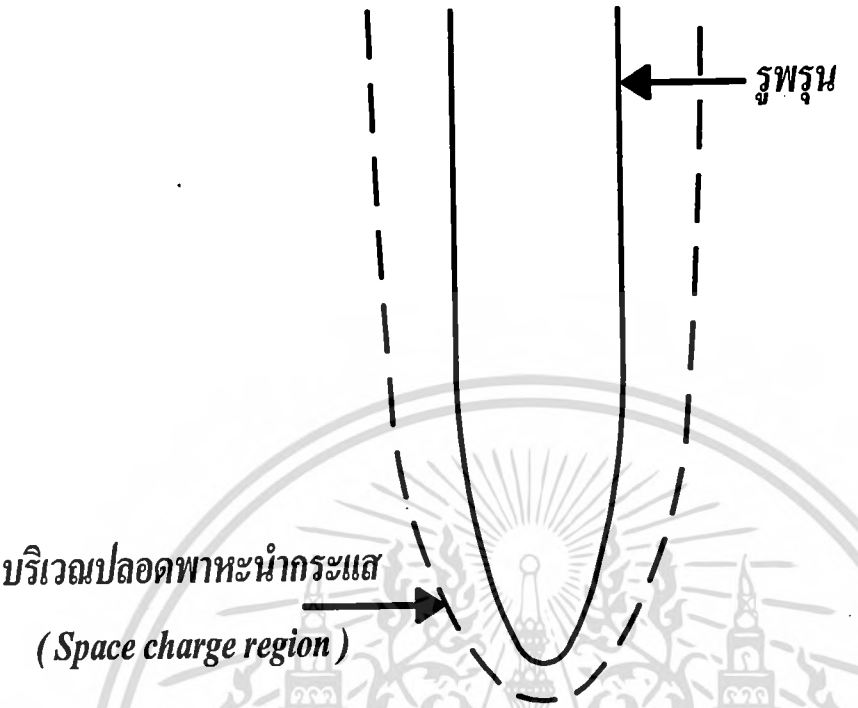
รูปที่ 2.24 แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลที่ถูกดึงมารวมกันที่บริเวณก้นหลุม เนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นกลไกในการเกิดรูพรุนภายในผลึกซิลิกอนทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นอย่างง่ายๆ ซึ่งถ้าจะพิจารณาโดยละเอียดแล้วพบว่าผลึกซิลิกอนทั้งสองชนิดจะมีกลไกในการเกิดโครงสร้างของพอรัสซิลิกอนที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากการไบอัสเซลไฟฟ้าเคมีในลักษณะ anodic bias

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 แสดงบริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นรอบๆผนังของรูหรือหลุม ที่บริเวณผิวของผลึกซิลิกอน [14]

โดยความกว้างของบริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ [14]

$$W = (2\varepsilon_s\varepsilon_0 V_{SCR} / qN_D) \quad (2.11)$$

โดยที่ W = ความกว้างของบริเวณ Space Charge Region

ε_s = Permittivity ของผลึกซิลิกอน

ε_0 = Permittivity ของสูญญากาศ

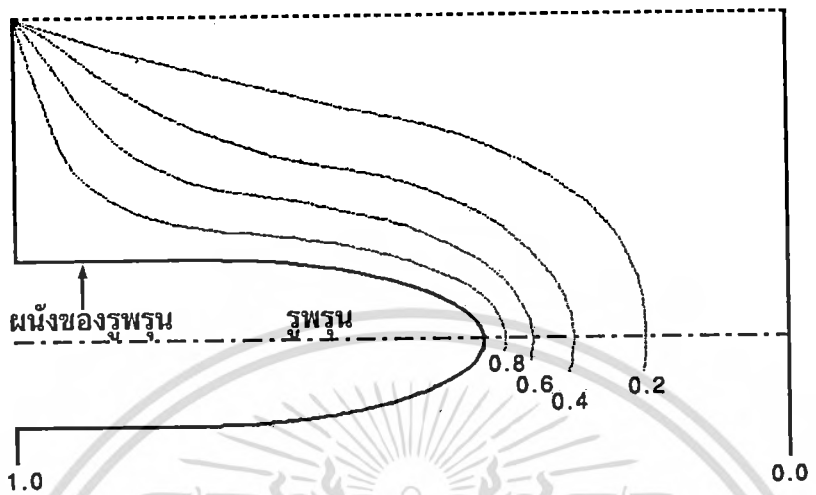
V_{SCR} = ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบริเวณ SCR

q = ประจุของอิเล็กตรอน

N_D = จำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้

จากสมการที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าความกว้างของบริเวณ Space Charge Region จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบริเวณ Space Charge Region (V_{SCR}) และจำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้ (N_D) ในผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น

เอกสารนี้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 แสดงการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน [14]

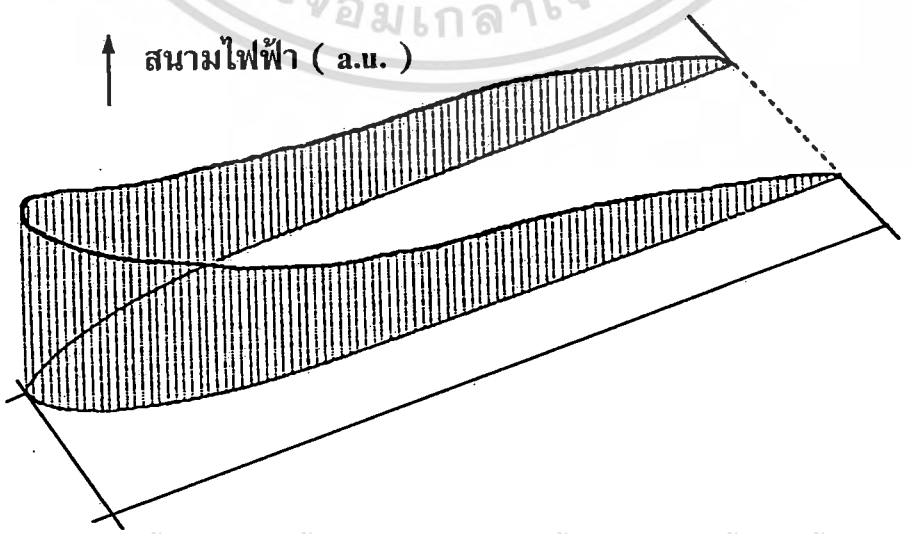
ซึ่งบริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นรอบๆรูพรุน จะมีการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าเป็นไปตามรูปที่ 2.26 โดยมีปริมาณของสนามไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน (E_S) มีค่าเท่ากับ

$$E_S = 2V_{SCR} / W \qquad (2.12)$$

ส่วนสนามไฟฟ้าที่เกิดรอบๆก้นหลุมของรูพรุน (E'_S) จะมีค่า

$$E'_S = V_{SCR} / r \qquad (2.13)$$

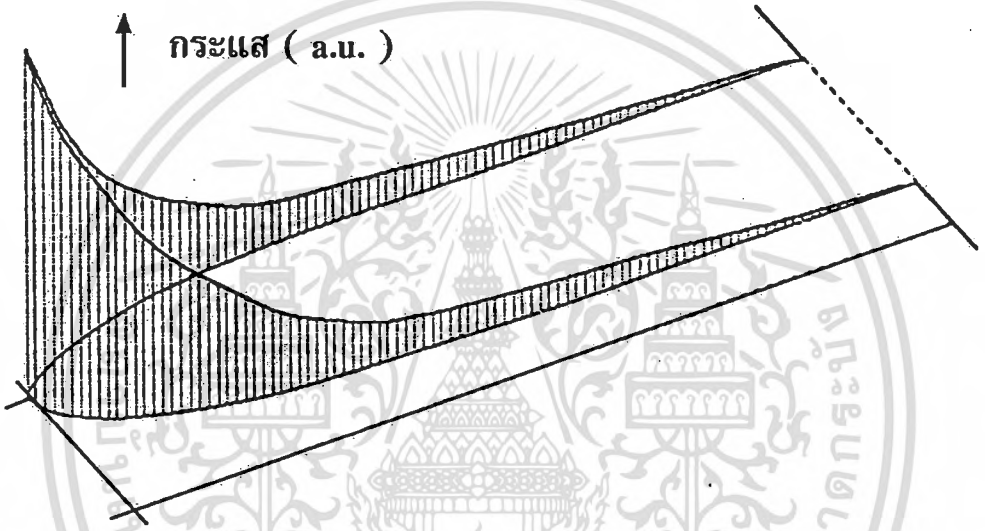
โดยที่ r = รัศมีของก้นหลุมของรูพรุน



รูปที่ 2.27 แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบๆผนังของรูพรุน [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 2.28 แสดงการกระจายตัวของกระแสรอบๆผนังของรูพรุน [14]

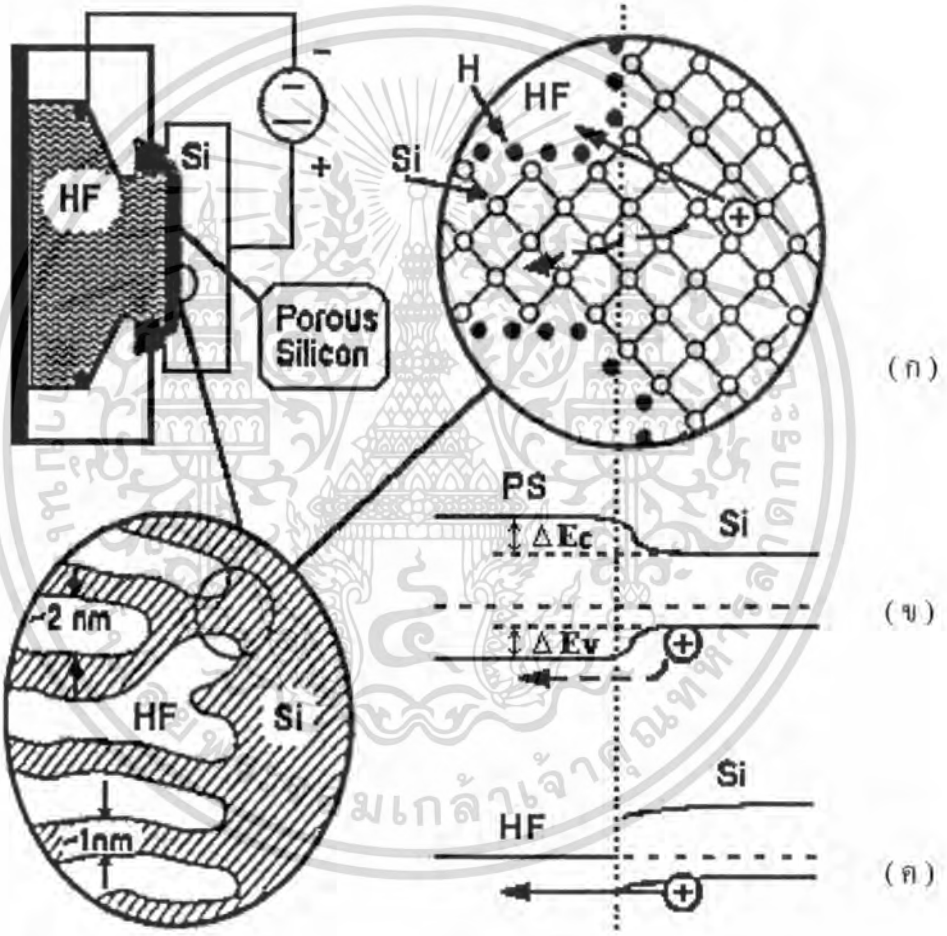
2.4.3 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของนาโนพอรัสซิลิกอน

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้เราทราบถึงกลไกในการเกิดโครงสร้างของพอรัสซิลิกอนขึ้นมา โดยพาหะนำกระแสชนิดบวกหรือโฮลในผลึกซิลิกอนจะเป็นตัวการที่มีบทบาทและความสำคัญต่อกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนในแบบ porous etching หรือ anodic etching ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งเป็นกระบวนการกัดที่สามารถลดขนาดโครงสร้างของพอรัสซิลิกอนให้มีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆจนสามารถเข้าสู่ในระดับนาโนเมตรได้ ด้วยกระบวนการที่เรียกว่า self aliged process ซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถทำให้โครงสร้างของพอรัสซิลิกอนมีขนาดตั้งแต่ในระดับไมโครเมตรจนไปถึงโครงสร้างในระดับ 2-3 นาโนเมตรได้ โดยไม่จำเป็นต้องอาศัย masking layer หรือ วิธีการทาง nanolithography แต่อย่างไร แต่กระบวนการนี้จะอาศัยกลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของพอรัสซิลิกอน โดยในหัวข้อนี้พิจารณาถึงกลไกในการหยุดกัดที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่าพอรัสซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิกอนชนิดพีและชนิดเอ็นจะมีกลไกในการหยุดกัดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอรัสซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิกอนชนิดพี

สำหรับผลึกซิลิกอนชนิดพี การไบอัสเซลไฟฟ้าเคมีในลักษณะ anodic bias จะทำให้บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิกอนชนิดพีไม่เกิดบริเวณ space charge region ขึ้น ทำให้สามารถทำการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนได้อย่างต่อเนื่อง โดยกลไกในการหยุดกัดสำหรับผลึกซิลิกอนชนิดพีจะเกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเกิดปรากฏการณ์ quantum size effect ขึ้นในส่วนของนาโนพอรัสซิลิกอน ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 แสดงกลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของชั้นพอรัสซิลิกอนชนิดพี โดยที่ [14]

(ก) แสดงโครงสร้างของพอรัสซิลิกอนและทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะโฮล

(ข) แสดงลักษณะแถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลจากผลึกซิลิกอนผ่านเข้าไปในโครงสร้างของพอรัสซิลิกอน

(ค) แสดงลักษณะแถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลจากผลึกซิลิกอนผ่านไปยังสารละลายกรด HF ที่บริเวณผิวสัมผัสที่ก้นหลุมของรูพรุน

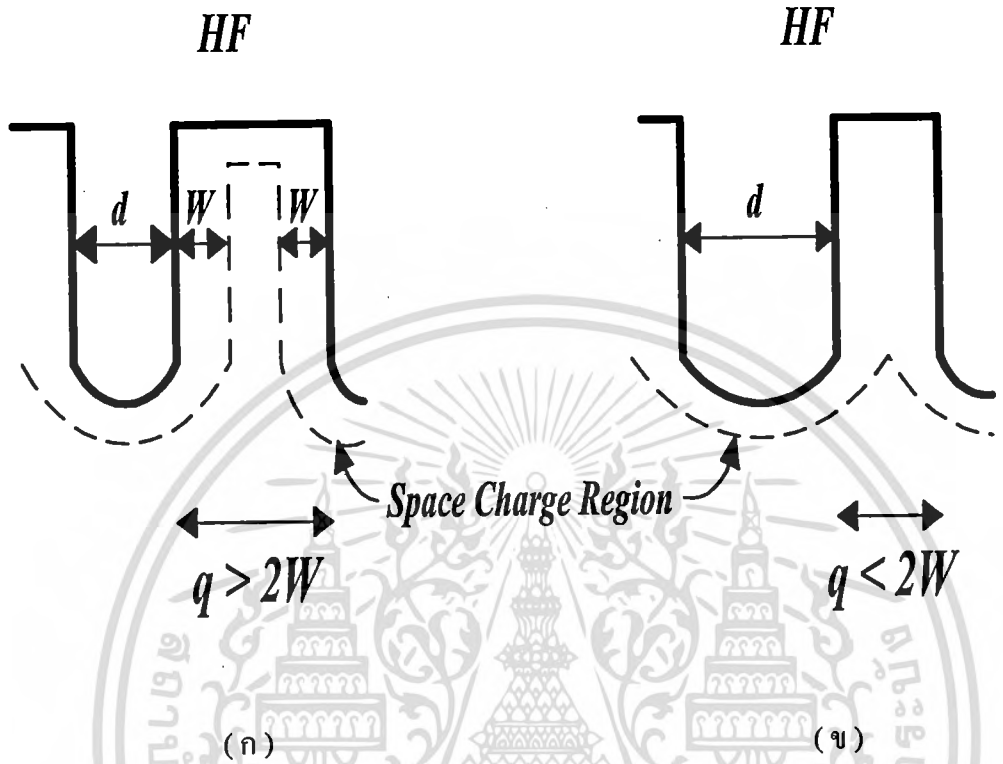
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นได้ว่า เนื้อของผลึกซิลิกอนชนิดพีจะถูกกัดจนเกิดเป็นโครงสร้างของพอรัสซิลิกอนขึ้นมา และเมื่อทำการกัดอย่างต่อเนื่องจะทำให้โครงสร้างของพอรัสซิลิกอนมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆจนมีขนาดเข้าสู่ในระดับนาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.29 (ก) มีผลทำให้ช่องว่างพลังงานภายในพอรัสซิลิกอน (E_{ps}) มีความกว้างมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอนเดิม ทั้งนี้เป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์ quantum size effect นั่นเอง ทำให้เกิดความแตกต่างของระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนท์ระหว่างพอรัสซิลิกอนกับผลึกซิลิกอนขึ้น โดยค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นกำแพงศักย์ซึ่งมีค่าเท่ากับ ΔE_v สำหรับโฮล และเท่ากับ ΔE_c สำหรับอิเล็กตรอน ดังนั้นการที่พาหะโฮลในผลึกซิลิกอนชนิดพีจะสามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอรัสซิลิกอน เพื่อทำให้เกิดปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีในการกัดโครงสร้างในส่วนนี้ต่อไปได้นั้น พาหะโฮลจำเป็นที่จะต้องได้รับพลังงานที่มีค่ามากกว่า ΔE_v ดังแสดงในรูปที่ 2.29 (ข) แต่ถ้าเมื่อไหร่ก็ตามที่กำแพงศักย์ ΔE_v มีค่ามากกว่าพลังงานภายนอกที่ให้กับโฮล จะมีผลทำให้พาหะโฮลในผลึกซิลิกอนไม่สามารถผ่านเข้าไปในส่วนของนาโนพอรัสซิลิกอนได้ ผลที่ตามมาก็คือเกิดการหยุดกัดโครงสร้างของพอรัสซิลิกอนในส่วนนี้ขึ้นทันที จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ΔE_v นั้นจะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของนาโนพอรัสซิลิกอน โดย ΔE_v จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของนาโนพอรัสซิลิกอนมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าจะเกิดการหยุดกัดในส่วนของนาโนพอรัสซิลิกอน เนื่องจากพาหะโฮลไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนาโนพอรัสซิลิกอนนี้ได้ แต่ปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนยังคงดำเนินต่อไป โดยบริเวณที่จะถูกกัดอย่างต่อเนื่องจะเป็นบริเวณก้นหลุมของรูพรุน ทั้งนี้เนื่องจากพาหะโฮลในผลึกซิลิกอนชนิดพีสามารถผ่านผิวสัมผัสเข้าไปในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่บริเวณก้นหลุมของรูพรุนได้สะดวกกว่าที่จะผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอรัสซิลิกอน ดังแสดงในรูปที่ 2.29 (ค) ดังนั้นจึงทำให้ที่บริเวณก้นหลุมของพอรัสซิลิกอนจะถูกกัดลึกเข้าไปในเนื้อของผลึกซิลิกอนอย่างต่อเนื่องได้

พอรัสซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น

เนื่องจากการไบอัสเซลไฟฟ้าเคมีในลักษณะ anodic bias สำหรับผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นจะเป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ มีผลทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นตามบริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิกอน โดยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแสจะมีค่าเท่ากับ W ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้น ดังนั้นกลไกในการหยุดกัดของพอรัสซิลิกอนสำหรับผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นแล้วจะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นภายในโครงสร้างของพอรัสซิลิกอน ดังแสดงในรูปที่ 2.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 แสดงแผนภาพบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (SCR) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอรัสซิลิกอนที่สร้างจากผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น โดยที่ [14]
(ก) โครงสร้างของพอรัสซิลิกอนที่มีขนาดมากกว่า 2W
(ข) โครงสร้างของพอรัสซิลิกอนที่มีขนาดน้อยกว่า 2W

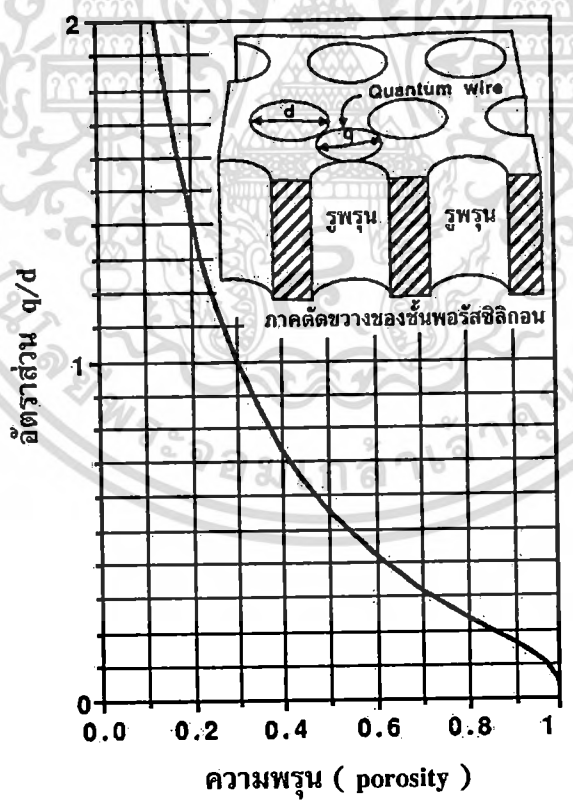
จากรูปที่ 2.30 (ก) จะเห็นได้ว่าพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นเมื่อถูกทำการกัดจะทำให้ขนาดของโครงสร้างพอรัสซิลิกอน (q) มีขนาดลดลงอย่างต่อเนื่อง เกิดเป็นรูพรุนภายในผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นขึ้น โดยมีบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (SCR) ปกคลุมอยู่รอบๆรูพรุนแต่ละรู ในกรณีนี้ขนาดของโครงสร้างพอรัสซิลิกอนยังมีขนาดที่มากกว่าสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะนำกระแส ($q > 2W$) ดังนั้นจึงยังสามารถทำการกัดเพื่อลดขนาดของโครงสร้างพอรัสซิลิกอนในส่วนนี้ต่อไปได้อีก จนเมื่อไหร่ก็ตามที่ขนาดของโครงสร้างพอรัสซิลิกอนมีขนาดที่น้อยกว่าสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะนำกระแส ($q < 2W$) ดังแสดงในรูปที่ 2.30 (ข) จะมีผลทำให้เกิดการซ้อนทับกันของบริเวณปลอดพาหะนำกระแส จนโครงสร้างของพอรัสซิลิกอน ถูกครอบคลุมโดยบริเวณปลอดพาหะนำกระแสทั้งหมด ส่งผลทำให้เกิดการหยุดกัดของพอรัสซิลิกอนในส่วนนี้ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ความพรุนของนาโนพอรัสซิลิกอน

โดยทั่วไปแล้ววัสดุใดๆก็ตามที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่ภายในเนื้อของวัสดุ ก็จะถือได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุที่มีความพรุน โดยค่าความพรุนนี้เป็นปริมาณที่สามารถบ่งบอกได้ถึงลักษณะขนาดโครงสร้างของวัสดุได้อย่างคร่าวๆ ซึ่งสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างมวลหรือปริมาตรของเนื้อวัสดุกับช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุนั้นๆ

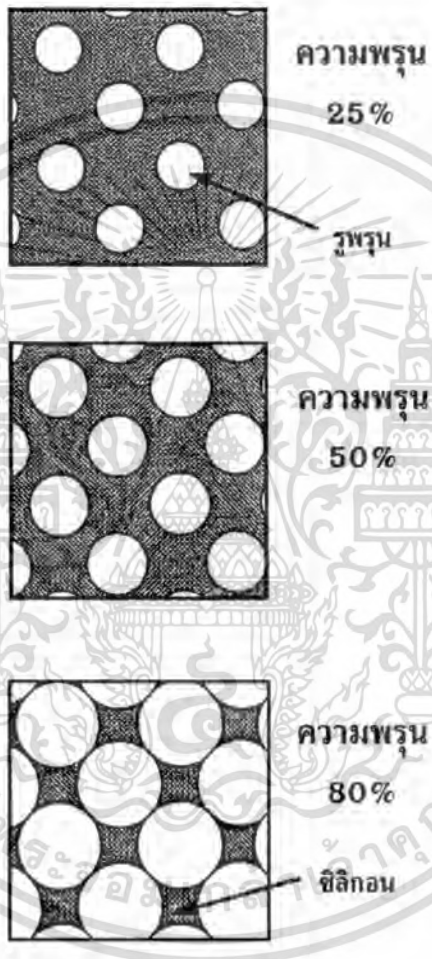
เป็นที่ทราบกันแล้วว่า พอรัสซิลิกอนนั้นก็คือผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยขนาดของเนื้อผลึกซิลิกอนที่เหลือ และขนาดของรูพรุน จะมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร เนื้อของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตรนี้จะแสดงคุณสมบัติทาง Quantum size effect ในลักษณะของ Quantum wire ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตร กับขนาดของรูพรุน จะมีผลต่อความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอน ดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของขนาดเนื้อผลึกซิลิกอน (q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอรัสซิลิกอน [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า ทั้งขนาดของเนื้อผลึกซิลิกอน (q) และขนาดของรูพรุน (d) มีผลต่อความพรุนของพอรัสซิลิกอน โดยถ้าเนื้อของผลึกซิลิกอนถูกกัดจนมีขนาดเล็กลงๆ หรือขนาดของรูพรุนมีขนาดกว้างขึ้น จะมีผลทำให้ชั้นพอรัสซิลิกอนนั้นมีความพรุนมากขึ้นกว่าเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.32



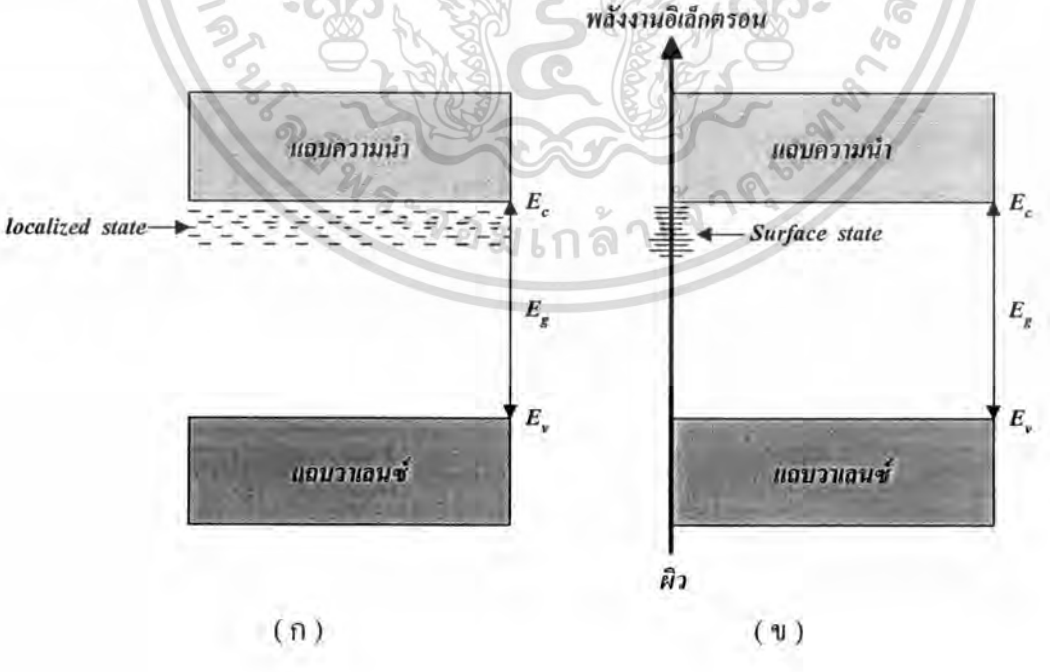
รูปที่ 2.32 แสดงแผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอรัสซิลิกอน ที่เปอร์เซนต์ความพรุนต่างๆ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
พฤติกรรมทางแสง

3.1 พฤติกรรมทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

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



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการที่จะศึกษาถึงขนาดหรือลักษณะของช่องว่างพลังงาน ระดับพลังงานของ localized state หรือ surface state ให้ได้ผลดีที่สุด ได้แก่ การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือ ถ้าเราวัดวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืน การสะท้อน หรือการเปล่งแสงจากสารกึ่งตัวนำ เราจะสามารถทราบค่าระดับพลังงานของ localized state หรือ surface state และได้ข้อมูลเกี่ยวกับช่องว่างพลังงาน ทั้งนี้เพราะว่าการดูดกลืนแสงก็ดี หรือการเปล่งแสงก็ดี เกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบชั้นพลังงานใดๆมีการดูดกลืนแสง 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 แต่จะไม่ขอกล่าวในที่นี้เพราะไม่ใช่คุณสมบัติที่เด่นชัดของสารกึ่งตัวนำ ส่วนการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟาเรดจะเกิดจากการกระทำระหว่างอะตอมและแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นคุณสมบัติของโฟนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การเปล่งแสง

3.1.2.1 การรวมตัวแบบเปล่งแสง และการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง

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

1. เกิดการเปล่งแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและโฮล เรียกการรวมตัวในลักษณะแบบนี้ว่า การรวมตัวแบบเปล่งแสง (radiative recombination)

2. เกิดการปล่อยพลังงานความร้อน (โฟนอน) ให้กับโครงผลึก เรียกการรวมตัวในลักษณะแบบนี้ว่า การรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง (non-radiative reconbination)

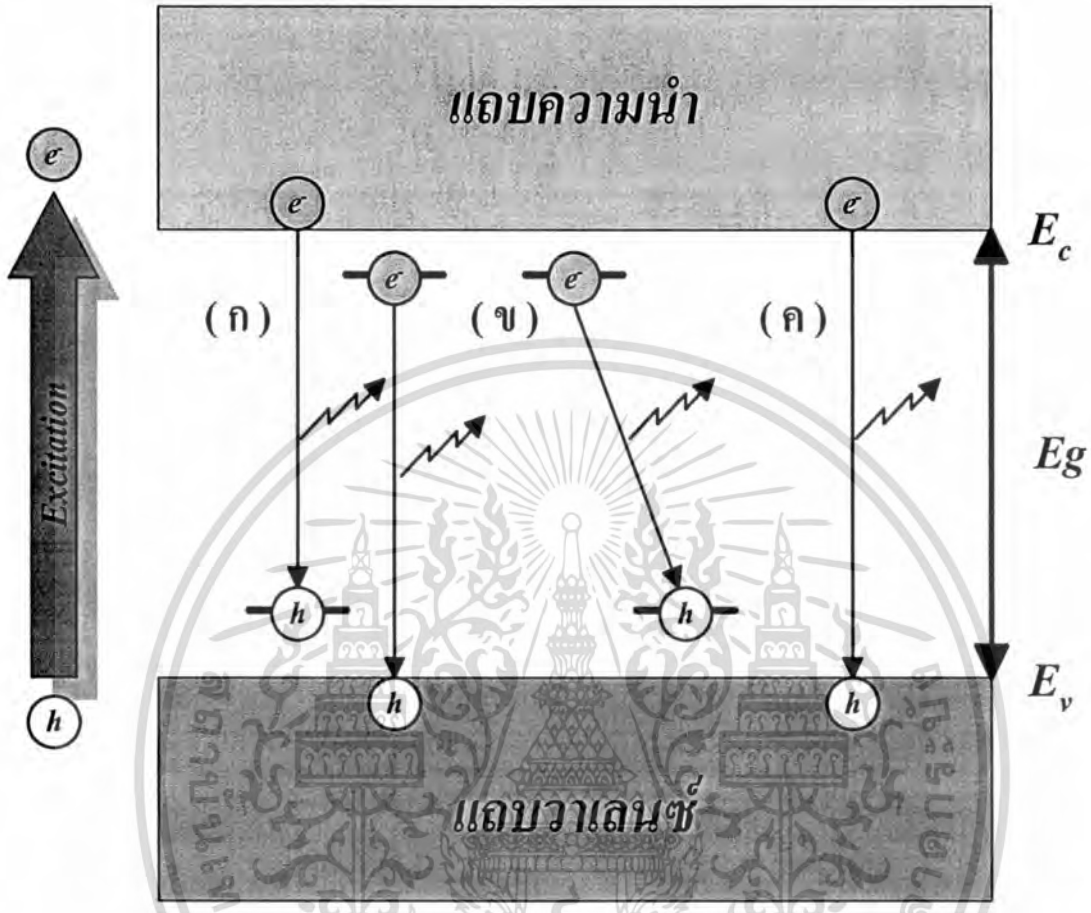
ซึ่งโดยทั่วไปปรากฏการณ์ทั้งสองชนิดนี้สามารถเกิดขึ้นได้พร้อมๆกัน ถ้าให้ τ_R และ τ_N คือ เวลาอายุเฉลี่ย (life time) ของพาหะที่นับตั้งแต่ถูกกระตุ้นจนถึงรวมตัวแบบเปล่งแสง และไม่เปล่งแสงตามลำดับ ประสิทธิภาพของการรวมตัวแบบเปล่งแสง η จะมีค่าดังนี้คือ

$$\eta = \frac{(1/\tau_R)}{(1/\tau_R) + (1/\tau_N)} = \frac{1}{1 + (\tau_R/\tau_N)} \qquad (3.1)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่า ถ้า τ_N/τ_R มีค่ามาก η ก็จะมีค่ามากด้วย กระบวนการการรวมตัวแบบเปล่งแสงจะมีลักษณะตรงข้ามกับการดูดกลืนแสงทุกประการ โดยในรูปที่ 3.2 จะแสดงตัวอย่างการเปลี่ยนระดับพลังงานที่สำคัญๆในสารกึ่งตัวนำ 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 ดังแสงในรูปที่ 3.2 (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงกระบวนการรวมตัวของพาหะแบบเปล่งแสงในสารกึ่งตัวนำ

(ก) Band-to-Level emission

(ข) Donor-Accepter emission

(ค) Band-to-Band emission

การเปล่งแสงอันเนื่องมาจากการรวมตัวแบบเปล่งแสง (radiative recombination) นี้อาจมีชื่อเรียกสั้นๆว่า 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) Chemicalluminescence	เคมี

โดยในจำนวนการเปล่งแสงทั้งหมดที่แสดงในตารางข้างต้น ชนิดของการเปล่งแสงที่สามารถสังเกตุพบในสารกึ่งตัวนำมากที่สุด ได้แก่ การเปล่งแสงชนิด Photoluminescence Electroluminescence และ Cathodeluminescence ซึ่งการสังเกตุปรากฏการณ์ทางแสงเหล่านี้จะทำให้เราสามารถวิเคราะห์ระดับพลังงาน และการเปลี่ยนแปลงสถานะพลังงานในสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี การเปล่งแสงชนิด Thermoluminescence และ Triboluminescence จะพบในวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีช่องว่างพลังงานที่กว้างมากๆ ส่วนการเปล่งแสงชนิด Chemicalluminescence จะพบมากในวัสดุพวกอินทรีย์ โดยในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะการเปล่งแสงชนิด Potoluminescence เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)

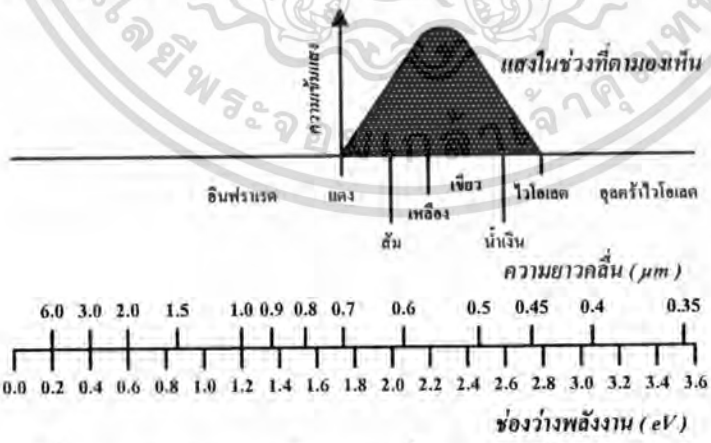
การเปล่งแสงในลักษณะโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ เป็นปรากฏการณ์การเปล่งแสงอันเนื่องมาจากการกระตุ้นพาหะอิเล็กตรอนด้วยวิธีการส่องแสง (excitation by light) จนพาหะอิเล็กตรอนมีพลังงานมากเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบความนำได้ แต่เนื่องจากพาหะอิเล็กตรอนเหล่านี้มีความไม่เสถียรในสถานะใหม่นี้ ดังนั้นจึงต้องตกกลับลงมาอยู่ในสถานะเดิม โดยจะมีการคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนหรือแสง ซึ่งค่าพลังงานที่ปล่อยออกมานี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับช่วงกว้างของระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนต้องกระโดดกลับลงมารวมตัวกับโฮล โดยความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน (E) กับความยาวคลื่นของแสง (λ) เป็นดังนี้คือ

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

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

$$\lambda\,(nm) = 1240 / E\,(eV) \qquad (3.3)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่า การที่แสงที่เปล่งออกมาจะมีค่าความยาวคลื่นหรือสีต่างๆ ได้นั้น ขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของอิเล็กตรอนที่คายออกมานั่นเอง โดยสีของแสงที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพสีของแสงที่ความยาวคลื่นและค่าพลังงานต่างๆ

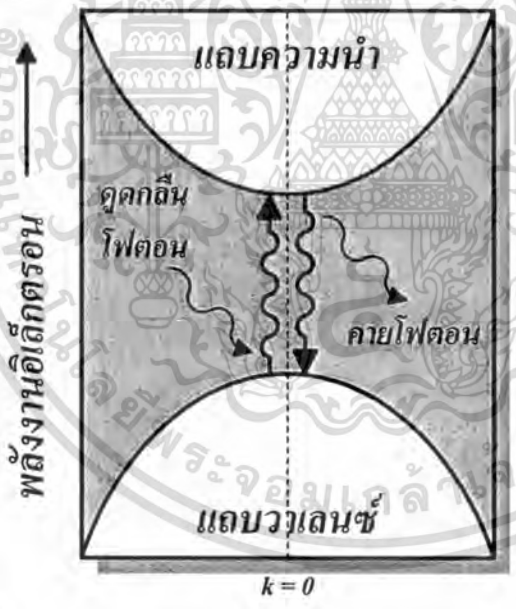
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุผลข้างต้นนี้เอง จึงทำให้ปรากฏการณ์โฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่เกิดขึ้น มีประโยชน์เป็นอย่างมากในการวิเคราะห์วัสดุ โดยสเปกตรัมของแสงที่ได้สามารถบอกถึงข้อมูลที่เกี่ยวกับโครงสร้างของแถบพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาดของช่องว่างพลังงานของวัสดุได้

3.2 พฤติกรรมทางแสงของผลึกซิลิกอน

ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วว่า การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบพลังงานหนึ่งไปสู่แถบพลังงานหนึ่ง ในลักษณะที่มีค่าพลังงานเพิ่มขึ้นจะก่อให้เกิดการดูดกลืนแสง และค่าความแตกต่างของระดับชั้นพลังงานก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงนั้น จะต้องเท่ากับพลังงานโฟตอนของแสงที่เป็นตัวกระตุ้น ซึ่งกฎข้อนี้จะถูกเรียกว่า กฎการอนุรักษ์พลังงาน นอกจากกฎนี้แล้วยังมีกฎที่อนุรักษ์โมเมนตัมอีกด้วย

โดยในวัสดุที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นแบบ direct band gab ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงแผนภาพโครงสร้างของแถบพลังงานแบบ direct band gab

ในการเปลี่ยนสถานะระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนท์ไปสู่แถบความนำ ค่า wave number (k) ก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างไร ทั้งนี้เนื่องจากระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนท์กับระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำ อยู่ที่ตำแหน่ง wave number เดียวกัน ดังนั้นจึงทำให้ในกระบวนการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนอันเนื่องมาจากการดูดกลืนแสง ค่าโมเมนตัม ($\hbar$ k) ของอิเล็กตรอนทั้งก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะมีค่าคงที่เสมอ เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม และกฎการอนุรักษ์พลังงาน ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

โดยที่ k_1 เป็น wave number ของอิเล็กตรอนก่อนเปลี่ยนสถานะ

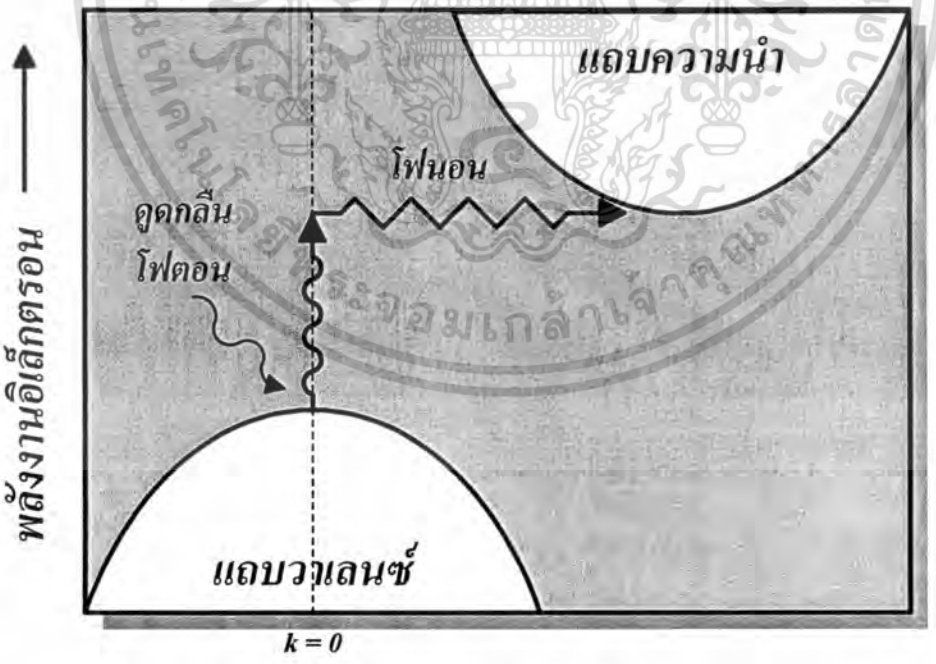
k_2 เป็น wave number ของอิเล็กตรอนหลังเปลี่ยนสถานะ

E_i เป็น พลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนก่อนเปลี่ยนสถานะ

E_f เป็น พลังงานของอิเล็กตรอนหลังการเปลี่ยนสถานะ

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

แต่สำหรับผลึกซิลิกอนแล้วกลับมีโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นแบบ indirect band gab ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงแผนภาพโครงสร้างของแถบพลังงานแบบ indirect band gab

จากรูปจะเห็นได้ว่าระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนท์ กับระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่ง wave number เดียวกัน ทำให้ในการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนท์ไปสู่แถบความนำได้นั้น จะต้องอาศัยการรับหรือคายพลังงานโฟนอน (E_p) ให้กับอะตอมในโครงผลึก ซึ่งการรับหรือคายพลังงานของโฟนอนนี้จะช่วยให้เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน และกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม คือ

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

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

โดยที่ E_p เป็น พลังงานของโฟนอน

k_p เป็น wave number ของโฟนอน

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

จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าผลึกซิลิกอนหรือวัสดุอื่นๆที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานในลักษณะนี้ เมื่ออิเล็กตรอนมีการดูดหรือคายพลังงาน จะมีการสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งไปเพื่อทำให้เกิดการสั่นของอะตอมในโครงผลึก (โฟนอน) ด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้ผลึกซิลิกอนจึงมีคุณสมบัติทางแสงที่ไม่เหมาะสมสำหรับที่จะนำไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง

3.3 พฤติกรรมทางแสงของนาโนพอรัสซิลิกอน

กลไกในการเปล่งแสงแบบโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของนาโนพอรัสซิลิกอน

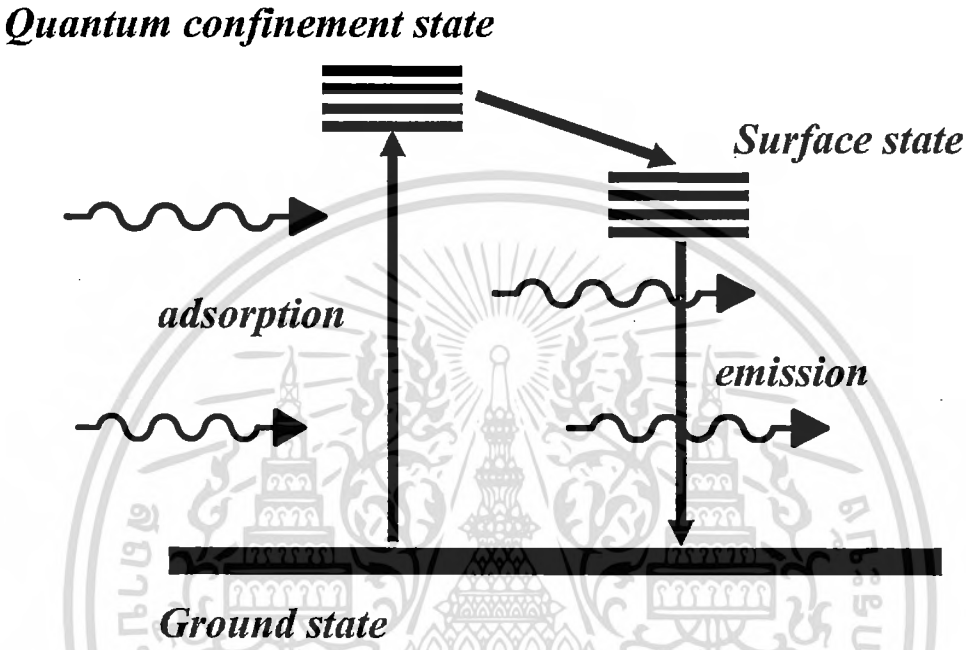
จากลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบของพอรัสซิลิกอน ที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.2.1 ได้ทำให้หลายๆกลุ่มวิจัยทั่วโลกเชื่อกันว่าคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนนี้น่าจะเกิดขึ้นมาจากสาเหตุที่สำคัญ 2 ประการร่วมกันคือ

1. การเกิดปรากฏการณ์ quantum size effect หรือ quantum confinement effect [15 , 16] ขึ้นภายในชั้นของนาโนพอรัสซิลิกอน มีผลทำให้ขนาดของช่องว่างของแถบพลังงานของนาโนพอรัสซิลิกอนมีความกว้างมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของช่องว่างแถบพลังงานเดิมของผลึกซิลิกอน ดังที่ได้ที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.2.2

2. การเกิดระดับพลังงานที่ผิว (surface state) ของนาโนพอรัสซิลิกอน [17] ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีพันธะของไฮโดรเจน และอะตอมของธาตุอื่นๆที่อยู่ที่ผิวของนาโนพอรัสซิลิกอนนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 3.6 แสดงแบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้งสามระดับภายในพอรัสซิลิกอน

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีสถานะของระดับพลังงานกระตุ้น (excited state) อยู่ถึงสองระดับด้วยกัน โดย**สถานะแรก**นั้นจะเป็นสถานะของระดับพลังงานภายในนาโนพอรัสซิลิกอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของ quantum confinement effect หรือ quantum size effect ส่วน**สถานะที่สอง**จะเป็นสถานะของระดับพลังงานที่ผิวของนาโนพอรัสซิลิกอน จากแบบจำลองนี้เมื่ออิเล็กตรอนภายในนาโนพอรัสซิลิกอนได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสง จนมีพลังงานเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในสถานะ quantum confinement state ได้ แต่เนื่องจากผลของการที่ช่องว่างพลังงานของระดับพลังงานที่ผิวมีขนาดที่เล็กกว่าช่องว่างพลังงานภายในนาโนพอรัสซิลิกอนนี้เอง [18] จึงทำให้อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียรเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงสถานะย้ายลงมาสู่สถานะของระดับพลังงานที่ผิวก่อนที่จะเกิดการรวมตัวใหม่ (recombination) กับโฮลที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state) โดยในการรวมตัวใหม่นี้เองอิเล็กตรอนจะมีการคายพลังงานออกมา ซึ่งจะอยู่ในรูปของโฟตอนหรือแสงนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
กระบวนการสร้าง

ในกระบวนการสร้างเพื่อให้ได้มาซึ่งผลึกซิลิกอนที่มีขนาดของโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตร (nanocrystallites) และสามารถแสดงคุณสมบัติในการเปล่งแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้นั้นมีอยู่หลายวิธีการด้วยกัน โดยในหัวข้อนี้จะได้พิจารณาถึงเทคนิคและวิธีการสร้างผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรแบบต่างๆ

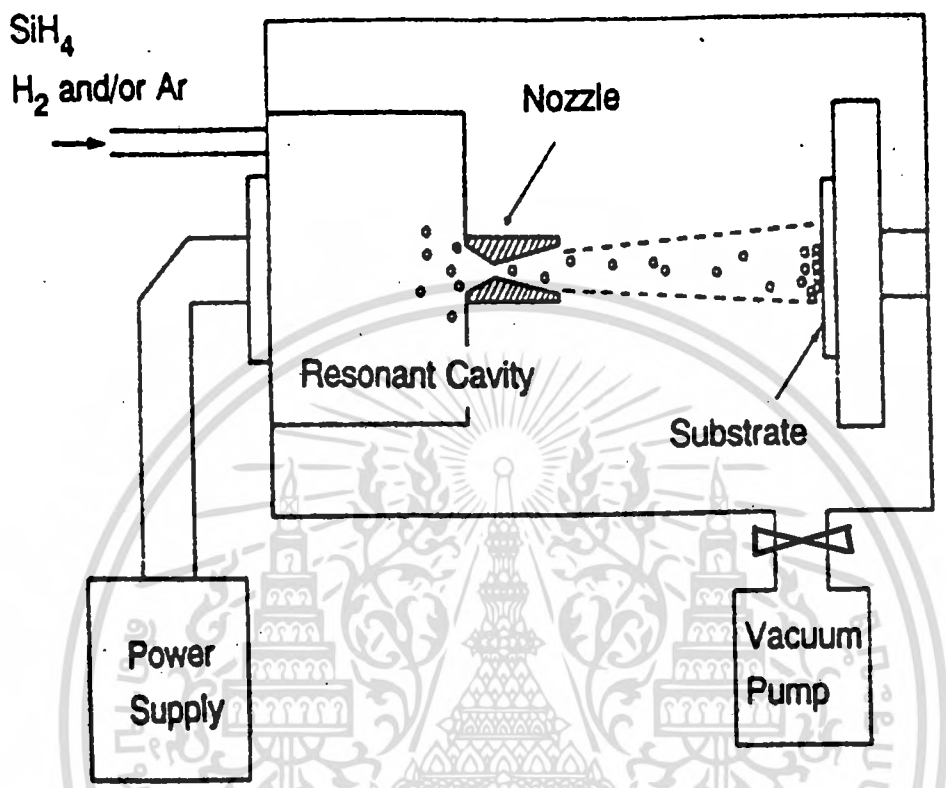
4.1 เทคนิคในการสร้างแบบต่างๆ

4.1.1 เทคนิควิธีการสร้างแบบ Microwave plasma decomposition ของก๊าซไซเรน (SiH_4)

ผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร (nanocrystallites Si) ซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติในการเปล่งแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ ณ.ที่อุณหภูมิห้องนั้น สามารถทำการสร้างขึ้นมาได้ด้วยวิธีการ microwave plasma decomposition ก๊าซไซเรน (SiH_4) โดยวิธีการสร้างแบบนี้ได้ถูกรายงานเป็นครั้งแรก โดย Takagi et al. [19] มีหลักการดังต่อไปนี้คือ ผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรจะถูกสร้างขึ้นมาด้วยวิธีการ microwave plasma decomposition ของก๊าซไซเรน (SiH_4) กับก๊าซไฮโดรเจน (H_2) หรือก๊าซผสมของอาร์กอน (Ar) ในช่อง resonant cavity โดยมีการใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีกำลัง 150 W ที่ความถี่ 2.45 GHz เพื่อทำให้เกิด plasma ขึ้นภายใน ซึ่งลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.1

ขนาดของผลึกซิลิกอนที่เกิดขึ้นจะมีค่าเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 2.5 จนไปถึง 2 นาโนเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของก๊าซ กับกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ ต่อจากนั้นผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรนี้จะถูกปล่อยผ่านท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 4.5 มิลลิเมตร ไปยังภาชนะระบบปิด (chamber) ที่ภายในมีความดันอยู่ในระดับ 10^{-6} Torr โดยผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรที่เกิดขึ้นนี้จะถูกปล่อยให้ไปตกเคลือบอยู่บนฐานรองที่เป็น ควอทซ์ ณ ที่อุณภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการ microwave plasma decomposition ของก๊าซไซเรน (SiH_4) [19]

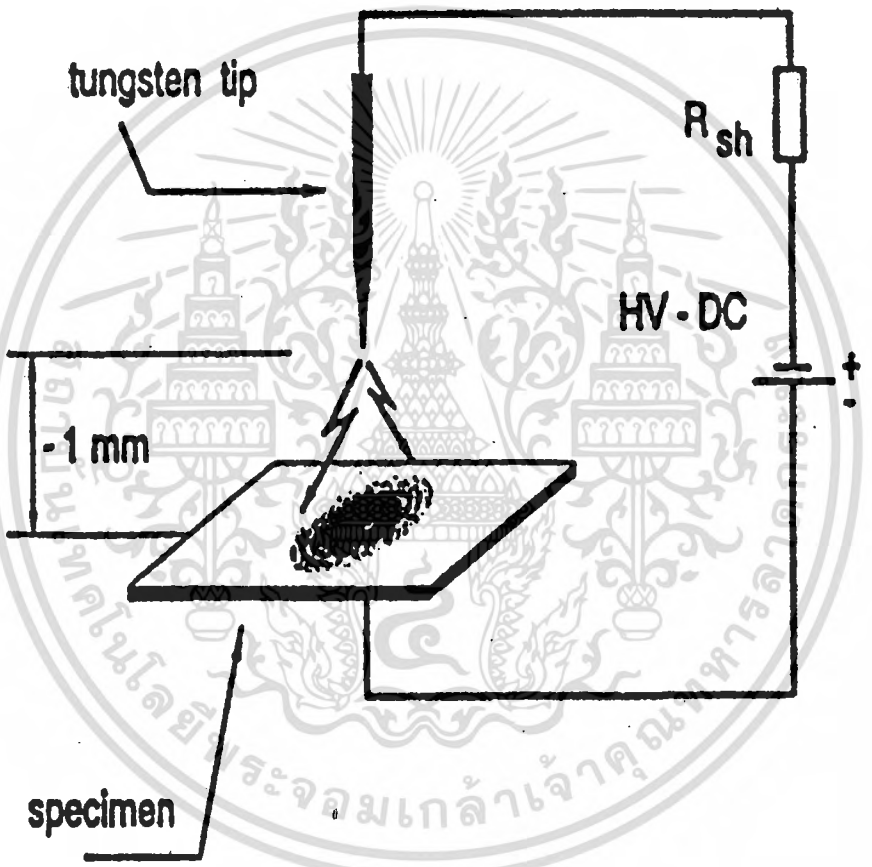
4.1.2 เทคนิควิธีการสร้างแบบ Laser breakdown ก๊าซไซเรน (SiH_4)

ผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรยังสามารถสร้างขึ้นได้จากวิธีการ laser breakdown ของก๊าซไซเรน (SiH_4) [20,21] โดยมีรายละเอียดวิธีการสร้างดังต่อไปนี้คือ เริ่มต้นจากการที่ก๊าซไซเรนบริสุทธิ์ (Pure SiH_4) ที่มีความดันเท่ากับ 10 , 15 หรือ 20 Torr จะถูกปล่อยเข้าไปยังในภาชนะระบบปิด (chamber) ซึ่งภายในมีความดัน (background pressure) ที่ต่ำกว่า 10^{-6} Torr ความดันของก๊าซไซเรนค่าต่างๆเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดของผลึกซิลิกอนที่เกิดขึ้น ในส่วนของเลเซอร์ที่ใช้นั้นมีแหล่งกำเนิดมาจากระบบ Nd^{3+} : YAG laser system โดยแสงเลเซอร์ที่ได้ออกมาจะถูกโฟกัสให้ผ่านเข้าไปยังภาชนะระบบปิด เพื่อทำให้เกิดการ Spark ขึ้นภายในผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรที่เกิดขึ้นจะถูก deposite ลงบนฐานรองที่เป็นควอทซ์หรือแผ่นเยอรมันเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 เทคนิควิธีการสร้างแบบ High - frequency spark discharge

เทคนิคในการสร้างผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการ spark discharge ที่ความถี่สูงได้ถูกรายงานเป็นครั้งแรกโดยนาย Hummel และทีมงาน [22,23] โดยการ Spark discharge ที่เกิดขึ้นจะใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงความต่างศักย์สูง ขนาด 15 กิโลโวลต์ ซึ่งในการ spark แต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 20 ns และเกิดขึ้นทุกๆ 60 μs ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงการ Spark ที่เกิดขึ้นระหว่างปลายลวดทังสเตนกับแผ่นผลึกซิลิกอน [22 , 23]

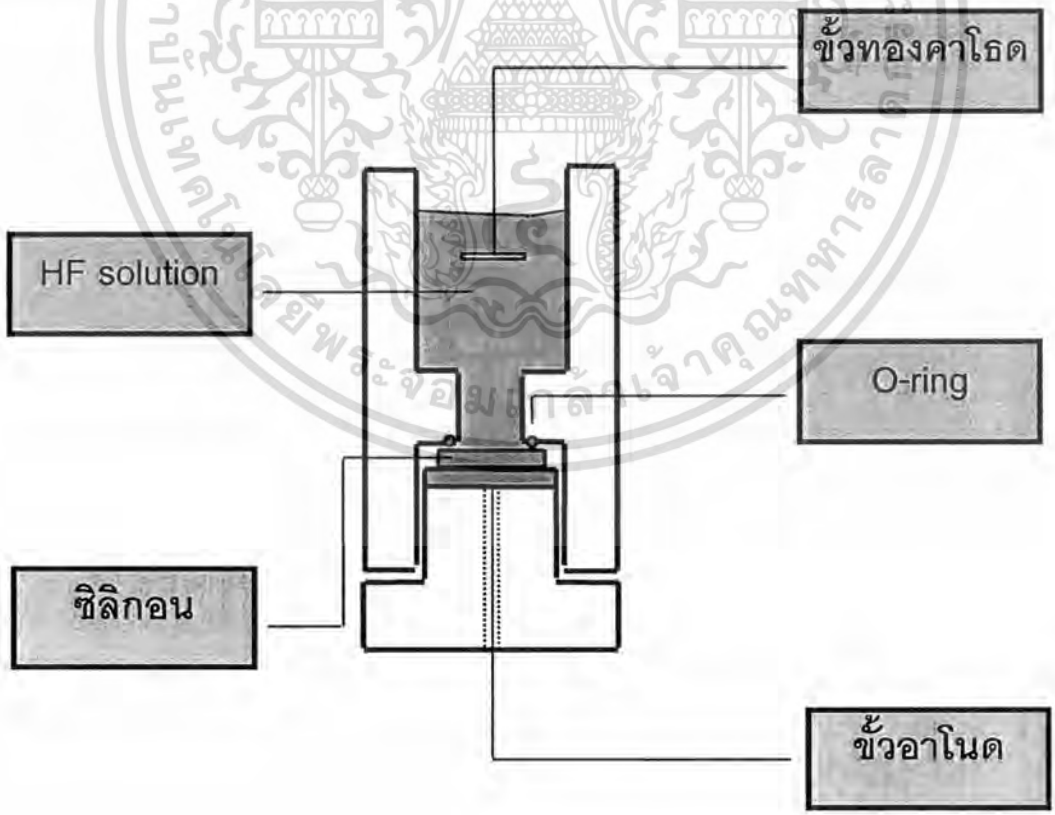
จากรูปจะเห็นได้ว่าการ Spark discharge จะเกิดขึ้นระหว่างปลายสุดของลวดทังสเตน ซึ่งอยู่ที่ขั้วอาโนด กับแผ่นผลึกซิลิกอนซึ่งอยู่ที่ขั้วคาโธด โดยการ Spark นั้นจะทำให้บริเวณซึ่งเกิดโครงสร้างของผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร มีลักษณะเป็นบริเวณวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3 - 5 มิลลิเมตร บนแผ่นผลึกซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การสร้างนาโนพอรัสซิลิกอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี

เทคนิคต่างๆที่ได้กล่าวมาข้างต้น ส่วนใหญ่จะเป็นเทคนิคในการปลูกผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรขึ้นมาโดยตรง โดยเทคนิคต่างๆเหล่านี้จะต้องอาศัยเทคนิคการสร้างและอุปกรณ์เครื่องมือที่มีความแม่นยำสูง ในการปลูกผลึกให้มีโครงสร้างอยู่ในระดับชั้นของโมเลกุลได้ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะมีราคาที่สูงมาก แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างชั้นของพอรัสซิลิกอนที่มีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตรเช่นกัน ด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical etching) เนื่องจากมีกระบวนการสร้างในการสร้างที่ค่อนข้างจะง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน อีกทั้งอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างชั้นของพอรัสซิลิกอนก็มีราคาที่ไม่แพงอีกด้วย ซึ่งการสร้างพอรัสซิลิกอนด้วยวิธีนี้จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

พอรัสซิลิกอนนั้นเป็นวัสดุที่สามารถสร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิกอนได้โดยตรง โดยอาศัยกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า การ anodization ซึ่งจะต้องใช้อุปกรณ์เซลไฟฟ้าเคมี ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงภาคตัดขวางของอุปกรณ์เซลไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการ anodization

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์เซลไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนนี้จะประกอบด้วย แผ่นผลึกซิลิกอนอยู่ที่ขั้วแอโนด ส่วนขั้วแคโธดจะใช้ทองเป็นขั้วอิเล็กโตรด โดยวัสดุทั้งสองจะถูกจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโตรไลท์ ซึ่งในที่นี้ได้แก่สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกนั่นเอง จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าแผ่นผลึกซิลิกอนจะถูกนำไปวางอยู่ตรงบริเวณด้านล่างของเซลไฟฟ้าเคมี โดยจะมีการใช้ O-ring เข้ามาเป็นส่วนที่ช่วยป้องกันการรั่วไหลของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกออกจากเซล ซึ่งขั้นตอนต่างๆในกระบวนการสร้างชั้นพอรัสซิลิกอน มีดังนี้คือ

ขั้นตอนในการสร้างชั้นพอรัสซิลิกอน

1. การเตรียมแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น (Wafer Preparation)

ใช้แผ่นผลึกของซิลิกอนที่มีผิวด้านหน้าขัดมันเป็นกระจกเงา ชนิดพี หรือเอ็น ที่มีระนาบ 100 มีค่าพิกัดความต้านทาน 6 - 12 โอห์ม - เซนติเมตร มีค่าความหนาของแผ่นผลึกซิลิกอนเท่ากับ 400 ไมโครเมตร โดยมีภาคตัดขวางดังแสดงในรูปที่ 4.4

รูปที่ 4.4 แสดงภาคตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น

2. การทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น (Initial Cleaning)
มีขั้นตอนตามลำดับดังนี้คือ

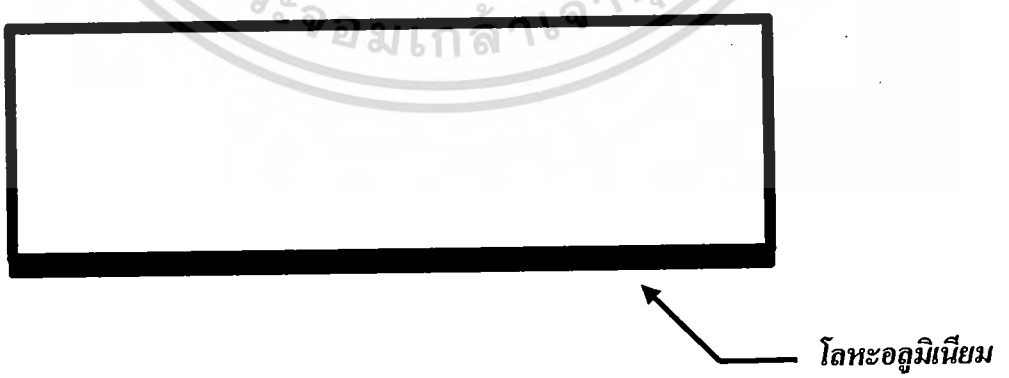
- ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (deionized water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Supersonic Cleaning)
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- กัดผิวหน้าด้วยกรดกัดแก้ว (HF) 5 % เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะหนักที่ผิวหน้า
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคลโรเอททิลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซีโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มลงในกรดกัดแก้ว (HF) 5 % เป็นเวลา 20 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสูญญากาศ

หลังจากผ่านกระบวนการทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกซิลิกอนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ต่อจากนั้นจะทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมที่บริเวณด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิกอน ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสูญญากาศ โดยใช้เครื่อง Vacuum Evaporator ซึ่งสามารถทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมที่ด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิกอนได้ความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงภาคตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิกอนที่ผ่านการเคลือบโลหะอลูมิเนียมที่บริเวณด้านหลังของแผ่นแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. กระบวนการซินเตอร์ริ่ง

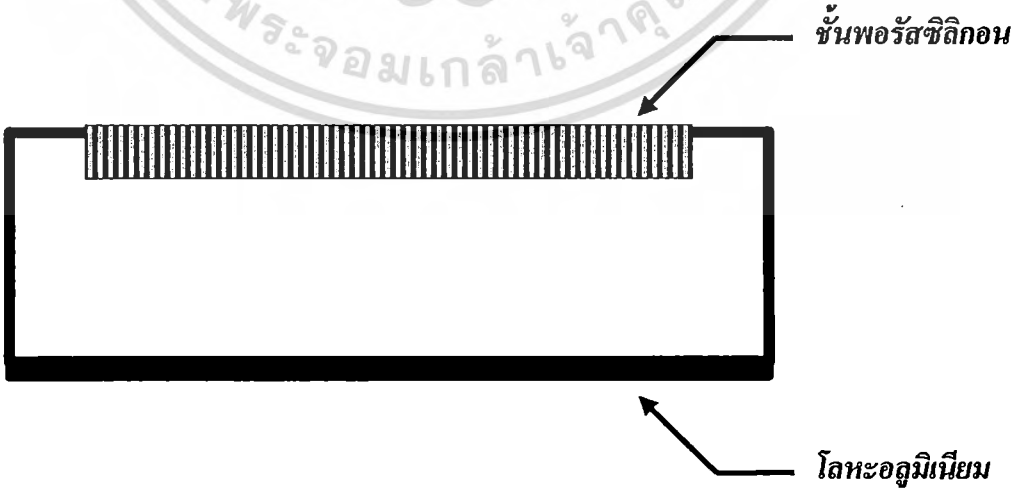
ต่อจากนั้นก็นำแผ่นผลึกซิลิกอนที่ทำการเคลือบโลหะอลูมิเนียมด้านหลังแผ่น ไปผ่านการซินเตอร์ริ่ง เพื่อให้ส่วนของโลหะอลูมิเนียมกับเนื้อของผลึกซิลิกอนเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิค ซึ่งจะมีผลทำให้กระแสที่ป้อนเข้าไปในระหว่างกระบวนการ anodization มีการกระจายตัวไปทั่วแผ่นได้อย่างสม่ำเสมอ โดยการทิ้งแผ่นผลึกซิลิกอนไว้ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 ลิตร ต่อนาที ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เมื่อผ่านขั้นตอนนี้แล้วก็จะนำเอาแผ่นผลึกซิลิกอนไปบรรจุไว้ในเซลไฟฟ้าเคมี เพื่อทำการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนต่อไป

5. การสร้างชั้นพอรัสซิลิกอน

โดยการนำเอาแผ่นผลึกซิลิกอนที่ผ่านกระบวนการต่างๆข้างต้น ไปวางตรงตำแหน่งบริเวณด้านล่างของเซลไฟฟ้าเคมี ต่อจากนั้นก็ทำการเทสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกลงสู่เซล แล้วทำการป้อนกระแสไฟฟ้าคงที่ให้แก่ขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิกอน และขั้วอิเล็กโตรดที่เป็นทองที่จุ่มอยู่ในสารละลายกร ซึ่งจะเกิดปฏิกริยาทางไฟฟ้าเคมีขึ้น มีผลทำให้ที่บริเวณผิวของแผ่นผลึกซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆจำนวนมากมาย โดยพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความพรุน (porosity) ของพอรัสซิลิกอนก็คือ เงื่อนไขต่างๆที่ใช้ในระหว่างกระบวนการ anodization อันได้แก่

- ชนิด และสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอน
- ความหนาแน่นกระแส
- ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก
- เวลาในการ anodization

ซึ่งภายหลังจากการที่กระบวนการ anodization ได้ทำเสร็จสมบูรณ์เรียบร้อยแล้ว ก็จะได้ชั้นของพอรัสซิลิกอนเกิดขึ้นมาตรงบริเวณผิวหน้าด้านบนของแผ่นผลึกซิลิกอน ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงภาคตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิกอนที่เกิดชั้นพอรัสซิลิกอนที่บริเวณผิวหน้าด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การทำความสะอาดแผ่นผลึกครั้งสุดท้าย (Final Cleaning)

หลังจากการสร้างชั้นของพอรัสซิลิกอนที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนเรียบร้อยแล้ว ต่อจากนั้นก็จะนำเอาแผ่นผลึกซิลิกอนออกจากเซลไฟฟ้าเคมี ไปผ่านการทำความสะอาดแผ่นผลึกครั้งสุดท้าย โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้คือ

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธ์
- แช่แผ่นในแอลกอฮอล์ เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดชะล้างสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ยังตกค้างอยู่ในชั้นของพอรัสซิลิกอน
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

ซึ่งเมื่อผ่านขั้นตอนสุดท้ายนี้แล้วก็จะได้ ตัวอย่างรูปถ่ายของแผ่นผลึกซิลิกอนที่บริเวณผิวหน้าเกิดชั้นของพอรัสซิลิกอนขึ้นมา ดังแสดงในรูปที่ 4.7

รูปที่ 4.7 แสดงรูปถ่ายของพอรัสซิลิกอนที่ได้ทำการสร้างจนเสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และการวัด

5.1 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอน

5.1.1 เทคนิคกราวิเมตตริก (Gravimetric method) [24]

เป็นเทคนิคอย่างง่ายๆที่ถูกนำมาใช้สำหรับการวัดหาค่าความพรุน (porosity) ของวัสดุ โดยอาศัยหลักการการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุก่อนและหลังการเกิดรูพรุน ซึ่งค่าความพรุนของวัสดุใดๆ จากเทคนิคการวัดแบบนี้จะมีค่าดังนี้คือ

$$\text{เปอร์เซนต์ความพรุน} = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} x100 \qquad (5.1)$$

โดยที่ m_1 เป็นน้ำหนักของวัสดุเริ่มต้นก่อนการเกิดรูพรุน

m_2 เป็นน้ำหนักของวัสดุหลังการเกิดรูพรุน

m_3 เป็นน้ำหนักของวัสดุที่เหลือหลังจากการลอกชั้นความพรุนออก

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น มีการใช้ถ้อยคำให้ผู้ใช้งานทราบก่อนเข้าใช้งานทุกครั้ง และมีการแสดงที่มาของเอกสารที่มีการนำไปใช้

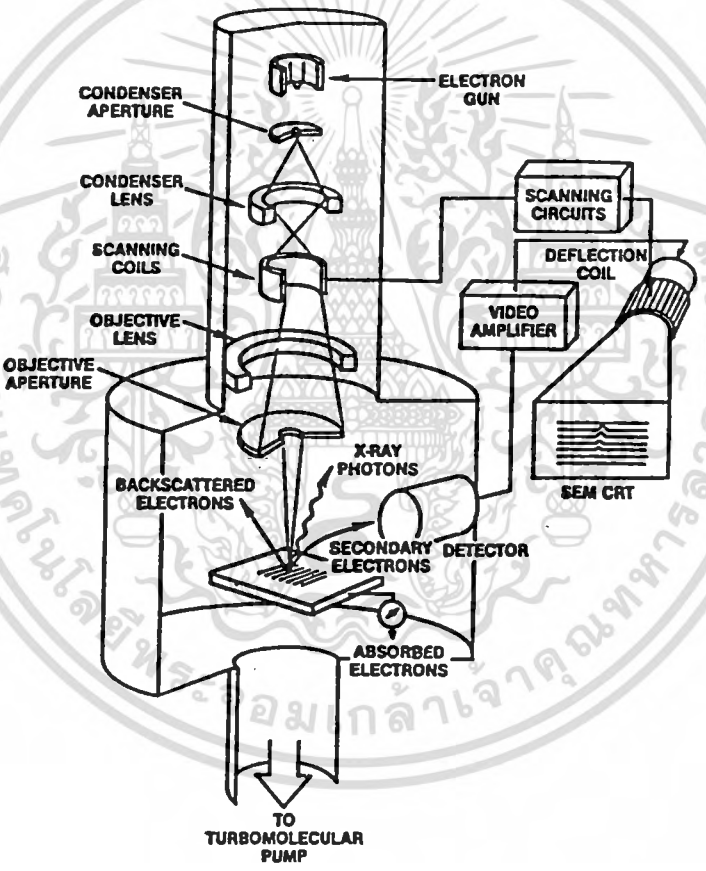
รูปที่ 5.1 แสดงภาพถ่ายของเครื่องชั่งน้ำหนักของบริษัท Sartorius รุ่น 1602 MP ที่มีความละเอียดสูง

5.1.2 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM)

เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (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



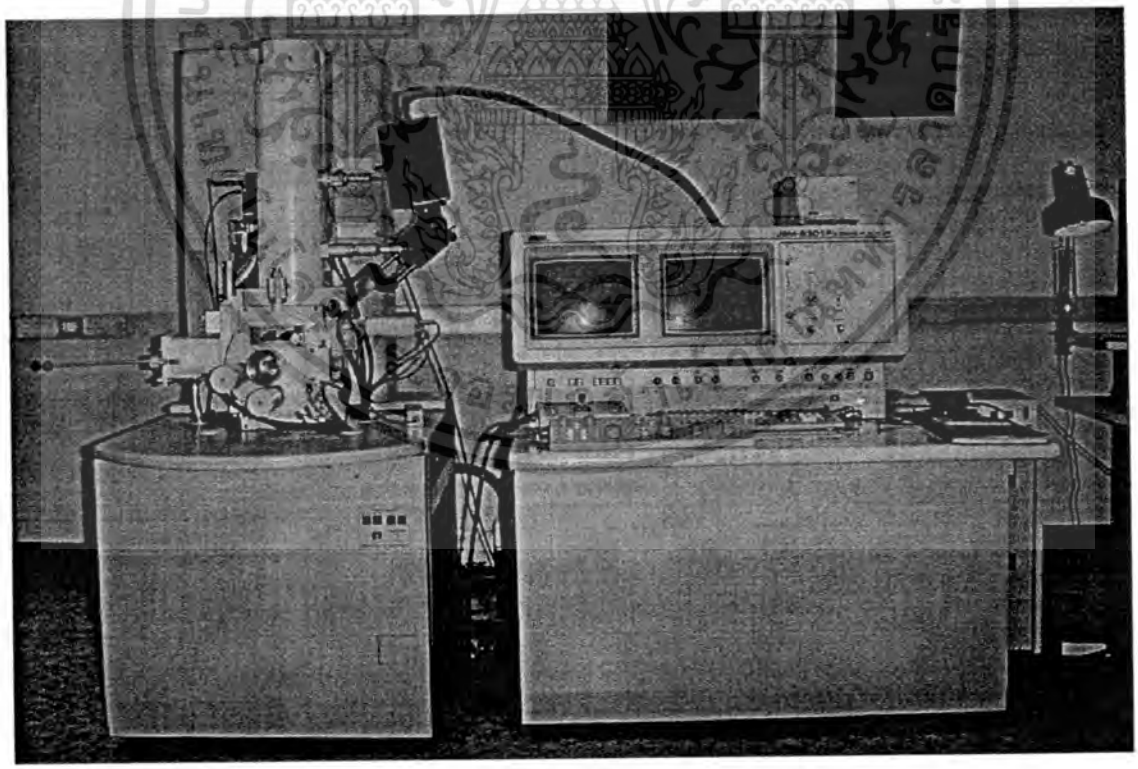
รูปที่ 5.2 แสดงแผนภาพหลักการทำงานของเครื่อง SEM

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า ในส่วนบนสุดของรูปจะเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron source) หรือที่เรียกว่า “ ปืนอิเล็กตรอน ” (electron gun) ซึ่งนับได้ว่าเป็นหัวใจของ SEM การทำงานจะเริ่มต้นจากการที่อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ด้วยความต่างศักย์ในช่วง 1-30 KV โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยเลนส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

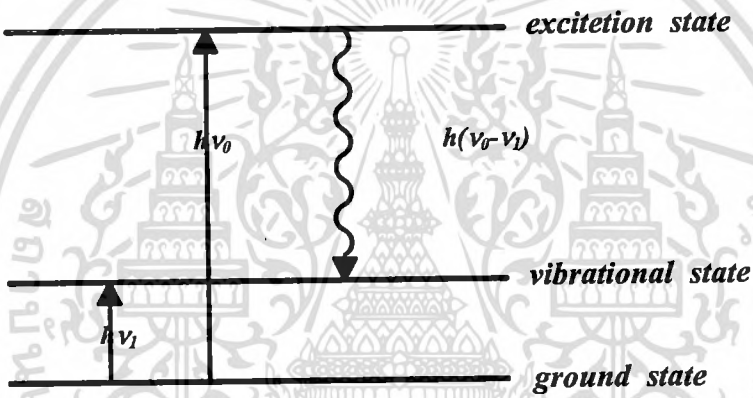


รูปที่ 5.3 แสดงภาพถ่ายเครื่อง SEM ของ JEOL รุ่น JSM-6301F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มรามานสเปกโตรสโทปี (FT-RAMAN) [25]

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



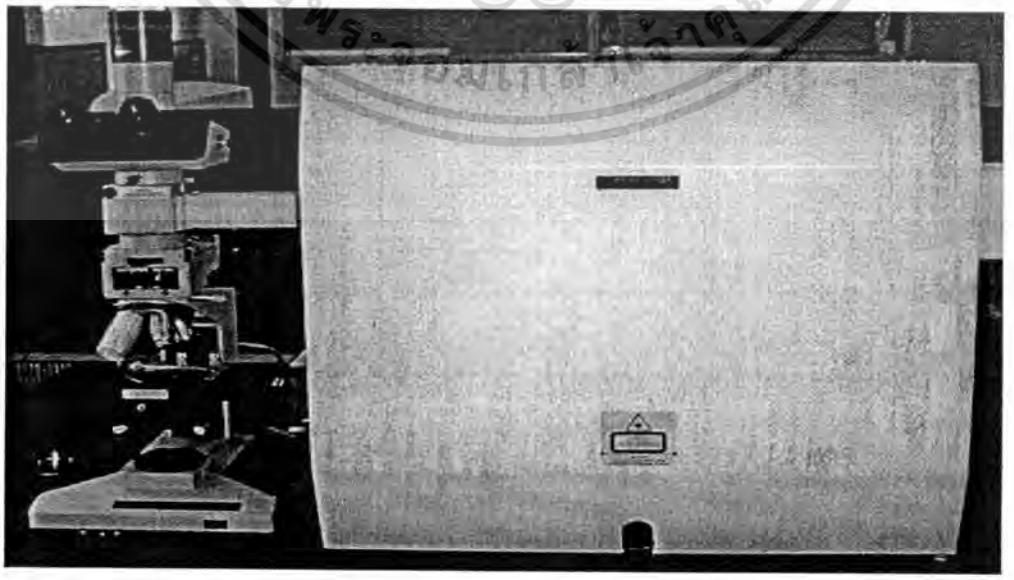
รูปที่ 5.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานที่ทำให้เกิด Raman Scattering

จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อโฟตอนจากแสงเลเซอร์ที่มีพลังงาน $h\nu_0$ ผ่านเข้าไปในอะตอมของวัสดุตัวอย่าง จะเกิดอันตรกิริยาขึ้นโดยมีการดูดกลืนพลังงานเข้าไปทำให้เกิดการรบกวนการจัดตัวของอิเล็กตรอน (electronic configuration) ทำให้อิเล็กตรอนนั้นกระโดดขึ้นไปสู่สถานะใหม่ที่เรียกว่า สถานะกระตุ้น (excitation state) ซึ่งเป็นสถานะที่ไม่เสถียร จึงต้องตกกลับลงมาสู่สถานะเดิม โดยมีการคายพลังงานออกมามีค่าเท่ากับ $h(\nu_0 - \nu_1)$ ซึ่งพลังงานที่สูญเสียไปมีค่าเท่ากับ $h\nu_1$ จะถูกใช้ไปสำหรับทำให้เกิดการสั่น (vibrational) ของอะตอมในโครงผลึก โดยพลังงาน $h\nu_1$ ที่ถูกดูดกลืนนี้จะอยู่ในย่านของอินฟราเรด ดังนั้นพลังงานที่เหลือ $h(\nu_0 - \nu_1)$ จึงเป็นพลังงานโฟตอนของแสงที่กระเจิงออกมานั่นเอง โดยสเปกตัมของแสงที่ได้ออกมาจะถูกเรียกว่า Stokes line

จากกลไกข้างต้นนี้เองจึงทำให้เทคนิค FT-Raman สามารถวิเคราะห์และตรวจสอบชนิดของวัสดุตัวอย่างได้ โดยใช้หลักการเปรียบเทียบกับสารมาตราฐานเพื่อการตรวจพิสูจน์ ซึ่งสเปกตัมของวัสดุชนิดเดียวกัน จะต้องมีลักษณะที่เหมือนกันทุกประการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเอาเทคนิค FT-Raman มาใช้เพื่อทำการวิเคราะห์ และศึกษาถึงขนาดของโครงสร้างของชั้นพอรัสซิลิกอน ซึ่งถือได้ว่าเป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับผลึกซิลิกอน จะแตกต่างกันก็ตรงที่พอรัสซิลิกอนนั้นเป็นผลึกซิลิกอนที่มีขนาดของโครงสร้างอยู่ในระดับของนาโนเมตรนั่นเอง มีผลทำให้พีกสเปกตรัมของรามานที่วัดได้จะมีความแตกต่างและมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากเนื้อผลึกซิลิกอนเดิม ทั้งนี้เนื่องมาจากใน**เนื้อของผลึกซิลิกอนปกติ** (มีอะตอมอยู่เป็นจำนวนมากคือประมาณ 10^{22} อะตอม / ลบซม.) สเปกตรัมของรามานที่วัดได้จะเป็นพลังงานที่ใช้สำหรับการสั่นของอะตอมภายในโครงผลึก ซึ่งอะตอมเหล่านี้มีโอกาสสูงที่จะถูกรบกวนจากอิทธิพลของการสั่นจากอะตอมกลุ่มอื่นๆภายในผลึกได้ ทำให้การสั่นที่เกิดขึ้นจะมีความรุนแรงสูง (strong coupling) สเปกตรัมที่ได้จึงมีความแคบมากๆ และจะปรากฏอยู่ที่ตำแหน่งความถี่ประมาณ 520 cm^{-1} แต่สำหรับ**ผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร (พอรัสซิลิกอน)** โครงสร้างภายในจะมีจำนวนอะตอมประกอบอยู่ในปริมาณที่น้อยกว่าในเนื้อผลึกซิลิกอนปกติอยู่มาก ทำให้ในการสั่นของอะตอมแต่ละตัวจะถูกรบกวนจากอิทธิพลการสั่นของอะตอมอื่นๆในปริมาณต่ำ มีผลทำให้การสั่นของอะตอม (โฟนอน) แต่ละตัวมีจะเอกลักษณ์เฉพาะตัวเป็นของตนเอง สเปกตรัมของรามานที่วัดได้จึงมีการกระจายตัวที่สูงกว่าสเปกตรัมที่วัดได้จากเนื้อผลึกซิลิกอนปกติโดยทั่วไป อีกทั้งสเปกตรัมที่ได้ก็จะมีความถี่ลดลงมีค่าที่ต่ำกว่า 520 cm^{-1} อีกด้วย ซึ่งลักษณะการกระจายตัวของสเปกตัมที่เพิ่มขึ้นและการลดลงของความถี่นี้ จะมีค่าขึ้นอยู่กับจำนวนอะตอมหรือขนาดของโครงสร้างในระดับนาโนเมตรนั่นเอง โดยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มรามานสเปกโทรมิเตอร์ (FT-Raman Spectrometer) ที่นำมาใช้วิเคราะห์นี้เป็นเครื่องของ Renishaw รุ่น System 2000 ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ในช่วงสเปกตรัม 4000 - 200 cm^{-1} ดังแสดงในรูปที่ 5.5



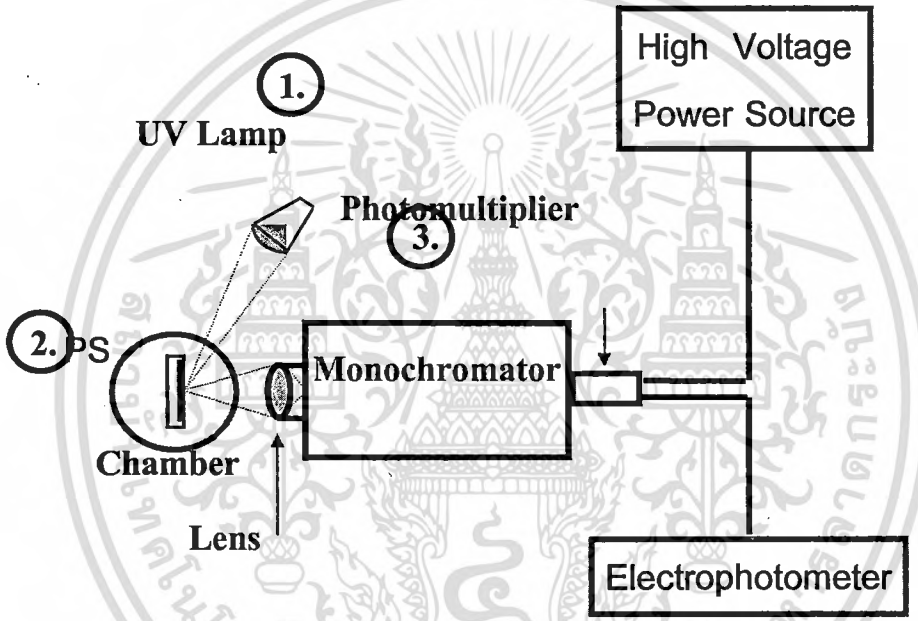
รูปที่ 5.5 แสดงภาพถ่ายของเครื่อง FT-Raman Spectrometer ของ Renishaw รุ่น System 2000

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้วัดปรากฏการณ์โฟโต้ลูมิเนสเซนซ์

อัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (Ultraviolet and Visible Spectroscopy) [25]

เป็นเทคนิคที่ใช้วัดสเปกตรัมของแสงที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิล สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยเทคนิคนี้จะให้ความถูกต้องแม่นยำ และมีสภาพความไว (sensitivity) สูง ซึ่งเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโต้มิเตอร์โดยทั่วไป จะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดงส่วนประกอบต่างๆของเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโต้มิเตอร์

จากรูปจะเห็นได้ว่า เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโต้มิเตอร์ จะประกอบด้วย

1. ต้นกำเนิดแสง (Light Source) ที่ใช้เป็น UV-Lamp ซึ่งให้แสงอุลตร้าไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร

2. เซลล์ที่ใส่วัสดุตัวอย่าง (Sample Cell)

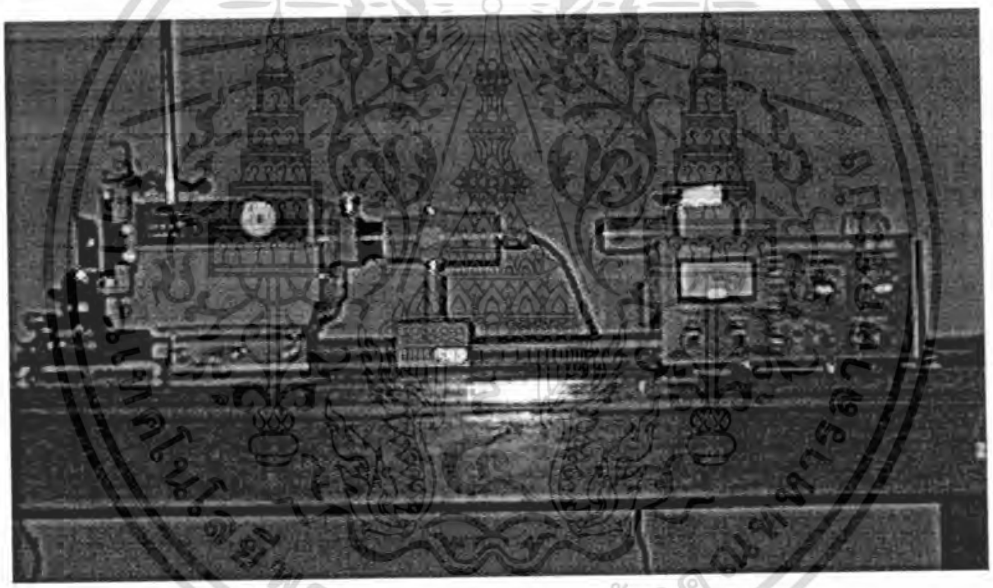
3. โมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงที่ได้ออกมาจากวัสดุตัวอย่างซึ่งในที่นี้ก็คือพอรัสซิลิกอน โดยภายในจะประกอบไปด้วย ช่องแสงผ่าน (slits) กระจกและเลนส์ (mirror & lens) ส่วนที่ใช้ทำให้แสงกระจายออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆ อันได้แก่ ฟิลเตอร์ (filters) ปริซึม (prism) และเกรตติง (grating)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

5. เครื่องขยายและวัดสัญญาณ โดยสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดจะถูกนำไปเข้ากระบวนการของระบบอิเล็กทรอนิกส์ อันได้แก่ การขยายสัญญาณให้มากขึ้น และการวัดสัญญาณไฟฟ้า (electrophotometer) เพื่อนำไปบันทึกเป็นสเปกตรัมของแสงในที่สุด

ในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี มาใช้เพื่อตรวจวัดสเปกตรัมของแสงที่ได้จากปรากฏการณ์โฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอรัสซิลิกอน โดยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโต้มิเตอร์ที่ใช้เป็นของบริษัท Nikon รุ่น G250 ดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 แสดงภาพถ่ายของเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ของ Nikon รุ่น G250

5.3 เทคนิคและเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์พันธะที่ผิวของนาโนพอรัสซิลิกอน

ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) [25]

อินฟราเรดสเปกโทรสโทปีเป็นเทคนิคอย่างหนึ่ง ที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบ พิสูจน์และศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของสาร โดยอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีจะเป็นเรื่องที่เกี่ยวกับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของสาร เมื่ออะตอมของสารดูดกลืนแสงอินฟราเรดจะมีผลทำให้อะตอมภายในโครงผลึกเกิดการสั่น และเกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะระหว่างอะตอมดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เกิดการยืด (Stretching) ของพันธะระหว่างอะตอม ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงความยาวระหว่างอะตอมที่มีพันธะต่อกัน

2. เกิดการงอ (Bending) ของพันธะระหว่างอะตอม ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงมุมระหว่างพันธะนั่นเอง

โดยในการบอกตำแหน่งของการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของอะตอมในสารใดๆนั้น นิยมบอกเป็นจำนวนคลื่น (wave number , k) โดยมีค่าดังนี้คือ

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

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

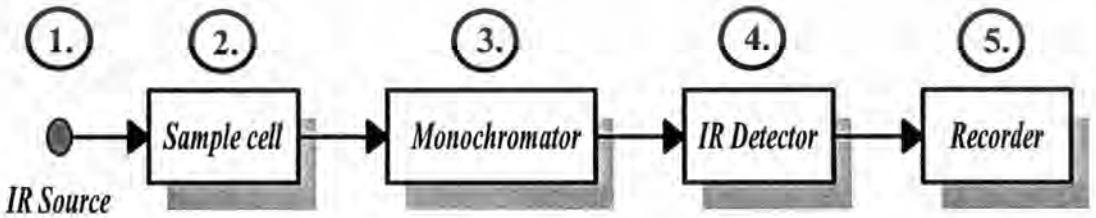
และ $\nu = ck$ (5.4)

โดยที่ ν = ความถี่

c = ความเร็วของแสง

โดยส่วนประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโต้มิเตอร์ ได้ถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 5.8 จากรูปจะเห็นได้ว่า เครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโต้มิเตอร์จะประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญคือ

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



รูปที่ 5.8 แสดงแผนภาพองค์ประกอบของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโต้มิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งวิธีการตรวจวัดโดยทั่วๆไป จะทำการบันทึกผลของค่าความเข้มของแสงต่อความถี่ หรือความยาวคลื่น หรือจำนวนคลื่น ได้ออกมาเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสง เรียกวิธีการวัดลักษณะนี้ว่า Frequency-domain spectroscopy ดังที่เห็นกันอยู่ทั่วไป แต่สำหรับการตรวจวัดการดูดกลืนแสงของพอรัสซิลิกอนนั้นได้ใช้วิธีการที่แตกต่างกันออกไป โดยจะทำการวัดความเข้มแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆกันอย่างต่อเนื่องเทียบกับเวลา เรียกวิธีการวัดในลักษณะแบบนี้ว่า Time-domain spectroscopy หรือที่โดยทั่วๆไปเรียกว่า Fourier Transform Spectroscopy นั่นเอง โดยสเปกตรัมที่ได้จากแบบ time-domain จะถูกเปลี่ยนเป็น frequency-domain ด้วย fourier transform จากการใช้ดิจิตอลคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ ซึ่งสิ่งที่ทำให้สเปกตรัมทั้งสองแบบมีความแตกต่างกันก็คือ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ได้จากการวัดแบบ frequency-domain จะเป็นสเปกตรัมที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงที่ความถี่ต่างๆกันทีละครั้งในช่วงระยะเวลาหนึ่งๆ แต่การวัดแบบการแปลงฟูเรียร์จะเป็นสเปตรัมที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงที่ความถี่ต่างๆ ในเวลาเดียวกัน ดังนั้นการแปลงฟูเรียร์จึงช่วยทำให้การวิเคราะห์มีความรวดเร็วขึ้น และการแยกสัญญาณจะดีขึ้นกว่าแบบธรรมดา

ในงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิค FTIR มาใช้เพื่อศึกษาถึงชนิดของพันธะที่บริเวณผิวของนาโนพอรัสซิลิกอน ซึ่งเทคนิคนี้สามารถใช้วิเคราะห์ชนิดของพันธะได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยเครื่อง FTIR ที่นำมาใชวิเคราะห์ได้แก่ Perkin Elmer รุ่น System 2000 ดังแสดงในรูปที่ 5.9 ซึ่งเครื่องรุ่นนี้ สามารถศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของพันธะระหว่างอะตอมต่างๆ ได้ในช่วง 1,5000 - 370 cm^{-1}

รูปที่ 5.9 แสดงภาพถ่ายของเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโต้มิเตอร์ รุ่น System 2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเนื่องจากผลึกซิลิกอนเป็นวัสดุของแข็งที่มีลักษณะเป็นมันสะท้อนแสงได้ ส่วนพอรัสซิลิกอนเป็นชั้นวัสดุที่สร้างอยู่บนผลึกซิลิกอนมีลักษณะทึบแสง ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงต้องใช้อุปกรณ์เสริมที่เรียกว่า Attenuated Total Reflectance (ATR) เข้าร่วมด้วย โดยจะนำสารตัวอย่าง (ผลึกซิลิกอน และพอรัสซิลิกอน) ไปติดอยู่กับผลึก ATR crystal ซึ่งเป็นผลึกของสารที่มีค่าดรรชนีหักเหสูงมาก และแสงอินฟราเรดผ่านได้ เช่น แกลเลียมโบรไมด์ หรือแกลเลียมไอโอไดด์ หรือ AgCl เมื่อลำแสงอินฟราเรดตกกระทบผลึกนี้เป็นมุมที่อาจเลือกได้ เช่น 30^0 45^0 หรือ 60^0 ลำแสงนั้นจะเกิดการสะท้อนอยู่ภายในมากครั้งด้วยกันที่บริเวณติดกันของสารกับผลึก แสงอินฟราเรดบางส่วนจะถูกดูดกลืน และแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับออกมาซึ่งจะถูกตรวจวัดด้วยดีเทคเตอร์ต่อไป ทำให้ท้ายสุดก็จะได้อินฟราเรดสเปกตรัมของวัสดุนั้นๆออกมา

5.4 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาปรากฏการณ์โฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนที่อุณหภูมิต่ำ

เครื่อง Cryostat

Cryostat เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการควบคุมอุณหภูมิภายในระบบ ที่ความดันต่ำ มีประโยชน์เป็นอย่างมากสำหรับการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของวัสดุ ณ.ที่อุณหภูมิต่ำ โดยหลักการทำงานของเครื่องจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับเครื่องทำความเย็นโดยทั่วๆไป เพียงแต่เครื่อง cryostat นั้นสามารถทำการลดอุณหภูมิได้ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำอยู่มาก ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญๆของเครื่องจะประกอบด้วย

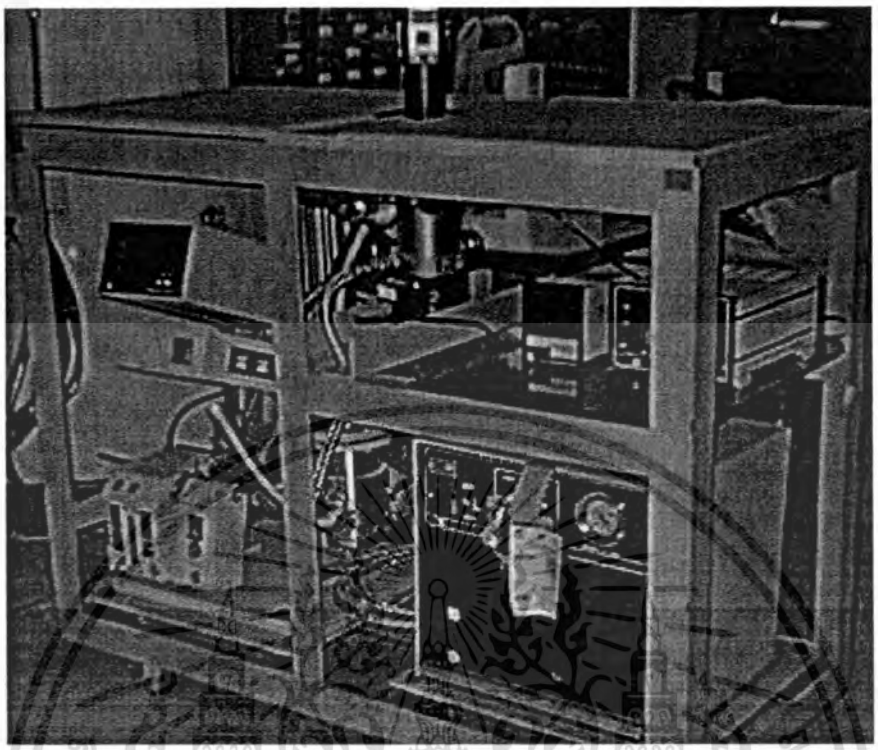
1. ภาชนะระบบปิด (Chamber) เป็นส่วนที่ใช้บรรจุวัสดุหรืออุปกรณ์ที่จะศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ณ.ที่อุณหภูมิต่ำ โดยภายในจะเป็นระบบปิดที่เป็นสุญญากาศมีความดันประมาณ 10^{-7} torr

2. คอมเพสเซอร์ (Compressor) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิภายในภาชนะระบบปิดลงอาศัยหลักการถ่ายเทความร้อนเช่นเดียวกันกับเครื่องทำความเย็นทั่วไป โดยภายในจะใช้ฮีเลียมเหลวเป็นสารทำความเย็น

3. ตัวควบคุมอุณหภูมิ (Low Temperature Controller) เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิภายในภาชนะระบบปิด ให้มีค่าตามโปรแกรมที่กำหนดไว้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 แสดงภาพถ่ายของเครื่อง Cryostat ของ LEYBOLD

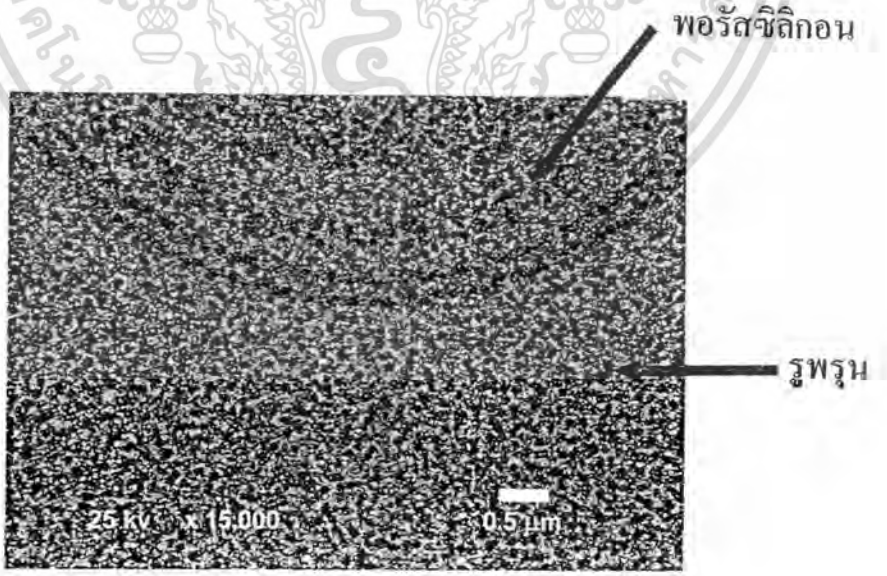
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การทดลองและผลการทดลอง

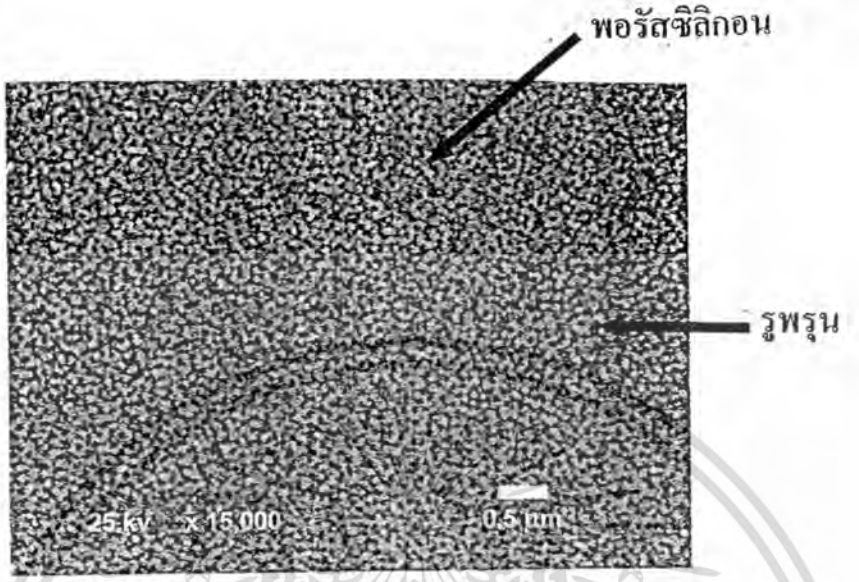
6.1 การทดลองเพื่อศึกษาโครงสร้างของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนด้วย SEM

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาถึงลักษณะโครงสร้างของชั้นพอรัสซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนทั้งชนิดพี และเอ็น ที่มีสภาพต้านทานที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร ไปจนถึง 10 โอห์ม-เซนติเมตร โดยใช้ความหนาแน่นกระแสในการ anodization มีค่าเท่ากับ 10 mA/cm^2 ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20 % และใช้เวลาในการ anodization เท่ากับ 10 นาที ซึ่งภายหลังจากการสร้างเสร็จสมบูรณ์แล้วชั้นพอรัสซิลิกอนที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) โดยลักษณะโครงสร้างที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทานค่าต่างๆจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.1 , 6.2 และ 6.3 ดังต่อไปนี้คือ

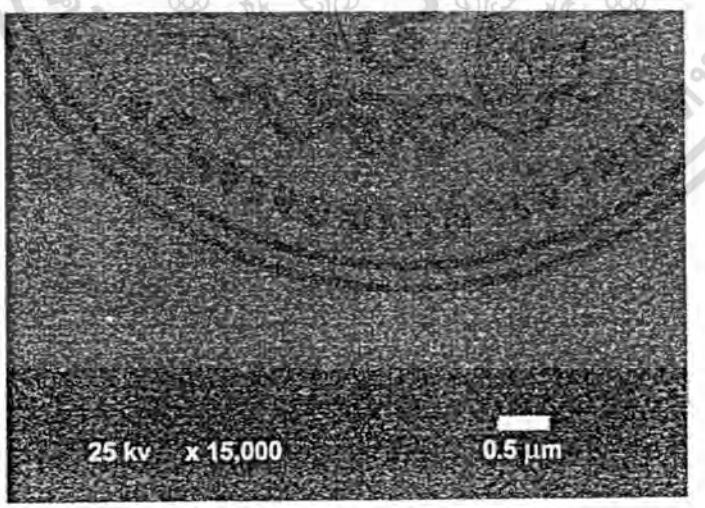


รูปที่ 6.1 แสดงภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



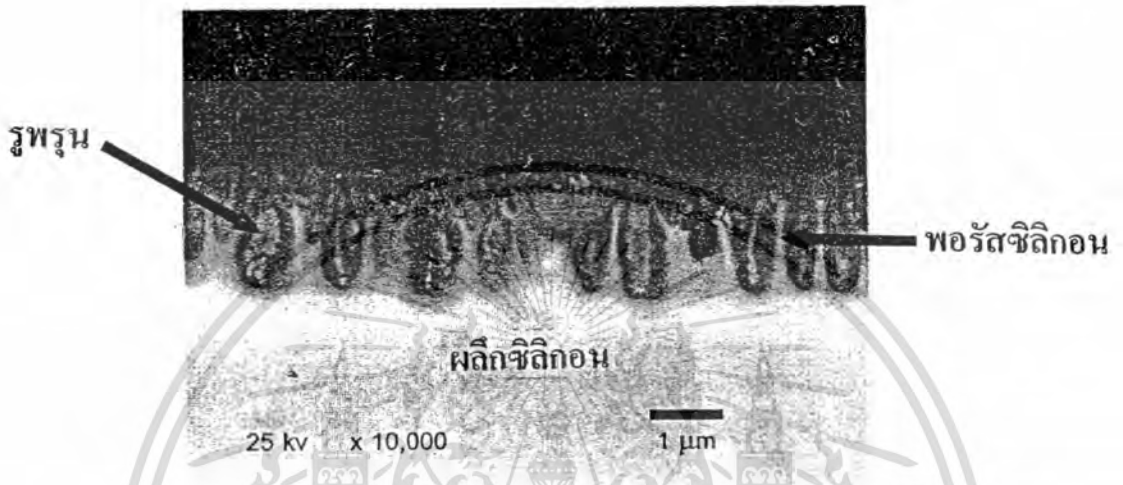
รูปที่ 6.2 แสดงภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอน ชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร



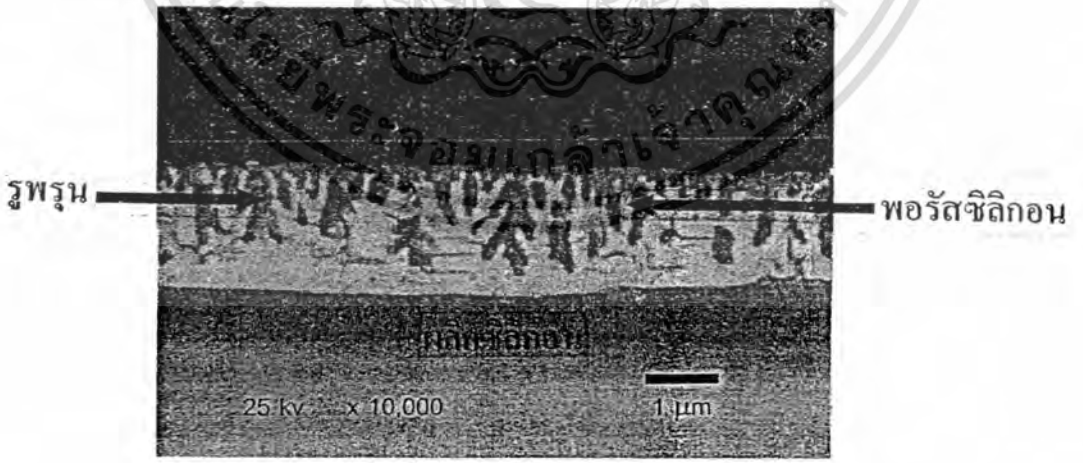
รูปที่ 6.3 แสดงภาพบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอน ชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทาน 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนโครงสร้างในลักษณะภาพตัดขวางของชั้นพอรัสซิลิกอน ที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทานค่าต่างๆ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.4 , 6.5 และ 6.6 ดังนี้คือ

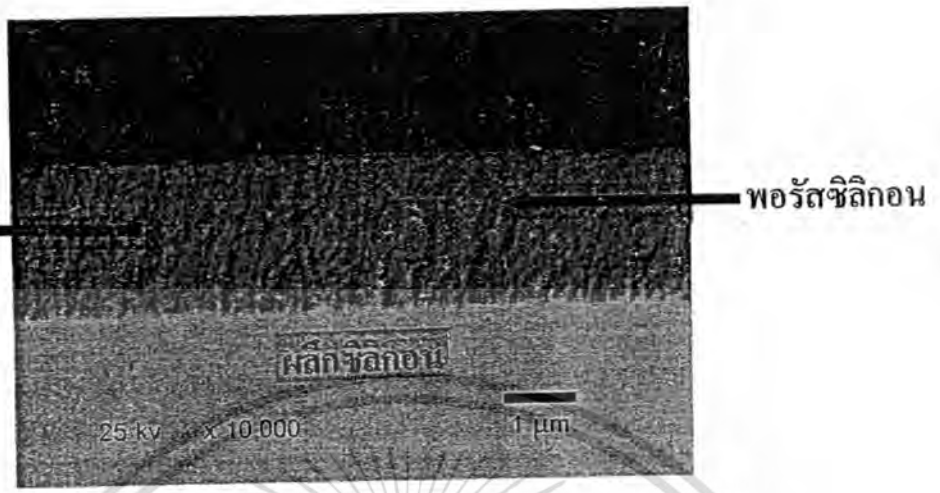


รูปที่ 6.4 แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร



รูปที่ 6.5 แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

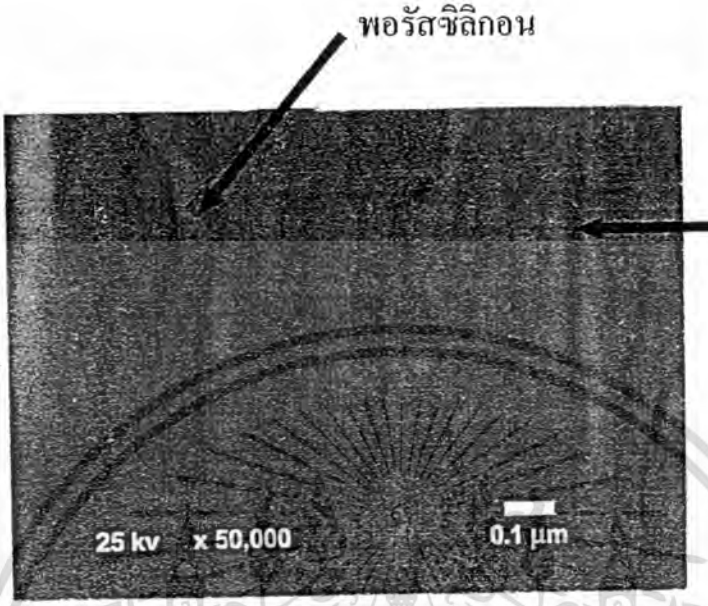


รูปที่ 6.6 แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทาน 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร

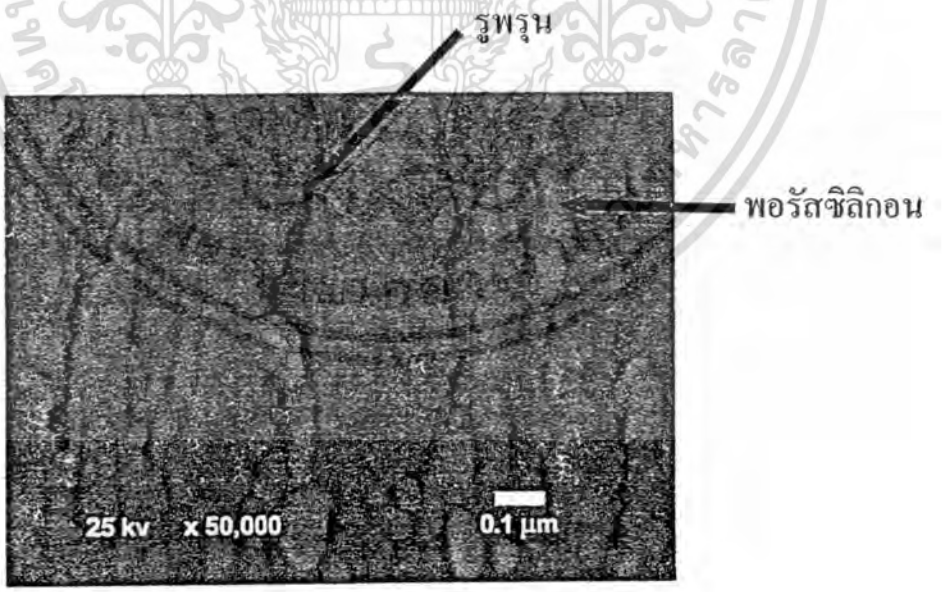
จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการลดค่าสภาพต้านทานของผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นลง จะมีผลทำให้โครงสร้างของชั้นพอรัสซิลิกอนที่เกิดขึ้นมีขนาดลดลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากการลดค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นลงนั้น เท่ากับเป็นการเพิ่มจำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้ในผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ซึ่งจะมีผลต่อความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (SCR) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการ anodization โดยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแสที่ปกคลุมอยู่รอบๆโครงสร้างของพอรัสซิลิกอนจะมีขนาดลดลง ดังนั้นจึงทำให้โครงสร้างของชั้นพอรัสซิลิกอนที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดที่เล็กลงด้วย

แต่สำหรับชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพีนั้น จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างจะมีขนาดเล็กลง ก็ต่อเมื่อได้ทำการการเพิ่มค่าสภาพต้านทานของผลึกซิลิกอนชนิดพีให้มีค่าสูงขึ้น โดยสามารถสังเกตุได้จากภาพถ่ายโครงสร้างในลักษณะภาพตัดขวางของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ที่มีค่าสภาพต้านทานเท่ากับ 1 โอห์ม-เซนติเมตร และ 10 โอห์ม-เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 6.7 และ 6.8 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มค่าสภาพต้านทานของผลึกซิลิกอนชนิดพีเท่ากับเป็นการลดจำนวนพาหะโฮลในผลึกซิลิกอน ซึ่งมีความสำคัญมากในกระบวนการกัดแบบ porous etching มีผลทำให้อัตราการกัดเนื้อผลึกซิลิกอนลดลง แต่จะมีความละเอียดในการกัดเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากโฮลจำนวนน้อยเหล่าๆนี้จะถูกสนามไฟฟ้าดึงเข้ามาทำปฏิกริยาการกัดที่บริเวณก้นหลุมของรูพรุนเป็นส่วนมาก ดังนั้นพอรัสซิลิกอนที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดของโครงสร้างที่มีความละเอียดสูงขึ้นกว่าเดิมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ที่มีสภาพต้านทาน 1 โอห์ม-เซนติเมตร

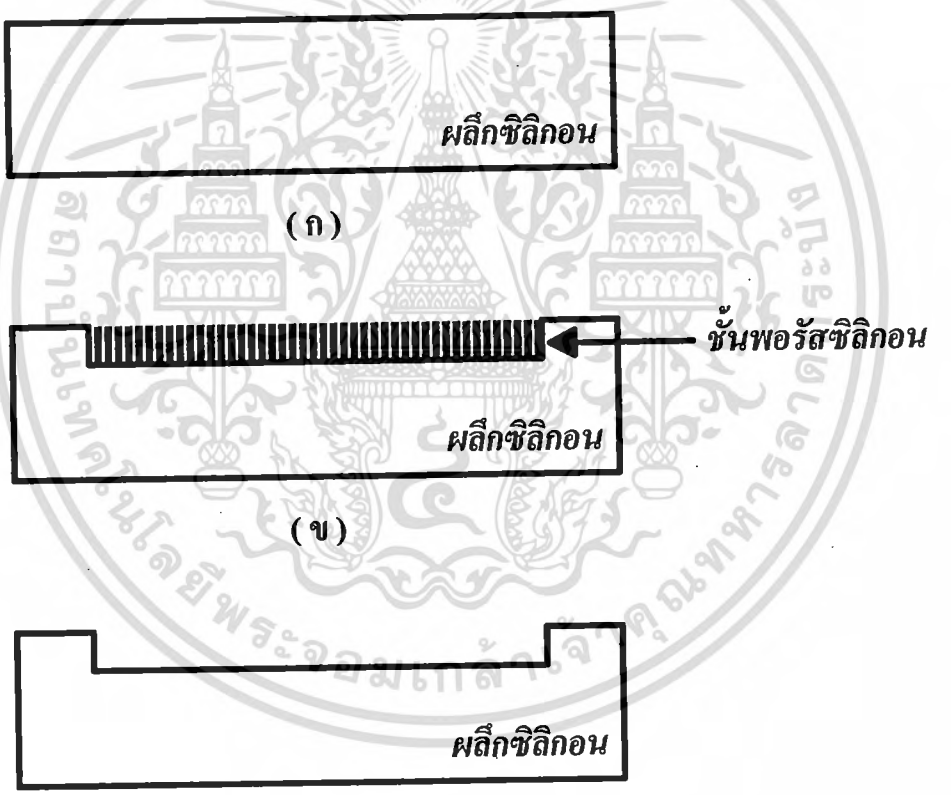


รูปที่ 6.8 แสดงภาพตัดขวางของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ที่มีสภาพต้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 การทดลองเพื่อศึกษาค่าความพรุนของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนที่เงื่อนไขในการ anodization ต่างๆ

ในการทดลองนี้ชั้นของพอรัสซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เงื่อนไขในการ anodization ต่างๆ จะถูกนำไปทำการวัดและคำนวณหาค่าเปอร์เซนต์ความพรุน (porosity) ของชั้นพอรัสซิลิกอน โดยในที่นี้ได้ใช้เทคนิคที่เรียกว่า Gravimetric method [24] ซึ่งเป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของแผ่นผลึกซิลิกอนทั้งก่อนและหลังการสร้างชั้นพอรัสซิลิกอน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 5.1.1 ซึ่งขั้นตอนในการวัดน้ำหนักของผลึกซิลิกอนเพื่อนำไปคำนวณหาค่าเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนนี้ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 แสดงภาพตัดขวางจำลองของแผ่นผลึกซิลิกอนลักษณะต่างๆที่ถูกทำการวัดน้ำหนัก เพื่อนำไปคำนวณหาค่าเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอน โดยที่

(ก) เป็นน้ำหนักของแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น (m_1)

(ข) เป็นน้ำหนักของแผ่นผลึกซิลิกอนหลังจากผ่านกระบวนการสร้างชั้นพอรัสซิลิกอน (m_2)

(ค) เป็นน้ำหนักของแผ่นผลึกซิลิกอนหลังจากทำการลอกชั้นพอรัสซิลิกอนทิ้งแล้ว (m_3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปข้างต้น จะเห็นได้ว่าตัวแปรที่สำคัญในการหาค่าเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนด้วยเทคนิคดังกล่าวนี้ คือ น้ำหนักของแผ่นผลึกซิลิกอนนั่นเอง ซึ่งมีอยู่ 3 ค่าด้วยกัน อันได้แก่

1. น้ำหนักของแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น (m_1) เป็นน้ำหนักของแผ่นผลึกซิลิกอนก่อนเข้ากระบวนการสร้างชั้นพอรัสซิลิกอนขึ้นที่บริเวณผิวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 6.9 (ก)

2. น้ำหนักของแผ่นผลึกซิลิกอนหลังจากผ่านกระบวนการสร้างชั้นของพอรัสซิลิกอน (m_2) ขึ้นที่ผิวหน้าแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 6.9 (ข)

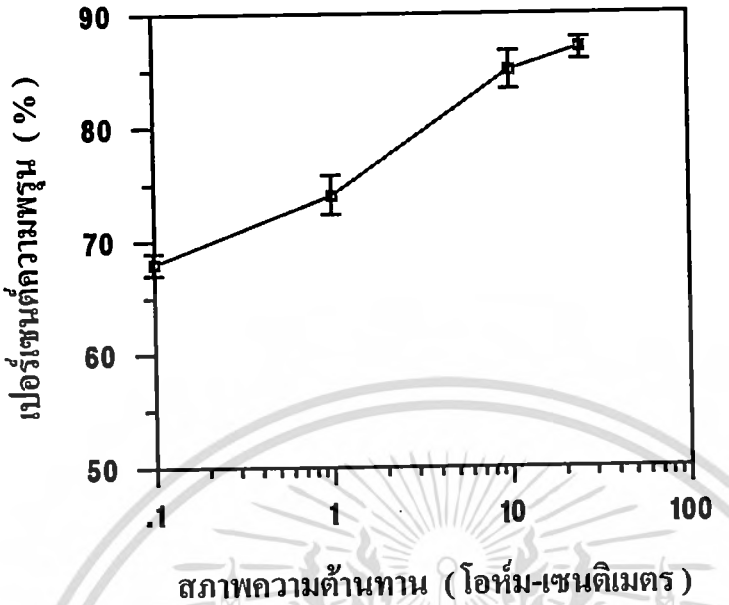
3. น้ำหนักของแผ่นผลึกซิลิกอนหลังจากทำการลอกชั้นพอรัสซิลิกอน (m_3) ที่อยู่บริเวณผิวหน้าทิ้ง โดยขั้นตอนนี้ในการทดลองจะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้น 1N เพื่อลอกชั้นของพอรัสซิลิกอนออกจากแผ่นผลึกซิลิกอน ดังแสดงในรูปที่ 6.9 (ค)

ในการทดลองน้ำหนักผลึกซิลิกอนทั้ง 3 ค่านี้ ได้ถูกทำการวัดจากเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียดสูง ของบริษัท SARTORIUS รุ่น 1602 MP เพื่อนำค่าน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณหาเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอน ตามสมการที่ 5.1 ต่อไป

6.2.1 การศึกษาผลของชนิดและสภาพต้านทานของผลึกซิลิกอนที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อความพรุนของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอน

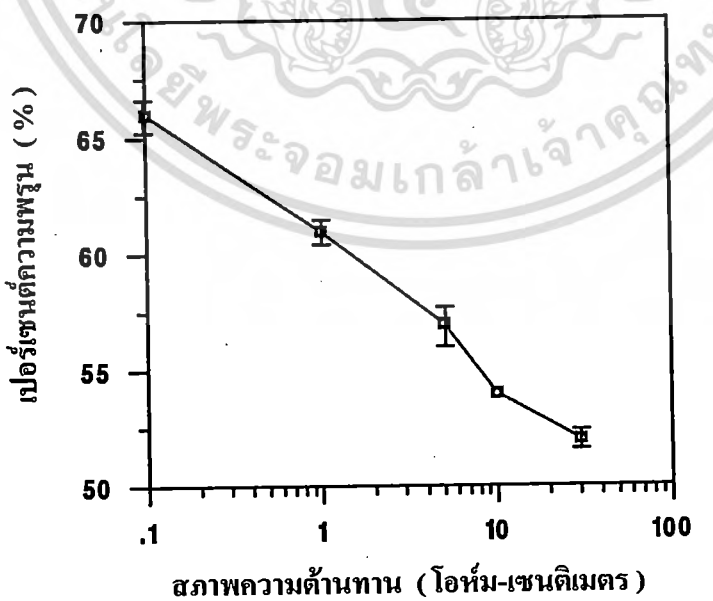
ชั้นพอรัสซิลิกอนที่นำมาศึกษาในการทดลองนี้ ได้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้ความหนาแน่นกระแส anodization มีค่าเท่ากับ 10 mA/cm^2 ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20% และใช้เวลาในการ anodization เท่ากับ 10 นาที โดยในการทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงชนิดและสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอน ที่ถูกใช้ในการ anodization เป็นแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี และชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทานตั้งแต่ 0.1โอห์ม-เซนติเมตร ไปจนถึง 30 โอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งภายหลังจากการสร้างเสร็จสมบูรณ์ชั้นของพอรัสซิลิกอนที่ได้ จะถูกนำไปผ่านขั้นตอนในการหาค่าเปอร์เซนต์ความพรุนต่อไป โดยกราฟในรูปที่ 6.10 จะแสดงเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ที่มีสภาพต้านทานค่าต่างๆ ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนกับค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี

ส่วนเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นที่มีค่าสภาพต้านทานต่างๆนั้น จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนกับค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น

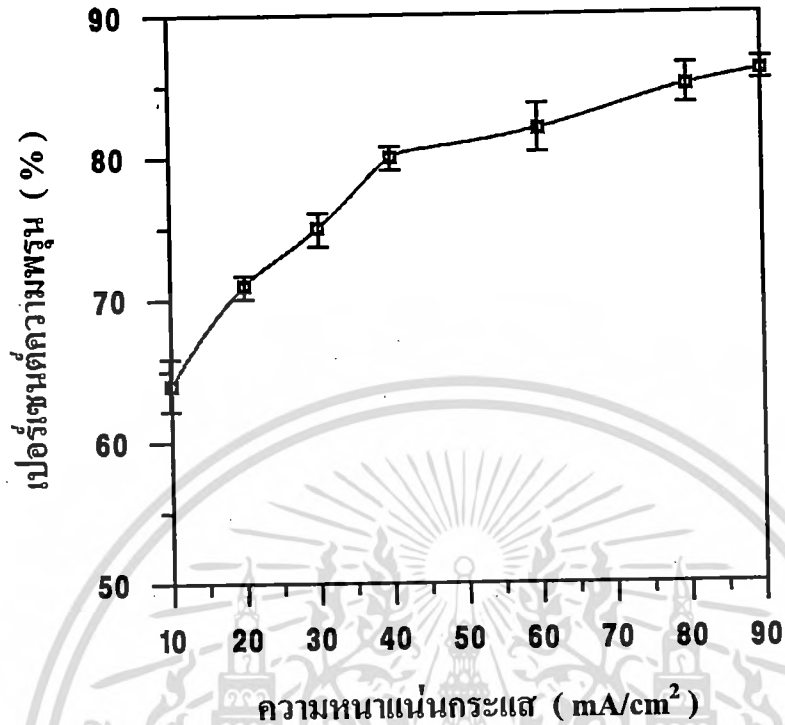
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 6.10 และ 6.11 ข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพีให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร ไปจนถึง 30 โอห์ม-เซนติเมตร จะมีผลทำให้ชั้นของพอรัสซิลิกอนที่ได้มีเปอร์เซนต์ความพรุนที่มากขึ้นกว่าเดิม คือ ตั้งแต่ 68 % ไปจนถึง 87 % ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกับชั้นของพอรัสซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ที่จะมีเปอร์เซนต์ความพรุนเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ 52 % ไปจนถึง 66 % ได้ ก็ต่อเมื่อทำการลดค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นลง จาก 30 โอห์ม-เซนติเมตร ไปจนถึง 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร และเมื่อทำการเปรียบเทียบกันระหว่างเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี และชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทานเท่าๆกัน จะพบได้ว่าชั้นของพอรัสซิลิกอน ที่ถูกสร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น จะมีเปอร์เซนต์ความพรุนที่ต่ำกว่าชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพีเสมอ นั่นแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น จะมีขนาดที่ใหญ่กว่าโครงสร้างของชั้นพอรัสซิลิกอน ที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ที่เงื่อนไขในการ anodization เดียวกัน

6.2.2 การศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อความพรุนของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอน

ชั้นพอรัสซิลิกอนที่นำมาศึกษาในกรณีนี้ จะถูกสร้างขึ้นโดยใช้เงื่อนไขในการ anodization ดังต่อไปนี้คือ ใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ระนาบ 100 มีสภาพต้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร ต่อจากนั้นทำการ anodization เป็นเวลาเท่ากับ 10 นาที ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 47% โดยในการทดลองนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้เป็นค่าต่างๆ ตั้งแต่ 10 mA/cm^2 ไปจนถึงที่ 90 mA/cm^2 ต่อจากนั้นชั้นของพอรัสซิลิกอนที่สร้างตามเงื่อนไขต่างๆ ข้างต้น ก็จะถูกนำไปผ่านขั้นตอนในการวัดและคำนวณหาค่าเปอร์เซนต์ความพรุน ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนที่ความหนาแน่นกระแสต่างๆ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



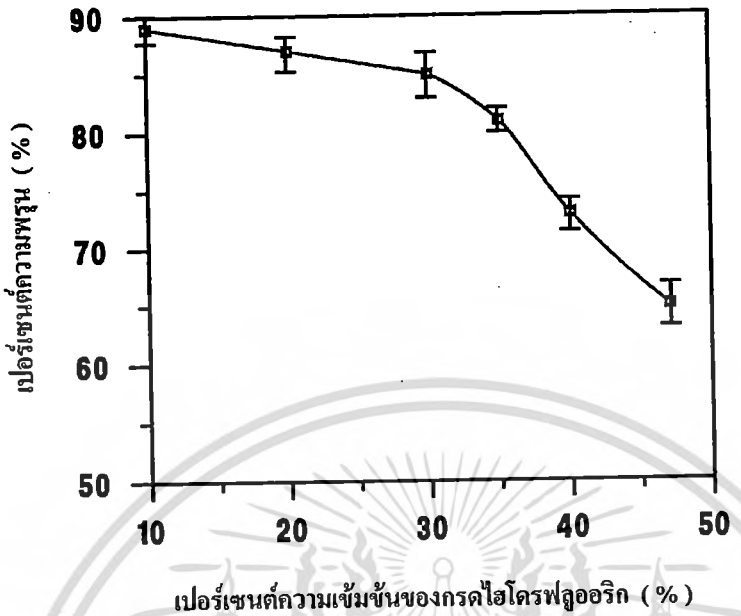
รูปที่ 6.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนกับค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า ชั้นพอรัสซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นมาจะมีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ 64 % ไปจนถึง 86 % เมื่อทำการเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส anodization ให้มีค่าสูงขึ้น ตั้งแต่ 10 mA/cm^2 ไปจนถึง 90 mA/cm^2 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความหนาแน่นกระแส มีผลทำให้ปฏิกริยาการกัดเนื้อผลึกซิลิกอนมีค่าที่สูงขึ้นด้วย ทำให้สามารถลดขนาดโครงสร้างพอรัสซิลิกอนลงไปได้อีก ซึ่งจะไปมีผลต่อความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนที่จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง

6.2.3 การศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อความพรุนของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอน

ชั้นพอรัสซิลิกอนที่ใช้เพื่อการศึกษาในกรณีนี้ จะถูกสร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ระนาบ 100 มีสภาพต้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร โดยใช้ความหนาแน่นกระแส anodization มีค่าเท่ากับ 10 mA/cm^2 และใช้เวลาเท่ากับ 10 นาที ในการทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซนต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกที่ใช้เป็น 10% , 20% , 30% , 35% , 40% และ 47% ตามลำดับ ชั้นของพอรัสซิลิกอนที่ได้จากการสร้างตามเงื่อนไขต่างๆเหล่านี้ จะถูกนำไปทำการวัดน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเพื่อคำนวณหาเปอร์เซนต์ความพรุน ซึ่งผลที่ได้จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



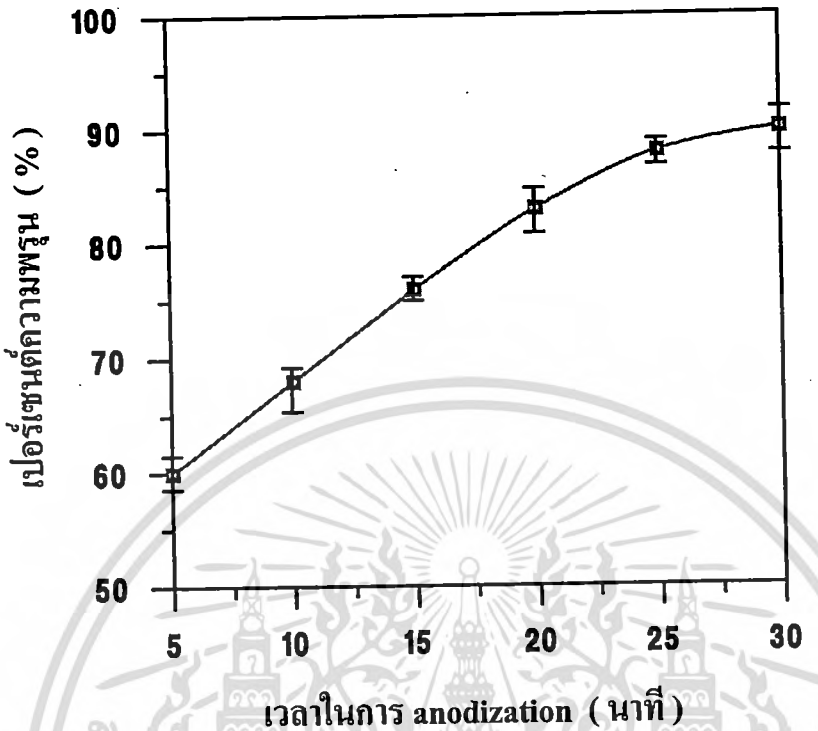
รูปที่ 6.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนกับปริมาณความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ที่ใช้ในระหว่างการ anodization

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 6.13 ข้างต้น จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการลดเปอร์เซนต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกที่ใช้ในระหว่างการ anodization ลง จาก 47 % ไปจนถึง 10 % จะมีผลทำให้ชั้นพอรัสซิลิกอนที่เกิดขึ้นมีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนเพิ่มสูงขึ้น คือ ตั้งแต่ 65 % ไปจนถึง 89 % ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการลดความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกเท่ากับเป็นการลดจำนวนอิออนของฟลูออรีนลงด้วย ทำให้โฮลที่อยู่ภายในผลึกซิลิกอนมีจำนวนที่มากกว่า ดังนั้นปฏิกริยาในการกัดจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นได้ ซึ่งจะไปมีผลทำให้ขนาดโครงสร้างพอรัสซิลิกอนลดลงนั่นเอง

6.2.4 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization ที่มีต่อความพรุนของชั้นน าโนพอรัสซิลิกอน

ชั้นพอรัสซิลิกอนที่นำมาทำการศึกษาจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้เงื่อนไขในการ anodization ดังต่อไปนี้คือ ใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ระนาบ 100 มีสภาพต้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร ความหนาแน่นกระแสที่ใช้มีค่าเท่ากับ 10 mA/cm^2 ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 47% โดยในการทดลองได้มีการเปลี่ยนแปลงค่าเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization เป็นค่าต่างๆ ตั้งแต่ 5 นาที จนไปถึง 30 นาที ชั้นของพอรัสซิลิกอนที่ได้จากการสร้างตามเงื่อนไขเหล่านี้จะมีเปอร์เซนต์ความพรุนที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงผลเอาไว้ในรูปที่ 6.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนกับเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 6.14 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มเวลา anodization จาก 5 นาที ไปจนถึง 30 นาที จะมีผลทำให้ชั้นพอรัสซิลิกอนที่เกิดขึ้นมีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนสูงขึ้น จาก 60 % ไปถึง 90 % ได้ ทั้งนี้เนื่องจากการลดลงของขนาดโครงสร้างพอรัสซิลิกอนนั่นเอง

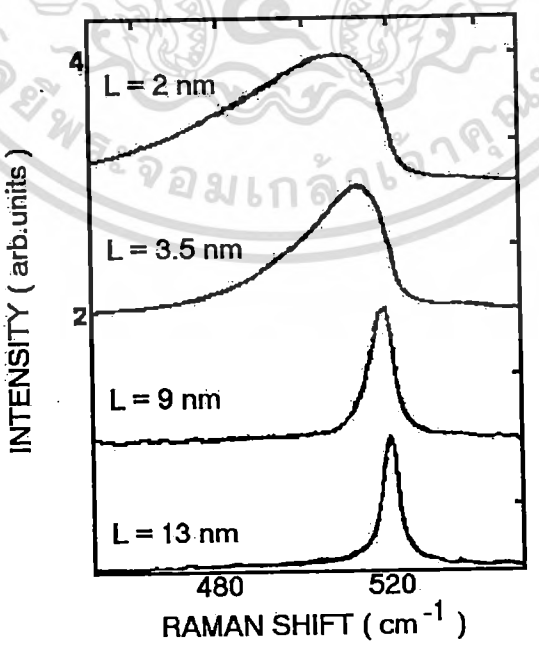
จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 6.2.1 , 6.2.2 , 6.2.3 และ 6.2.4 ที่แสดงข้างต้นจะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการ anodization ต่างๆ อันได้แก่ การเพิ่มค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพีตั้งแต่ 0.1-30 โอห์ม-เซนติเมตร หรือการลดค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นตั้งแต่ 30-1 โอห์ม-เซนติเมตร การเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสตั้งแต่ 10-90 mA/cm^2 การลดปริมาณความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกตั้งแต่ 47%-10% หรือการเพิ่มเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization ตั้งแต่ 5-30 นาที นั้น จะมีผลทำให้ชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นมีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนเพิ่มสูงขึ้นจากเดิมตั้งแต่ 54% ไปจนถึง 90% ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าเปอร์เซนต์ความพรุนนี้เกี่ยวข้องกับการลดลงของขนาดโครงสร้างพอรัสซิลิกอน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.5 และเพื่อเป็นการยืนยันผลที่เกิดขึ้นดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาขนาดของโครงสร้างพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนต่างๆ ในผลการทดลองหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 การทดลองเพื่อศึกษาขนาดของโครงสร้างพอรัสซิลิกอนที่เปอร์เซนต์ความพรุนต่างๆ

ในการหาขนาดของโครงสร้างพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนต่างๆ โดยทำการศึกษาและวิเคราะห์จากรูปภาพที่ได้จากเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) นั้น พบว่ายังให้ความละเอียดในการวิเคราะห์ที่ไม่เพียงพอ เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านกำลังขยายและความสามารถของเครื่อง ซึ่งโดยทั่วไปในการวิเคราะห์หาขนาดของโครงสร้างของวัสดุใดๆในระดับนาโนเมตร มักจะนิยมใช้เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ซึ่งมีกำลังขยายและความสามารถของเครื่องที่สูงกว่าเครื่อง SEM อยู่มาก แต่เทคนิคดังกล่าวนี้มีความยุ่งยากในการเตรียมสารตัวอย่าง เนื่องจากจะต้องทำให้สารตัวอย่างมีความบางมากๆก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ อีกทั้งเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ชนิดนี้มีอยู่เพียงไม่กี่เครื่องในประเทศไทย ดังนั้นในการหาขนาดของพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนต่างๆ ในการทดลองนี้จึงได้นำเทคนิครามานสเปกโทรสโทปีมาใช้ในการวิเคราะห์แทน ดังที่ได้กล่าวถึงหลักการของเทคนิคนี้มาแล้วในหัวข้อที่ 5.1.3

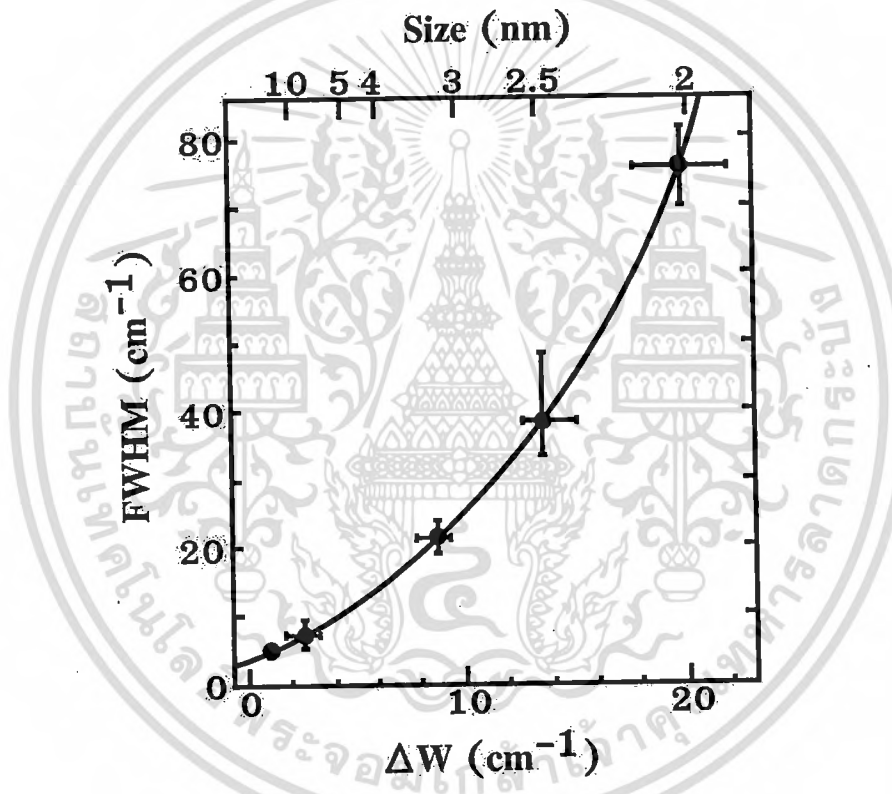
เริ่มต้นการทดลองได้ทำการสร้างชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนค่าต่างๆขึ้นมาโดยใช้เงื่อนไขในการ anodization ที่แตกต่างกัน ต่อจากนั้นจึงนำชั้นพอรัสซิลิกอนเหล่านี้ไปทำการวัดสเปกตรัมรามาน ซึ่งสเปกตรัมรามานของพอรัสซิลิกอนที่ได้ออกมา จะถูกนำไปเปรียบเทียบเพื่อหาขนาดของโครงสร้างพอรัสซิลิกอน กับสเปกตรัมรามานของผลึกซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยตรงให้มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรค่าต่างๆที่แน่นอนที่ได้ถูกรายงานไว้โดย Kanemitsu [11] ดังแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 แสดงสเปกตรัมรามานของผลึกซิลิกอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรต่างๆ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 6.16 แสดงความสัมพันธ์ระว่างค่าความกว้างที่ครึ่งของความสูง และค่าการเปลี่ยนแปลงลดลงของความถี่สัญญาณสเปกตรัมรามาน กับขนาดของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตร [11]

ในส่วนของชั้นพอรัสซิลิกอนที่นำมาศึกษาในการทดลองนี้ ได้ถูกทำการสร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ที่มีค่าสภาพต้านทานเท่ากับ 10 โอห์ม-เซนติเมตร โดยมีการใช้เงื่อนไขในการ anodization ที่แตกต่างกันออกไป เพื่อให้ได้ชั้นของพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนค่าต่างๆ ดังแสดงเอาไว้ในตารางที่ 6.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

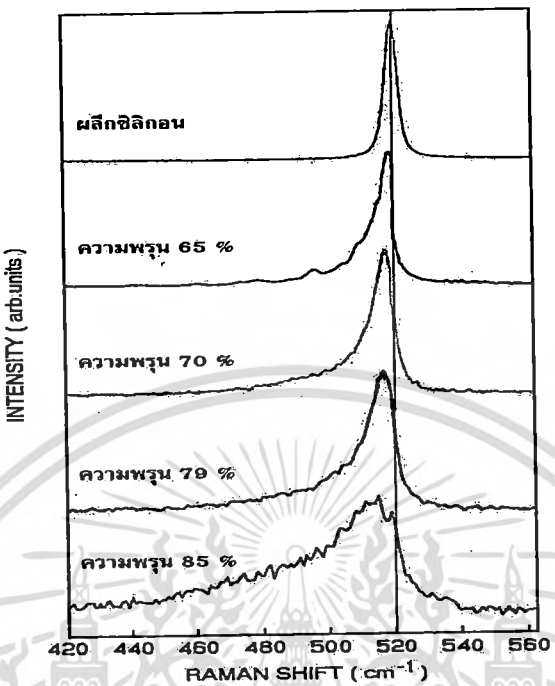
ตารางที่ 6.1

แสดงเงื่อนไขในการ anodization เพื่อสร้างชั้นของพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนค่าต่างๆ

เงื่อนไขในการ anodization				เปอร์เซนต์ความพรุน (%)
สภาพต้านทาน (Ω-cm)	ความหนาแน่นกระแส (mA/cm^2)	HF (%)	เวลา (นาที)	
10 Ω-cm	10 mA/cm^2	47 %	10 นาที	≈ 65 %
10 Ω-cm	20 mA/cm^2	47 %	10 นาที	≈ 70 %
10 Ω-cm	10 mA/cm^2	35 %	10 นาที	≈ 79 %
10 Ω-cm	10 mA/cm^2	47 %	20 นาที	≈ 85 %

ต่อจากนั้นจึงนำชั้นพอรัสซิลิกอนเหล่านี้ ไปทำการวัดสเปกตรัมรามานด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มรามานสเปกโทรมิเตอร์ (FT-Raman Spectrometer) ของ Renishaw รุ่น System 2000 ซึ่งผลการวัดสเปกตรัมรามานของชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนต่างๆ เปรียบเทียบกับสเปกตรัมรามานของผลึกซิลิกอน ได้ถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.17 แสดงสเปกตรัมรามานของพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนค่าต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่า สเปกตรัมรามานของพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนที่แตกต่างกัน จะมีค่าความกว้างที่ครึ่งของความสูงสเปกตรัม (FWHM) และมีค่าการเปลี่ยนแปลงลดลงของความถี่สัญญาณสเปกตรัมรามาน ($\Delta\omega$) ที่แตกต่างกันออกไปด้วย ซึ่งค่าทั้งสองนี้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 6.16 แล้ว ทำให้สามารถทราบถึงขนาดโครงสร้างของพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ค่าต่างๆได้ ดังสรุปข้อมูลต่างๆเอาไว้ในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2

แสดงข้อมูลต่างๆของสเปกตรัมรามานของชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนค่าต่างๆ

เปอร์เซนต์ความพรุน (%)	รามานชิฟท์ (cm^{-1})	$\Delta\omega$ (cm^{-1})	FWHM (cm^{-1})	ขนาด * (nm)
ผลึกซิลิกอน	520	0	3	-
≈ 65 %	519	1	5	≈ 13
≈ 70 %	517	3	7.5	≈ 8
≈ 79 %	516	4	10	≈ 5
≈ 85 %	512	8	25	≈ 3

* ตัวเลขได้มาจากการเปรียบเทียบข้อมูลกับกราฟในรูปที่ 6.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

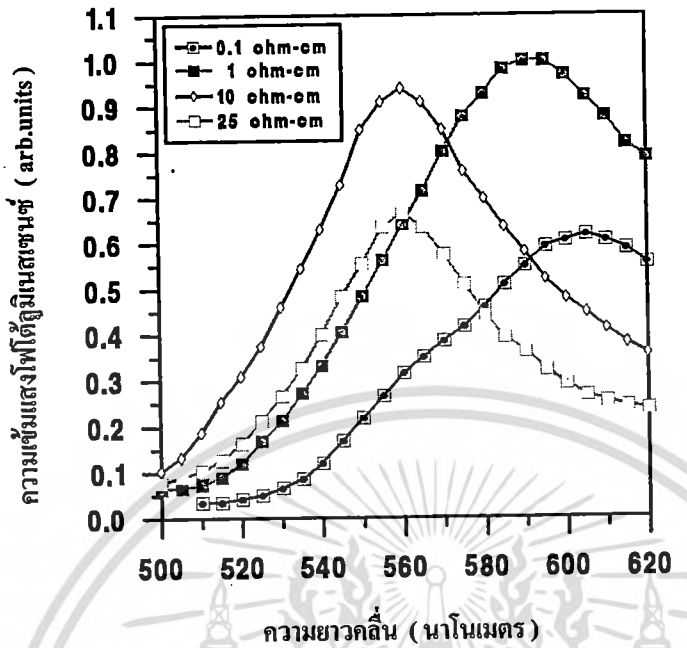
จากตารางที่ 6.2 ข้างต้น จะเห็นได้ว่าเมื่อชั้นพอรัสซิลิกอนมีเปอร์เซนต์ความพรุนสูงขึ้น คือ ตั้งแต่ 65% ถึง 85% นั้น สเปกตรัมรามานที่ได้จะมีการกระจายตัวมากขึ้นกว่าเดิม โดยสามารถสังเกตุได้จากค่าความกว้างที่ครึ่งความสูงสเปกตรัม (FWHM) ที่มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5 cm^{-1} ไปถึง 25 cm^{-1} และมีค่าการเปลี่ยนแปลงลดลงของความถี่สัญญาณสเปกตรัมรามาน ($\Delta\omega$) มากขึ้น คือตั้งแต่ 1 cm^{-1} ไปถึง 8 cm^{-1} เมื่อเปรียบเทียบกับสเปกตรัมรามานของผลึกซิลิกอนซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง 520 cm^{-1} และจากการนำข้อมูลเหล่านี้ไปเปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 6.16 นั้น พบว่าพอรัสซิลิกอนจะมีขนาดของโครงสร้างเล็กลงๆ เมื่อเปอร์เซนต์ความพรุนมีค่าสูงขึ้น โดยชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซนต์ความพรุน 65% จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ประมาณ 13 นาโนเมตร ค่าเปอร์เซนต์ความพรุน 75% มีขนาดของโครงสร้างประมาณ 8 นาโนเมตร ค่าเปอร์เซนต์ความพรุน 79% มีขนาดของโครงสร้างประมาณ 5 นาโนเมตร และค่าเปอร์เซนต์ความพรุน 85% จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ประมาณ 3 นาโนเมตร การลดลงของขนาดโครงสร้างพอรัสซิลิกอนในระดับนาโนเมตรนี้ จะมีผลต่อขนาดช่องว่างพลังงานของพอรัสซิลิกอน เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ Quantum wire effect ซึ่งเราสามารถศึกษาปรากฏการณ์นี้ได้จากคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอน จากผลการทดลองในหัวข้อต่อไป

6.4 การทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนที่เงื่อนไขในการ anodization ต่างๆ

6.4.1 การศึกษาผลของชนิดและสภาพต้านทานของผลึกซิลิกอนที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของนาโนพอรัสซิลิกอน

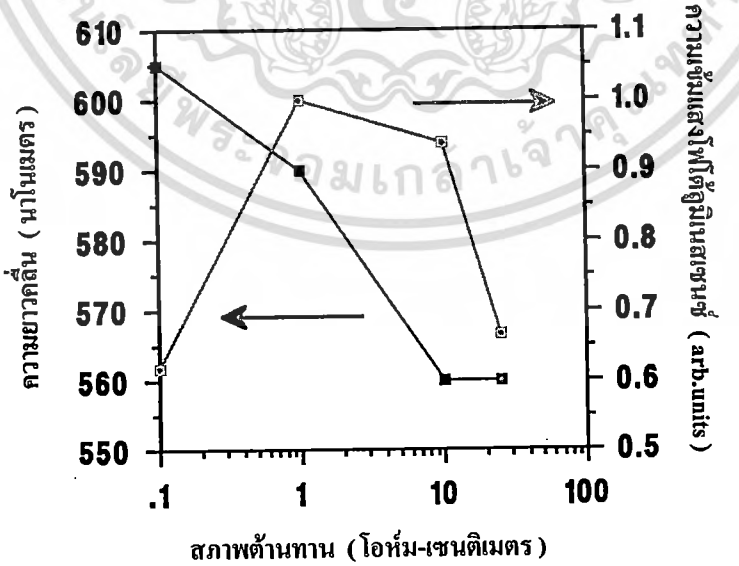
พอรัสซิลิกอนที่นำมาทำการศึกษาในกรณีนี้ ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เงื่อนไขในการ anodization เดียวกันกับหัวข้อการทดลองที่ 6.2.1 คือใช้ความหนาแน่นกระแสในการ anodization มีค่าเท่ากับ 10 mA/cm^2 ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20 % และใช้เวลาในการ anodization เท่ากับ 10 นาที โดยในการทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงชนิดและสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนที่ใช้ในระหว่างการ anodization เป็นแผ่นผลึกซิลิกอน ชนิดพีและชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทานตั้งแต่ 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร ไปจนถึง 30 โอห์ม-เซนติเมตร โดยกราฟในรูปที่ 6.18 จะแสดงสเปกตรัมของแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอน ที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพีที่มีสภาพต้านทานค่าต่างๆ ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.18 แสดงสเปกตรัมแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนชนิดพีที่มีค่าสภาพต้านทานค่าต่างๆ

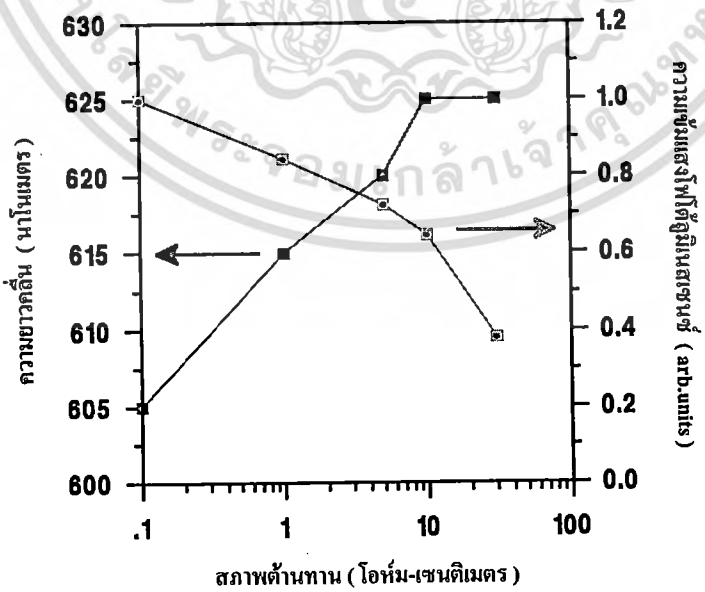
ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี จะแสดงในรูปที่ 6.19



รูปที่ 6.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 6.19 จะเห็นได้ว่าความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อทำการเพิ่มค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี จาก 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร ไปสู่ 1 โอห์ม-เซนติเมตร โดยความเข้มแสงจะมีค่าสูงสุดที่สภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนมีค่าประมาณ 1 โอห์ม-เซนติเมตร ต่อจากนั้นความเข้มแสงก็จะเริ่มมีค่าลดลงเมื่อสภาพต้านทานมีค่าสูงกว่า 1 โอห์ม-เซนติเมตร ขึ้นไป ในส่วนของความยาวคลื่นนั้นก็พบว่าแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่ให้ออกมาจากพอรัสซิลิกอนจะมีการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นลดลงจาก 605 นาโนเมตร ไปสู่ 560 นาโนเมตร หรืออีกความหมายหนึ่งก็คือมีการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานโฟตอนของยอดสเปกตรัมเพิ่มขึ้นจาก 2.05 eV ไปถึง 2.21 eV เมื่อค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพีมีค่าเพิ่มขึ้นแตกต่างจากพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ซึ่งในระหว่างการ anodization ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นจะไม่ถูกกัดโดยสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกแต่อย่างไร ดังนั้นในระหว่างการ anodization จึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงให้กับแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น (photoanodization) ด้วย ทั้งนี้ก็เพื่อที่จะใช้แสงเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดพาหะนำกระแสขึ้นภายในผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ซึ่งจะมีผลทำให้สามารถทำการกัดผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนให้เกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็กได้ ด้วยเทคนิคดังกล่าวข้างต้นนี้เองจึงทำให้พอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นสามารถที่จะแสดงคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ได้ เช่นเดียวกันกับพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี โดยความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นเป็นไปตามกราฟในรูปที่ 6.20



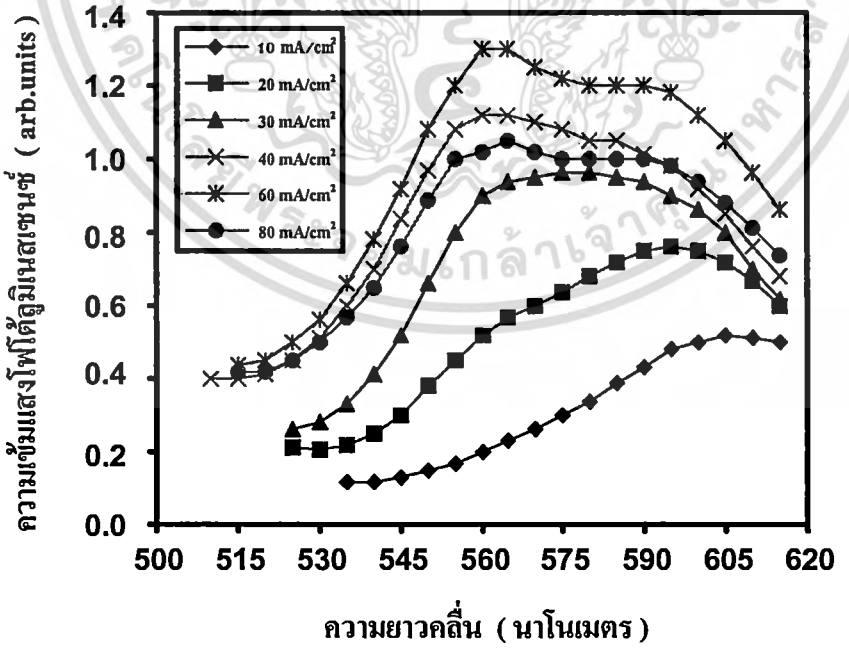
รูปที่ 6.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟข้างต้นจะเห็นได้ว่าความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นมีค่าลดลง ในส่วนของความยาวคลื่นพบว่าแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่ให้ออกมาจากพอรัสซิลิกอน จะมีความยาวคลื่นลดลงจาก 625 นาโนเมตร ไปสู่ 605 นาโนเมตร หรือมีค่าพลังงานโฟตอนของยอดสเปกตรัมเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจาก 1.98 eV ไปถึง 2.05 eV เมื่อทำการลดค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็นลง

6.4.2 การศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของนาโนพอรัสซิลิกอน

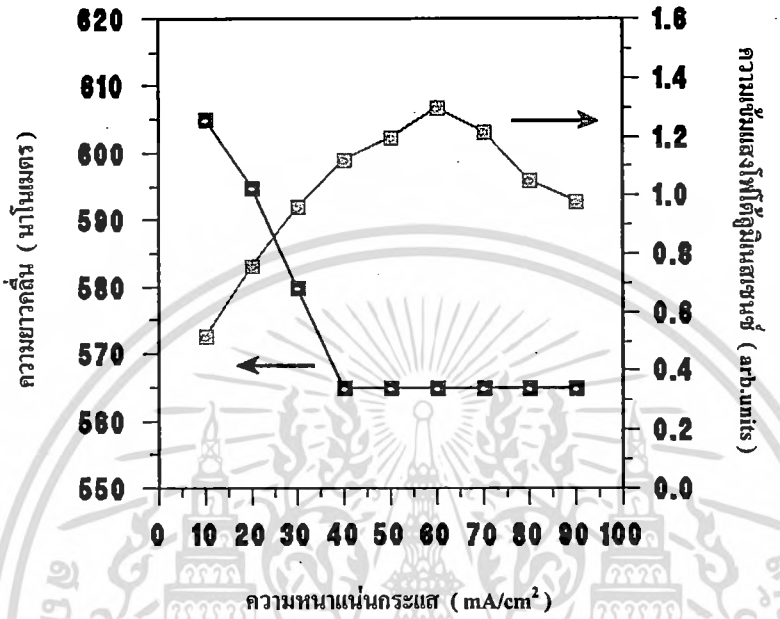
พอรัสซิลิกอนที่นำมาทำการศึกษาในกรณีนี้ได้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เงื่อนไขในการ anodization เช่นเดียวกันกับในหัวข้อการทดลองที่ 6.2.2 ดังต่อไปนี้คือ ใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพีระนาบ 100 มีสภาพต้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร เป็นวัสดุเริ่มต้น ต่อจากนั้นทำการ anodization เป็นเวลาเท่ากับ 10 นาที ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 47 % โดยในการทดลองได้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้เป็นค่าต่างๆ ตั้งแต่ 10 mA/cm^2 จนไปถึงที่ 90 mA/cm^2 พอรัสซิลิกอนที่ได้จากการสร้างตามเงื่อนไขข้างต้นเหล่านี้ จะให้สเปกตรัมแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงในรูปที่ 6.21



รูปที่ 6.21 แสดงสเปกตรัมของแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้ความหนาแน่นกระแสค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับความหนาแน่นกระแสนั้น จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.22



รูปที่ 6.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในระหว่างการ anodization

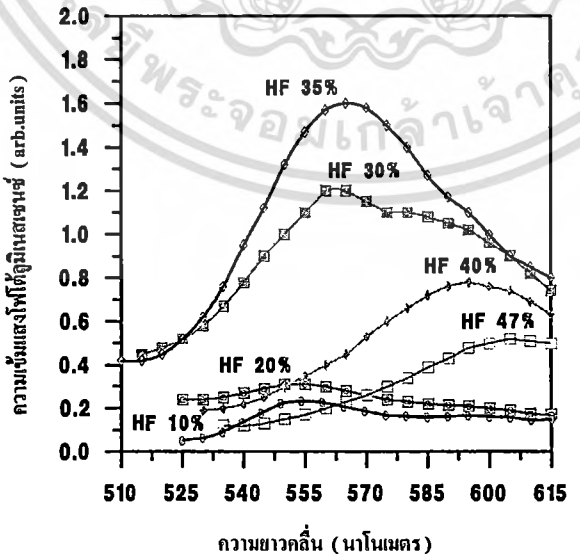
จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 6.22 จะเห็นได้ว่าแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่ให้ออกมาจากพอรัสซิลิกอนนั้น จะมีความเข้มแสงสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization ให้มีค่ามากขึ้น จนมาถึงจุดที่ความหนาแน่นกระแสมีค่าเท่ากับ 60 mA/cm^2 ซึ่งจะเป็นจุดที่ความเข้มแสงที่ให้ออกมาจากพอรัสซิลิกอนมีค่าสูงที่สุด ทั้งนี้เป็นผลจากการที่พอรัสซิลิกอนถูกสร้างขึ้นให้เปอร์เซนต์ความพรุนสูงขึ้นนั้นจะมีพื้นที่ในการเปล่งแสงมากขึ้นด้วยทำให้ความเข้มแสงที่ได้จึงมีปริมาณสูงขึ้น ต่อจากนั้นความเข้มแสงก็จะเริ่มมีค่าที่ลดลง เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในระหว่างการ anodization มีค่าสูงเกินกว่า 60 mA/cm^2 ขึ้นไปเป็นทั้งนี้เป็นผลจากการที่โครงสร้างพอรัสซิลิกอนมีความอ่อนแอของโครงสร้างนั่นเอง ในส่วนของความยาวคลื่นนั้นก็พบว่าแสงที่ให้ออกมาจากพอรัสซิลิกอนจะมีการเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นไปยังด้านที่มีความยาวคลื่นค่าที่สั้นกว่า กล่าวคือความยาวคลื่นจะมีค่าลดลงจาก 605 นาโนเมตร ไปสู่ 565 นาโนเมตร หรือมีการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานโฟตอนของยอดสเปกตรัมเพิ่มขึ้นจาก 2.05 eV ไปสู่ 2.19 eV เมื่อทำการเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในระหว่างการ anodization ให้มีค่าสูงขึ้น คือตั้งแต่ 10 mA/cm^2 จนไปถึง 40 mA/cm^2 ต่อจากนั้นความยาวคลื่นที่ลดลงก็จะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง โดยจะมีค่าอยู่ที่ 565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นาโนเมตร ตลอด เมื่อความหนาแน่นกระแสที่ใช้มีค่าสูงเกินกว่า 40 mA/cm^2 ขึ้นไป ซึ่งการเปลี่ยนแปลงลดลงของความยาวคลื่นนี้สามารถที่จะอธิบายได้ว่า การเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization ให้มีค่าสูงขึ้น มีผลทำให้พอรัสซิลิกอนที่ได้มีความพรุนมากขึ้นทำให้โครงสร้างภายในของชั้นพอรัสซิลิกอนในส่วนของนาโนพอรัสซิลิกอนมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนสามารถเกิดปรากฏการณ์ quantum size effect ทำให้ช่องว่างแถบพลังงานภายในชั้นพอรัสซิลิกอนมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม ดังนั้นเมื่อพาหะนำกระแสถูกกระตุ้นจากพลังงานภายนอกจนสามารถเปลี่ยนสถานะขึ้นไปอยู่ระดับพลังงานที่สูงขึ้น และเกิดการรวมตัวแบบเปล่งแสงในที่สุดจึงมีโอกาศ สูงที่พอรัสซิลิกอนจะสามารถให้แสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่มีความยาวคลื่นที่สั้นกว่าเดิมออกมาได้

6.4.3 การศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ใช้ในการ anodization ที่มีต่อคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของนาโนพอรัสซิลิกอน

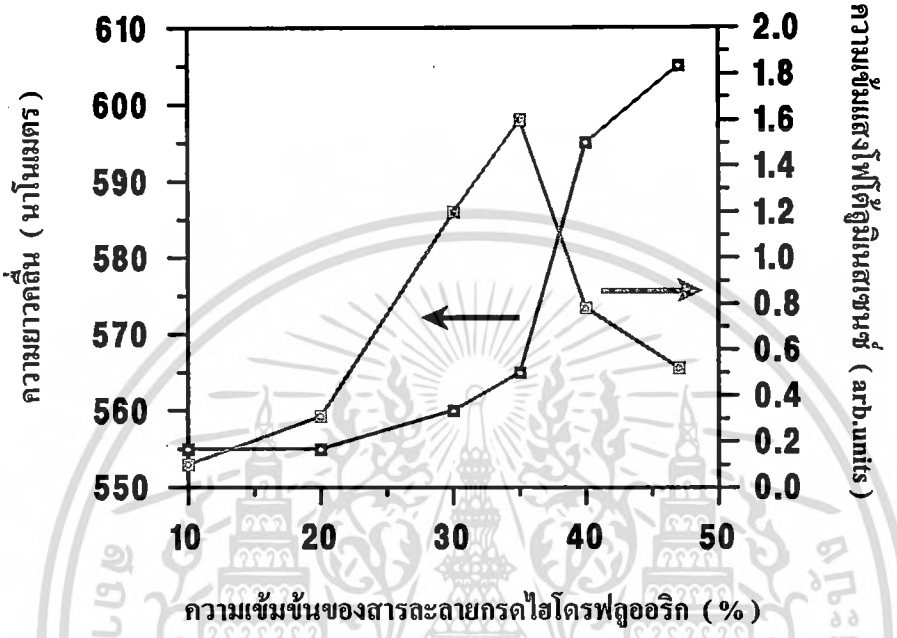
พอรัสซิลิกอนที่นำมาทำการศึกษาในกรณีนี้จะถูกสร้างขึ้นตามเงื่อนไขในการ anodization ในหัวข้อการทดลองที่ 6.2.3 คือสร้างจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ระนาบ 100 ที่มีสภาพต้านทาน 10 โอห์ม-เซนติเมตร โดยใช้ความหนาแน่นกระแสในระหว่างการ anodization มีค่าเท่ากับ 10 mA/cm^2 และใช้เวลาในการ anodization เท่ากับ 10 นาที โดยในการทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซนต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกที่ใช้เป็น 10% , 20% , 30% , 35% , 40% และ 47% ตามลำดับ พอรัสซิลิกอนที่ได้จากการสร้างตามเงื่อนไขต่างๆเหล่านี้จะถูกนำไปทำการวัดสเปกตรัมแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่ให้ออกมา ดังแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.23



รูปที่ 6.23 แสดงสเปกตรัมแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เปอร์เซนต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับเปอร์เซนต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริก จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.24



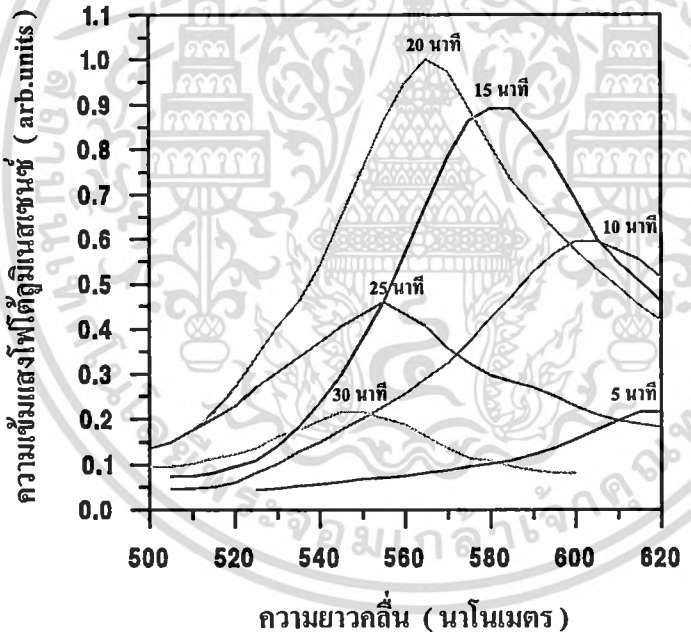
รูปที่ 6.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับเปอร์เซนต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริก

จากผลการทดลอง เมื่อทำการลดเปอร์เซนต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกลงตั้งแต่ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 47% ไปจนถึง 35% พบว่าแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่ได้ออกมาจากพอรัสซิลิกอนจะมีปริมาณความเข้มแสงที่สูงขึ้น โดยมีความเข้มแสงสูงที่สุดเมื่อใช้เปอร์เซนซ์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกมีค่าเท่ากับ 35% ต่อจากนั้นความเข้มแสงก็จะมีค่าที่ลดลงเมื่อทำการลดเปอร์เซนซ์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกให้มีค่าที่ต่ำกว่า 35% ลงไป ในส่วนของความยาวคลื่นนั้นพบว่าเมื่อทำการลดเปอร์เซนซ์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกลง จะมีผลทำให้ความยาวคลื่นของแสงที่ให้ออกมาจากพอรัสซิลิกอนมีค่าที่ลดลงด้วย กล่าวคือความยาวคลื่นของแสงจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงจากที่ความยาวคลื่น 605 นาโนเมตร ลงไปสู่ที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตร หรืออีกความหมายหนึ่งก็คือมีค่าพลังงานโฟตอนของยอดสเปกตรัมเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจาก 2.05 eV ไปถึง 2.23 eV นั่นเอง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงลดลงของความยาวคลื่นแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์เมื่อทำการลดเปอร์เซนซ์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริกลงนี้ สามารถที่จะอธิบายได้ในลักษณะเช่นเดียวกันกับการเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการ anodization

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4.4 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization ที่มีต่อคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของนาโนพอรัสซิลิกอน

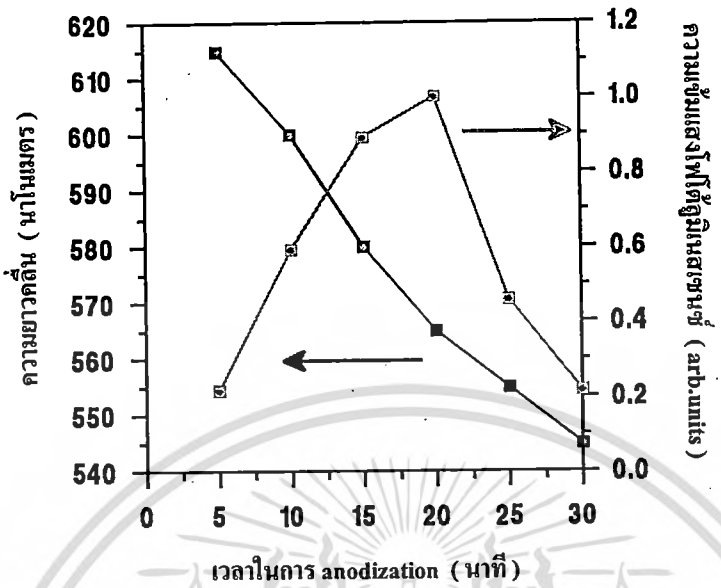
พอรัสซิลิกอนที่นำมาใช้ทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เงื่อนไขเดียวกันกับที่ทดลองในหัวข้อที่ 6.2.4 ดังต่อไปนี้คือ ใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพีระนาบ 100 มีสภาพต้านทานเท่ากับ 10 โอห์ม-เซนติเมตร ความหนาแน่นกระแสที่ใช้มีค่าเท่ากับ 10 mA/cm^2 ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 47% โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าเวลาที่ใช้ในระหว่างการ anodization เป็นค่าต่างๆตั้งแต่ 5 นาที ไปจนถึง 30 นาที พอรัสซิลิกอนที่ได้จากการสร้างตามเงื่อนไขเหล่านี้จะให้สเปกตรัมของแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่แตกต่างกันออกไป ดังแสดงในรูปที่ 6.25



รูปที่ 6.25 แสดงสเปกตรัมแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยใช้เวลาในการ anodization ค่าต่างๆ

ส่วนความสัมพันธ์ของความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับเวลาในการ anodization นั้นจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการ anodization

จากผลการทดลองในรูปที่ 6.26 ความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนจะมีปริมาณความเข้มแสงสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มเวลาในการ anodization ให้มีค่ามากขึ้นจนมาถึงจุดที่เวลาในการ anodization มีค่าเท่ากับ 20 นาที ความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่ให้ออกมาจากพอรัสซิลิกอนจะมีปริมาณความเข้มแสงสูงที่สุด ต่อจากนั้นความเข้มแสงก็จะเริ่มมีค่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการ anodization มีค่าสูงเกินกว่า 20 นาทีขึ้นไป ในส่วนของความยาวคลื่นนั้นก็พบว่าแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่ให้ออกมา จะมีการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นไปยังด้านที่มีความยาวคลื่นค่าที่สั้นกว่าเดิม กล่าวคือความยาวคลื่นจะมีค่าลดลงจาก 615 นาโนเมตร ไปสู่ 545 นาโนเมตร หรือมีค่าพลังงานโฟตอนของยอดสเปกตรัมเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจาก 2.01 eV ไปสู่ 2.27 eV เมื่อทำการเพิ่มเวลาในการ anodization ให้มีค่าสูงขึ้นตั้งแต่ 5 นาที ไปจนถึง 30 นาที โดยการเปลี่ยนแปลงลดลงของความยาวคลื่นนี้สามารถทำการอธิบายได้ว่าเกิดขึ้นจากการเพิ่มเวลาในการ anodization ให้มีค่าสูงขึ้นไปมีผลทำให้ชั้นพอรัสซิลิกอนที่ได้มีความพรุนมากขึ้นกว่าเดิม ทำให้โครงสร้างของชั้นพอรัลซิลิกอนในส่วนของนาโนพอรัสซิลิกอนมีขนาดที่เล็กลงไปเรื่อยๆ มีผลทำให้ช่องว่างแถบพลังงานของพอรัสซิลิกอนเกิดการเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ พอรัสซิลิกอนจะมีขนาดของช่องว่างพลังงานที่มีค่ามากขึ้นกว่าเดิม ดังนั้นเมื่อเกิดการรวมตัวใหม่แบบเปล่งแสงขึ้น จึงมีโอกาศสูงที่พอรัสซิลิกอนนั้นสามารถให้แสงที่มีความยาวคลื่นที่มีค่าสั้นกว่าเดิมออกมาได้ โดยทั้งหมดที่ได้กล่าวมาเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ quantum wire effect นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5 การทดลองเพื่อศึกษาผลของโครงสร้างของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอนที่มีต่อคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาถึงผลของโครงสร้างชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีต่อคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ ทั้งในส่วนของความยาวคลื่น และความเข้มแสง โดยโครงสร้างของชั้นพอรัสซิลิกอนที่นำมาศึกษานี้จะถูกทำการสร้างขึ้นมาให้มีเปอร์เซนซ์ความพรุนที่แตกต่างกัน ซึ่งเราสามารถพิจารณาอย่างคราวๆได้ โดยการสังเกตุจากสีที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอรัสซิลิกอน ดังแสดงในรูปที่ 6.27

เปอร์เซนต์ความพรุน 60 % เปอร์เซนต์ความพรุน 68 %

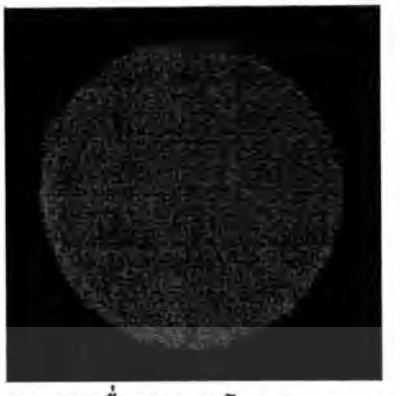
เปอร์เซนต์ความพรุน 76 % เปอร์เซนต์ความพรุน 85 %

รูปที่ 6.27 แสดงสีที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนค่าต่างๆ

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อชั้นพอรัสซิลิกอนถูกสร้างให้มีเปอร์เซนต์ความพรุนสูงขึ้น สีที่บริเวณผิวหน้าด้านบนจะมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าเปอร์เซนต์ความพรุนไปด้วย โดยการเปลี่ยนแปลงจะเริ่มต้นจากสีน้ำตาลอมดำ ไปสู่น้ำตาลอมแดง และสีเหลือง ในที่สุด เมื่อเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนมีค่ามากขึ้นตั้งแต่ 60 % ไปจนถึง 85 % และเมื่อนำชั้นพอรัสซิลิกอนที่แสดงในรูปที่ 6.27 เหล่านี้ ไปทำการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตที่มีความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร ก็จะเกิดปรากฏการณ์โฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ โดยชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนต่างกันจะให้สีของแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ แตกต่างกันออกไป ดังแสดงในรูปที่ 6.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น 615 นาโนเมตร (60 %)



ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (68 %)

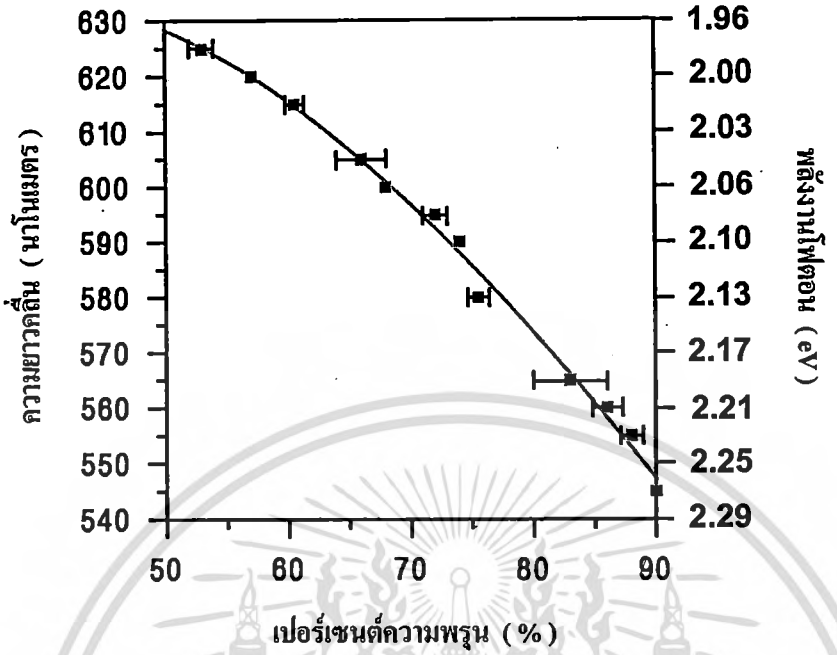
ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร (76 %)

ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร (85 %)

รูปที่ 6.28 แสดงสีของแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ซึ่งได้จากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนที่แตกต่างกัน

จากรูปข้างต้น สีของแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งสามารถสังเกตุเห็นได้ด้วยตาเปล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามค่าเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอน โดยการเปลี่ยนแปลงจะเริ่มจากสีแดงเข้มที่ความยาวคลื่น 615 นาโนเมตร ที่เปอร์เซนต์ความพรุนประมาณ 60% ไปสู่ สีแดงอมส้มที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ที่เปอร์เซนต์ความพรุนประมาณ 68% สีส้มอมเหลืองที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร ที่เปอร์เซนต์ความพรุนประมาณ 76 % และสีเหลืองที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ที่เปอร์เซนต์ความพรุนประมาณ 85% จะเห็นได้ว่าสีเหล่านี้มีค่าความยาวคลื่นแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์เปลี่ยนแปลงลดลง เมื่อชั้นพอรัสซิลิกอนมีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนเพิ่มสูงมากขึ้นนั่นเอง และจากการทดลองในหัวข้อที่ 6.2 และ 6.4 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของเงื่อนไขในการ anodization ต่างๆ ที่มีต่อเปอร์เซนต์ความพรุนของโครงสร้างชั้นพอรัสซิลิกอน และคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ ตามลำดับนั้น ในการทดลองนี้ได้ทำการรวบรวมความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนกับคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ในส่วนของความยาวคลื่นแสง จากผลการทดลองทั้งสองข้างต้นมาแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

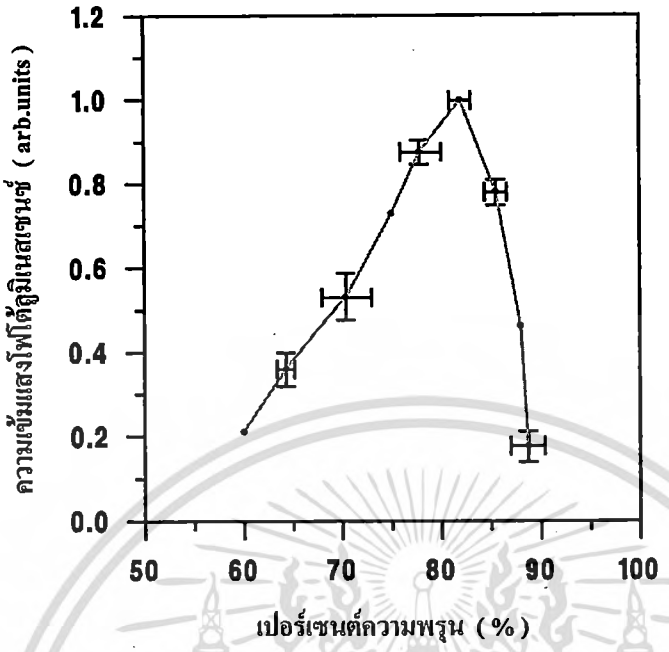


รูปที่ 6.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนกับความยาวคลื่นแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อเราทำการลดขนาดโครงสร้างในระดับนาโนเมตรของพอรัสซิลิกอนลง โดยการเพิ่มค่าเปอร์เซนต์ความพรุนให้แก่ชั้นพอรัสซิลิกอน ด้วยการใช้เงื่อนไขในการ anodization ต่างๆ อาทิเช่น การเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส , การลดเปอร์เซนต์ความเข้มข้นของกรดไฮโดรฟลูออริก หรือการเพิ่มเวลาในการ anodization เป็นต้นนั้น จะมีผลทำให้ความยาวคลื่นแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์มีค่าลดลง หรืออีกความหมายหนึ่งก็คือ โครงสร้างพอรัสซิลิกอนมีขนาดของช่องว่างพลังงานเพิ่มสูงมากขึ้นจากเดิม โดยสามารถดูได้จากค่าพลังงานโฟตอนของยอดสเปกตรัมแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่มีค่ามากขึ้นนั่นเอง ซึ่งจากผลการทดลองนี้พบว่าชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนต่ำกว่า 50 % ลงไปนั้น จะไม่แสดงคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์แต่อย่างไร ส่วนชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ 54 % จนไปถึง 90 % จะแสดงคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ โดยจะมีความยาวคลื่นแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ลดลงจาก 625 นาโนเมตร ไปสู่ 545 นาโนเมตร หรือมีค่าพลังงานโฟตอนของยอดสเปกตรัมเพิ่มขึ้นจาก 1.98 eV ไปถึง 2.27 eV นั่นเอง ซึ่งทั้งหมดที่ได้แสดงมานี้สามารถยืนยันถึงการเกิดปรากฏการณ์ Quantum size effect หรือ Quantum wire effect ได้เป็นอย่างดี

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอน กับคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ในส่วนของความเข้มแสง จะถูกนำมาแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

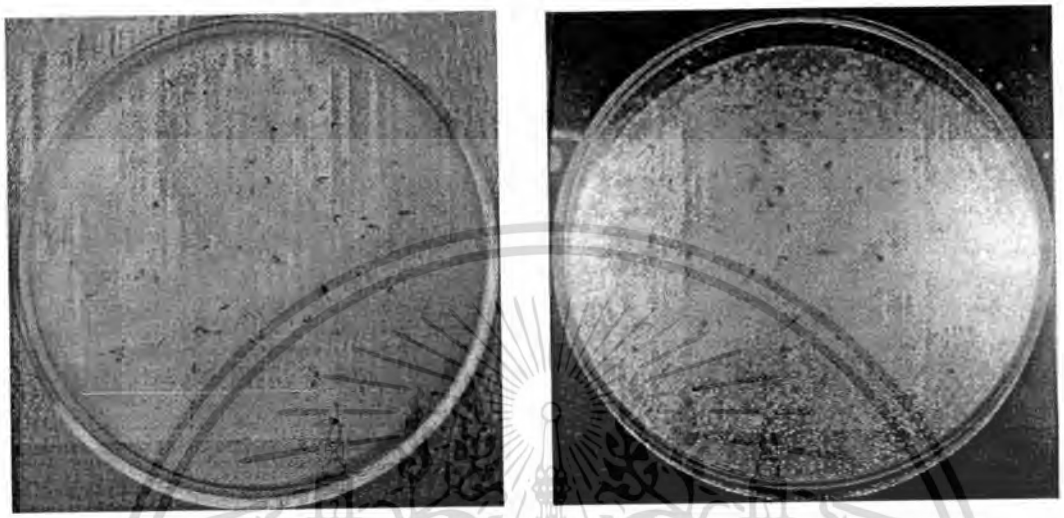


รูปที่ 6.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิอนกับความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์

จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นได้ว่าเมื่อชั้นพอรัสซิลิกอนมีเปอร์เซนต์ความพรุนสูงขึ้น ปริมาณความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่ได้ออกมาจะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนสูงขึ้นจะมีพื้นที่ผิวของโครงสร้างพอรัสซิลิกอนมากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งเท่ากับเป็นการไปเพิ่มพื้นที่ในการเปล่งแสง ดังนั้นเมื่อเกิดปรากฏการณ์โฟโต้ลูมิเนสเซนซ์จึงทำให้ชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนสูงกว่า มีปริมาณความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์สูงขึ้นตามด้วย ซึ่งจากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 6.30 พบว่าปริมาณความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนมีค่าเพิ่มขึ้น โดยความเข้มแสงจะมีปริมาณสูงที่สุด เมื่อชั้นพอรัสซิลิกอนมีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนอยู่ในช่วงประมาณ 81% - 83% ต่อจากนั้นปริมาณความเข้มแสงก็จะมีค่าลดลง เมื่อเปอร์เซนต์ความพรุนมีค่าสูงเกินกว่านี้ขึ้นไป สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เนื่องจากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนสูงมากๆนั้น โครงสร้างจะมีความอ่อนแอ และมีความเปราะบางสูงมากตามไปด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โครงสร้างที่มีขนาดเล็กมากๆบางส่วนสามารถหลุดออกมาในระหว่างกระบวนการสร้าง หรือกระบวนการทำความสะอาดผิวหน้าได้ ชิ้นส่วนของพอรัสซิลิกอนที่หลุดออกมานี้ เมื่อสังเกตุด้วยตาเปล่าจะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นผงละเอียดที่มีขนาดเล็กมากๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.31 (ก) โดยผงละเอียดเหล่านี้สามารถแสดงคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ได้ เมื่อถูกทำการฉายด้วยแสงอุล ตร้าไวโอเลต ดังแสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 6.31 (ข) เรียกชิ้นส่วนของพอรัสซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดเหล่านี้ว่า " Free standing porous silicon "



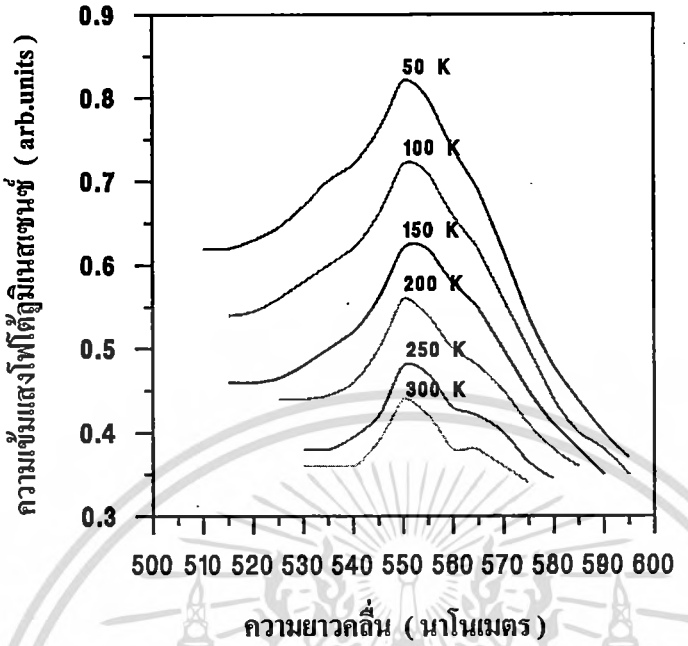
(ก) (ข)

รูปที่ 6.31 แสดงภาพถ่ายของ Free standing porous silicon ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียด โดยที่
(ก) ก่อนทำการฉายแสงด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลต
(ข) ขณะทำการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลต

6.6 การทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของนาโนพอรัสซิลิกอน

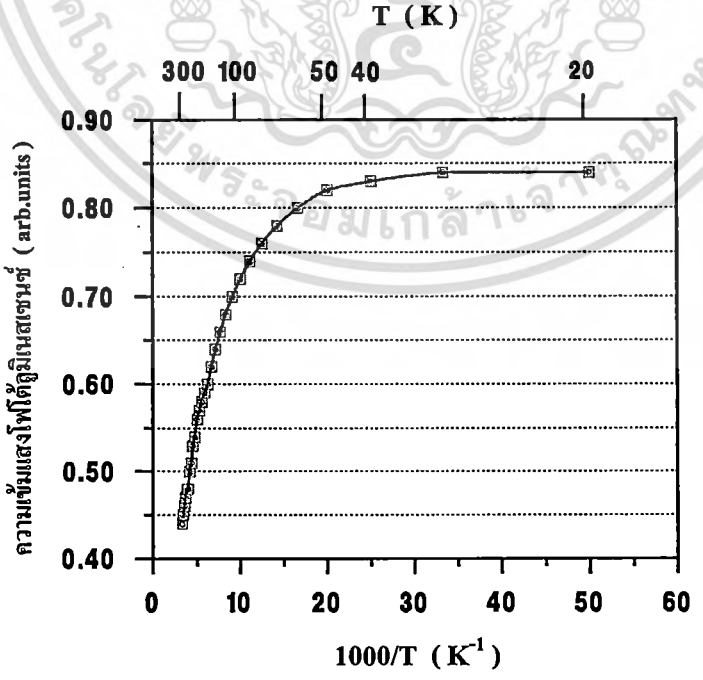
ในการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนนี้ ชั้นของพอรัสซิลิกอนที่นำมาศึกษาจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ระนาบ (100) มีสภาพต้านทาน 10 โอหม์-เซนติเมตร ใช้ความหนาแน่นกระแสในระหว่างการ anodization มีค่าเท่ากับ 10 mA/cm^2 ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20% และใช้เวลาในการ anodization เท่ากับ 10 นาที พอรัสซิลิกอนที่ได้ทำการสร้างขึ้นตามเงื่อนไขเหล่านี้จะถูกนำไปบรรจุอยู่ภายในภาชนะระบบปิดของเครื่อง Cryostat ในสภาพแวดล้อมของสุญญากาศที่ความดัน 6×10^{-7} mbar ต่อจากนั้นก็จะทำการลดอุณหภูมิภายในระบบให้มีค่าที่ต่ำลงในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 300 เคลวิน จนไปถึง 20 เคลวิน โดยในระหว่างการลดอุณหภูมิลงนั้นก็จะทำการวัดสเปกตรัมของแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ ที่อุณหภูมิต่างๆด้วย ดังแสดงในรูปที่ 6.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.32 แสดงสเปกตรัมแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนที่อุณหภูมิต่างๆ

ส่วนความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่มีต่อความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์นั้น จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.33



รูปที่ 6.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับอุณหภูมิ

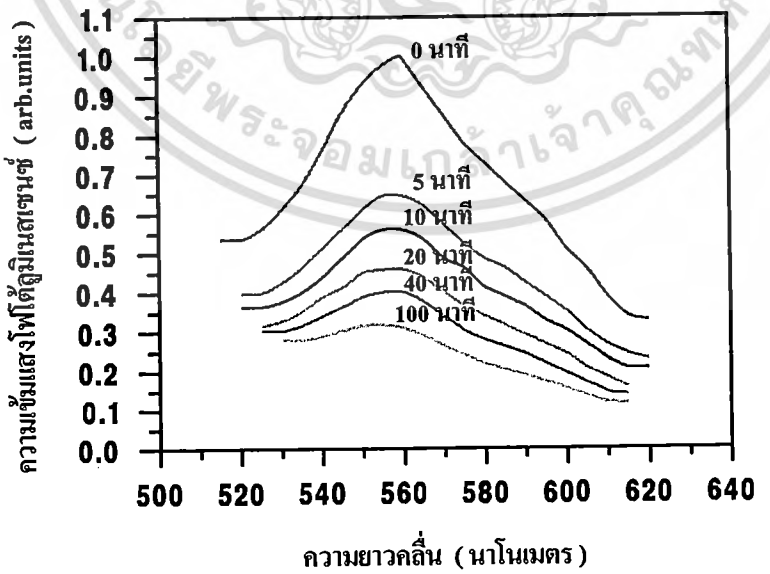
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อทำการลดอุณหภูมิภายในระบบให้มีค่าที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องลงไปนั้น จะมีผลทำให้ความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 300 เคลวิน จนไปถึงที่อุณหภูมิประมาณ 100 เคลวิน ต่อจากนั้นความเข้มแสงก็จะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนมีค่าคงที่ในที่สุด เมื่ออุณหภูมิมีค่าต่ำกว่า 50 เคลวิน ลงไป ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำมากๆนั้น จะลดผลของพลังงานกระตุ้นเนื่องจากความร้อนที่มีต่อพาหะลง ทำให้อัตราการรวมตัวแบบเปล่งแสงที่อุณหภูมิต่ำนั้นจึงมีปริมาณที่สูงขึ้นนั่นเอง

6.7 การทดลองเพื่อศึกษาเสถียรภาพโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของชั้นนาโนพอรัสซิลิกอน

6.7.1 การศึกษาเสถียรภาพโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของนาโนพอรัสซิลิกอนภายใต้แสงอุลตร้าไวโอเลต

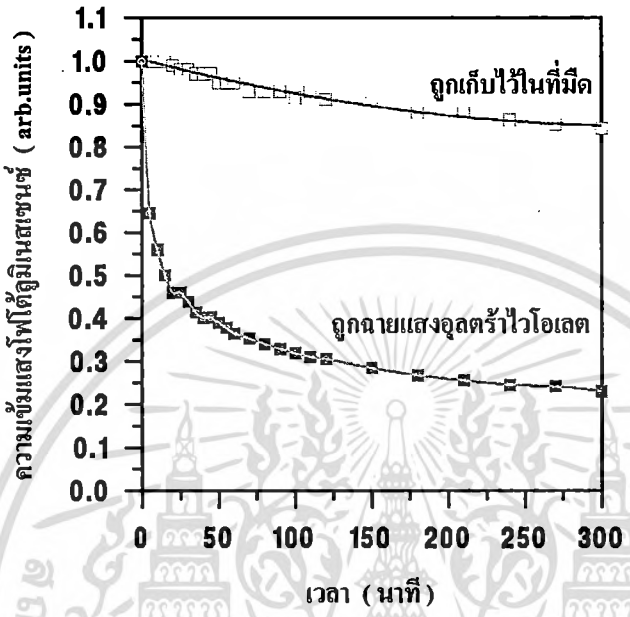
ในการทดลองนี้ได้ใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ระนาบ 100 มีสภาพต้านทานเท่ากับ 10 โอห์ม-เซนติเมตร เป็นวัสดุเริ่มต้น เพื่อสร้างชั้นพอรัสซิลิกอนโดยใช้เงื่อนไขในการ anodization ดังต่อไปนี้คือ ใช้ความหนาแน่นกระแสในการ anodization มีค่าเท่ากับ 10 mA/cm^2 ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 20% และใช้เวลาในการ anodization เท่ากับ 10 นาที หลังจากนั้น จึงนำไปทำการศึกษาถึงผลของการฉายแสงอุลตร้าไวโอเลตที่มีต่อเสถียรภาพโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนที่อยู่ในอากาศ โดยกราฟในรูปที่ 6.34 จะแสดงสเปกตรัมแสงที่ได้จากโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนที่อยู่ในอากาศ ณ.เวลาในการฉายแสงอุลตร้าไวโอเลตต่างๆ



รูปที่ 6.34 แสดงสเปกตรัมแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนที่เวลาในการฉายแสงอุลตร้าไวโอเลตต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอุลตร้าไวโอเลตนั้น ได้แสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.35

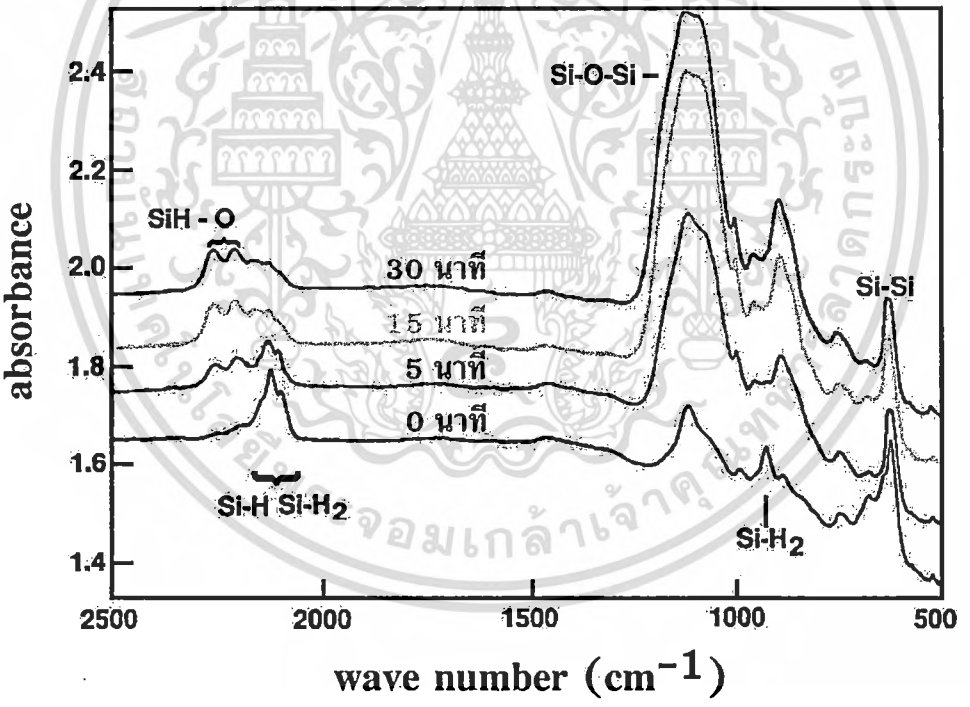


รูปที่ 6.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอุลตร้าไวโอเลต

จากผลการทดลองข้างต้น แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ เมื่อเวลาในการฉายแสงอุลตร้าไวโอเลตผ่านไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกราฟรูปที่ 6.35 จะแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างของการลดลงของความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่ความยาวคลื่น 555 นาโนเมตร ระหว่างพอรัสซิลิกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตอยู่ตลอดเวลา กับพอรัสซิลิกอนที่ถูกเก็บไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตตลอดในอากาศ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าในอากาศนั้นเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 ชั่วโมง พอรัสซิลิกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตอยู่ตลอดเวลาจะมีปริมาณความเข้มของแสงลดลงอย่างรวดเร็ว โดยจะมีปริมาณความเข้มแสงเหลืออยู่เพียงประมาณ 25% จากปริมาณความเข้มแสงเริ่มต้น ส่วนพอรัสซิลิกอนที่ถูกเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตตลอดเวลา จะมีปริมาณความเข้มของแสงลดลงเหลืออยู่ประมาณ 85% เท่านั้น จะเห็นได้ว่าพอรัสซิลิกอนที่ไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตตลอดเวลาในอากาศ จะมีการลดลงของความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ในปริมาณที่น้อยกว่าพอรัสซิลิกอนที่ถูกทำการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตตลอดเวลาอยู่มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองข้างต้นทำให้สามารถยืนยันได้ว่า การฉายแสงอุลตร้าไวโอเลตให้แก่พอรัสซิลิกอนเป็นเวลานานๆจะมีผลต่อความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอน โดยการลดลงของความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์นี้ น่าจะมีสาเหตุที่สำคัญมาจากการสูญเสียไฮโดรเจนอะตอมที่ปกคลุมอยู่ที่ผิวของนาโนพอรัสซิลิกอน ซึ่งการจับพันธะกันของไฮโดรเจนและซิลิกอนนั้นมีได้หลายรูปแบบด้วยกัน [26] เช่น SiH , SiH_2 , $(SiH_2)_n$ และเพื่อเป็นการสนับสนุนข้อสันนิษฐานนี้ จึงได้ทำการทดลองเพื่อตรวจสอบชนิดและปริมาณของพันธะที่บริเวณผิวของนาโนพอรัสซิลิกอนด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (absorbance) ด้วยเครื่องวัดฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโต้มิเตอร์ (FTIR) ของ Perkin Elmer ซึ่งผลการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของชั้นพอรัสซิลิกอนที่ถูกทำการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตเป็นเวลาต่างๆ ในสภาพแวดล้อมของอากาศ ได้ถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.36



รูปที่ 6.36 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของชั้นพอรัสซิลิกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตเป็นเวลาต่างๆ ในสภาพแวดล้อมของอากาศ

โดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของพอรัสซิลิกอนที่ตำแหน่งเลขคลื่น (wave number) ต่างๆจากกราฟในรูปที่ 6.36 ข้างต้นนี้ จะบอกถึงชนิดและลักษณะของพันธะที่อยู่ที่บริเวณผิวของนาโนพอรัสซิลิกอนได้ ดังแสดงในตารางที่ 6.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3

แสดงชนิดและลักษณะของพันธะที่ตำแหน่งเลขคลื่นต่างๆของพอรัสซิลิกอน [25]

เลขคลื่น (cm^{-1})	โหมด
617	Si - Si stretching
907	Si - H_2 bending
1105	Si - O - Si asymmetric stretching
2089	Si - H stretching
2135	Si - H_2 stretching
2202 - 2253	Si - H - O stretching

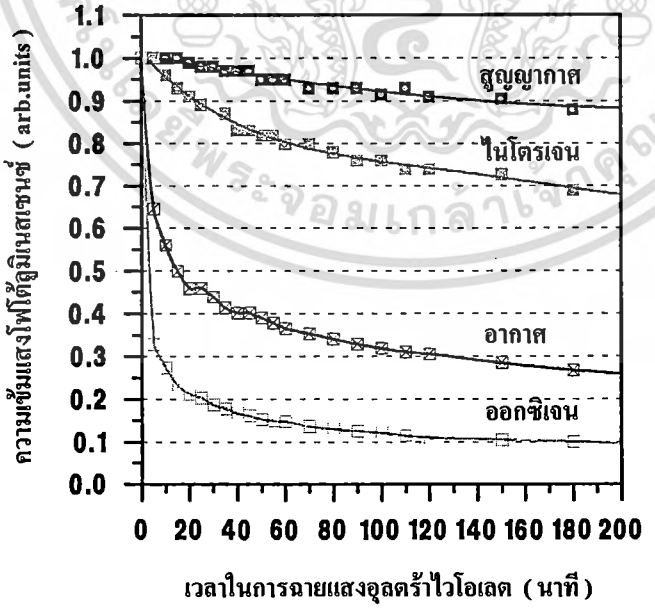
พิจารณาจากกราฟในรูปที่ 6.36 และตารางที่ 6.3 จะสามารถสังเกตุพบการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 907 cm^{-1} และ 2089 - 2135 cm^{-1} ซึ่งการดูดกลืนทั้งสองตำแหน่งในที่นี้จะเกิดจากการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของอะตอมชุด Si-H ที่มีการสั่นแบบ การงอตัว (Bending) และแบบการยืดตัว (Stretching) ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการฉายแสงอุลตร้าไวโอเลตให้แก่พอรัสซิลิกอนเป็นเวลานานๆ จะมีผลทำให้จำนวนพันธะระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่อยู่บริเวณผิวของนาโนพอรัสซิลิกอนมีปริมาณที่ลดลง โดยจะสังเกตุได้จากการลดลงของสเปกตรัมการดูดกลืนของอะตอมชุด Si-H ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 907 cm^{-1} และ 2089 - 2135 cm^{-1} นั่นเอง ทั้งนี้เนื่องจากแสงอุลตร้าไวโอเลตที่ทำการฉายให้แก่พอรัสซิลิกอนเป็นเวลานานๆได้ไปทำลายพันธะระหว่างซิลิกอน กับไฮโดรเจนอะตอม (Si-H) ที่จับตัวกันอยู่ที่บริเวณผิวของนาโนพอรัสซิลิกอน เกิดพันธะแขนขาด (dangling bonds) ของซิลิกอนขึ้น พันธะแขนขาดของซิลิกอนเหล่านี้เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมของอากาศปกติจะเกิดปฏิกริยาออกซิเดชั่นกับออกซิเจนในอากาศ ทำให้ที่บริเวณผิวของนาโนพอรัสซิลิกอนเกิดพันธะระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจน (Si-O-Si) ขึ้นมาแทนพันธะระหว่างซิลิกอนกับไฮโดรเจนอะตอม ดังจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่ตำแหน่ง 1105 cm^{-1} และการปรากฏสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดขึ้นใหม่ ที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ 2202 - 2253 cm^{-1} ซึ่งเป็นของพันธะ Si-H-O เมื่อทำการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก่พอรัสซิลิกอนเป็นเวลานานๆ พันธะแขนขาดและพันธะระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจนที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ จะเป็นจุดที่ทำให้การรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของนาโนพอรัสซิลิกอน มีลักษณะเป็นการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง (nonradiative recombination) ขึ้นได้ ซึ่งเป็นสาเหตุของการที่ปริมาณความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนลดลง จากผลการทดลองนี้เองได้สนับสนุนสาเหตุ และที่มาของการเปล่งแสงแบบโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนได้ว่า เกิดขึ้นเนื่องจากการรวมตัวแบบเปล่งแสง (radiation recombination) ที่บริเวณผิวของนาโนพอรัสซิลิกอน นั่นเอง

6.7.2 การศึกษาเสถียรภาพโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของนาโนพอรัสซิลิกอนที่อยู่ในสภาพบรรยากาศของก๊าซชนิดต่างๆ

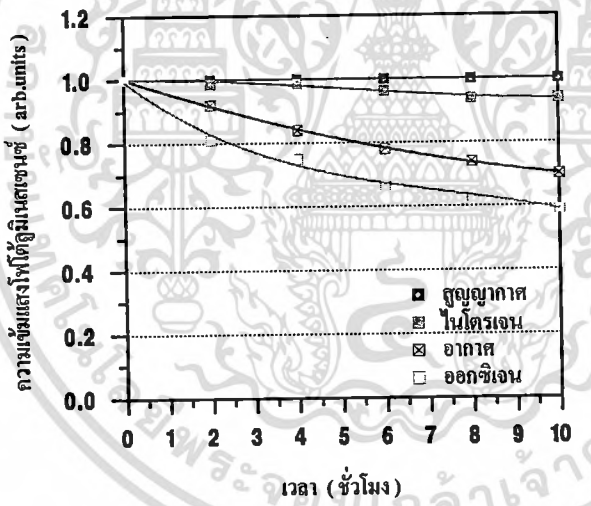
ในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลของก๊าซชนิดต่างๆที่มีต่อเสถียรภาพโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอน ณ.ที่อุณหภูมิห้อง ทั้งที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตอยู่ตลอดเวลา และที่ถูกเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตตลอดเวลา โดยพอรัสซิลิกอนที่นำมาศึกษานี้จะถูกบรรจุอยู่ในภาชนะระบบปิดซึ่งภายในจะบรรจุเต็มไปด้วยบรรยากาศของก๊าซออกซิเจน ก๊าซไนโตรเจน อากาศ และสูญญากาศ เพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยกราฟในรูปที่ 6.37 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอุล ตร้าไวโอเลตให้แก่พอรัสซิลิกอน ในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ



รูปที่ 6.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับเวลาที่ใช้ในการฉายแสงอุลตร้าไวโอเลตให้แก่พอรัสซิลิกอน ในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองข้างต้น จะเห็นได้ถึงการเปลี่ยนแปลงที่ลดลงของความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของพอรัสซิลิกอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซออกซิเจน ปริมาณความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างรวดเร็วมาก โดยจะมีปริมาณความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์เหลืออยู่เพียงประมาณ 10% จากปริมาณความเข้มแสงเริ่มต้น เมื่อเวลาฉายแสงอุลตร้าไวโอเลตผ่านไปประมาณ 3 ชั่วโมง ซึ่งจะแตกต่างกันกับในกรณีของพอรัสซิลิกอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมอื่นๆ อันได้แก่ อากาศ ไนโตรเจน และในสูญญากาศที่ความดัน 1 x 10^{-6} mbar โดยจะพบว่าความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงในปริมาณที่น้อยกว่าที่อยู่ในก๊าซออกซิเจน กล่าวคือจะมีปริมาณความเข้มของแสงลดลงเหลืออยู่ประมาณ 30% , 70% และ 90% ตามลำดับ ในส่วนกรณีของพอรัสซิลิกอนที่ถูกเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตตลอดเวลา และอยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆเช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้ทำการแสดงความสัมพันธ์เอาไว้ในรูปที่ 6.38



รูปที่ 6.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์กับเวลาในสภาพแวดล้อมของก๊าซชนิดต่างๆ

จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 3 ชั่วโมงเท่ากัน พบว่าปริมาณความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์จะลดลงเหลืออยู่ประมาณ 80% และ 90% สำหรับพอรัสซิลิกอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซออกซิเจน และในอากาศ ตามลำดับ ส่วนพอรัสซิลิกอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซไนโตรเจนนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ในปริมาณที่น้อยมากๆ และพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์เลยเมื่อพอรัสซิลิกอนอยู่ในสภาพแวดล้อมของสูญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

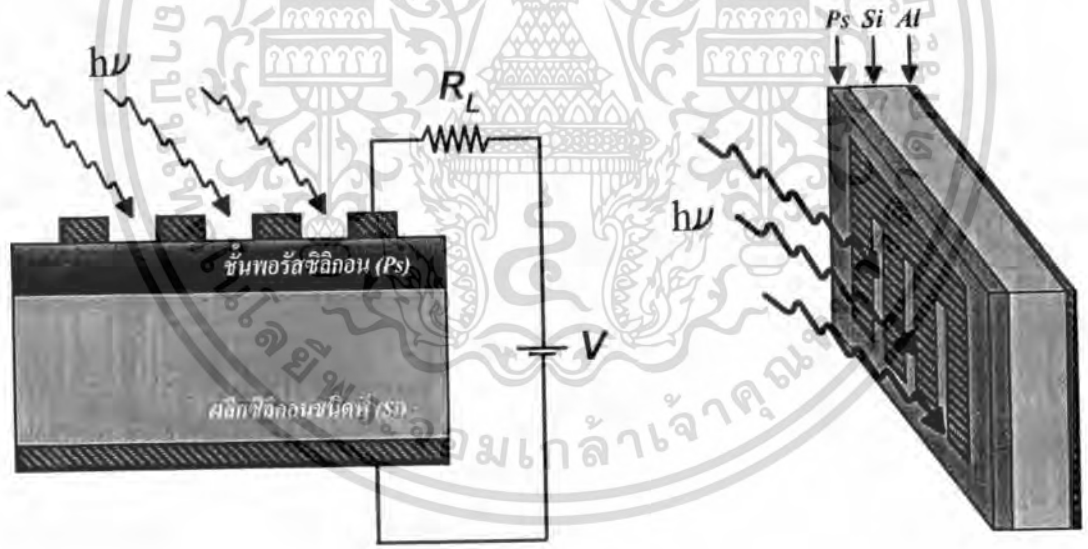
บทที่ 7
แนวทางการใช้นาโนพอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์แสงในช่วงที่ตามองเห็น เพื่อประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดสี

จากผลการศึกษาทางด้านโครงสร้าง และคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอน แสดงให้เห็นว่าชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นสามารถเปล่งแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ออกมา โดยมีความยาวคลื่นที่ยอดสเปกตรัมอยู่ในช่วงตั้งแต่ 545 นาโนเมตร ถึง 625 นาโนเมตร หรือที่พลังงานโฟตอนตั้งแต่ 1.98 eV ไปถึง 2.27 eV ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการ anodization ซึ่งเป็นกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีที่สามารถลดขนาดโครงสร้างของพอรัสซิลิกอนลงสู่ในระดับนาโนเมตรได้ นอกจากนี้แล้วยังเป็นกระบวนการที่สามารถเข้ากันได้กับกระบวนการสร้างของวงจรรวม (IC) มาตราฐาน จากเหตุผลนี้เองจึงทำให้เกิดแนวทางและความเป็นไปได้ที่สามารถจะนำเอาพอรัสซิลิกอนมาใช้เป็นวัสดุทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง ทั้งนี้ก็เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานสร้างเป็นอุปกรณ์ทางแสงต่างๆ ที่สามารถรวมอยู่กันกับอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่นๆ บนฐานรองซิลิกอนเดียวกันได้

โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางในการนำเอาพอรัสซิลิกอนมาประยุกต์ใช้งานสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสง (Photodetector) ที่เรียกว่าอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ ซึ่งเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์แสงชนิดหนึ่ง ที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ จากการศึกษาในการทดลองบทที่ 6 พบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำเอาพอรัสซิลิกอนมาใช้งานเป็นตัวตรวจวัดแสงในย่านที่สามารถมองเห็นได้ (visible light) ทั้งนี้เป็นผลจากการที่ชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นมีขนาดของช่องว่างพลังงานที่กว้างมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อผลึกซิลิกอนปกติ จนมีค่าพลังงานเข้าสู่ย่านความยาวคลื่นแสงที่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งเป็นผลจากการทดลองได้ถูกนำเสนอมาแล้วนั่นเอง ส่งผลทำให้อุปกรณ์โฟโต้ดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นจากพอรัสซิลิกอน มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากอุปกรณ์ซิลิกอนโฟโต้ไดโอดโดยทั่วไป ซึ่งมีช่องว่างพลังงานเพียง 1.14 eV และมีการตอบสนองต่อแสงดีในย่านอินฟาเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

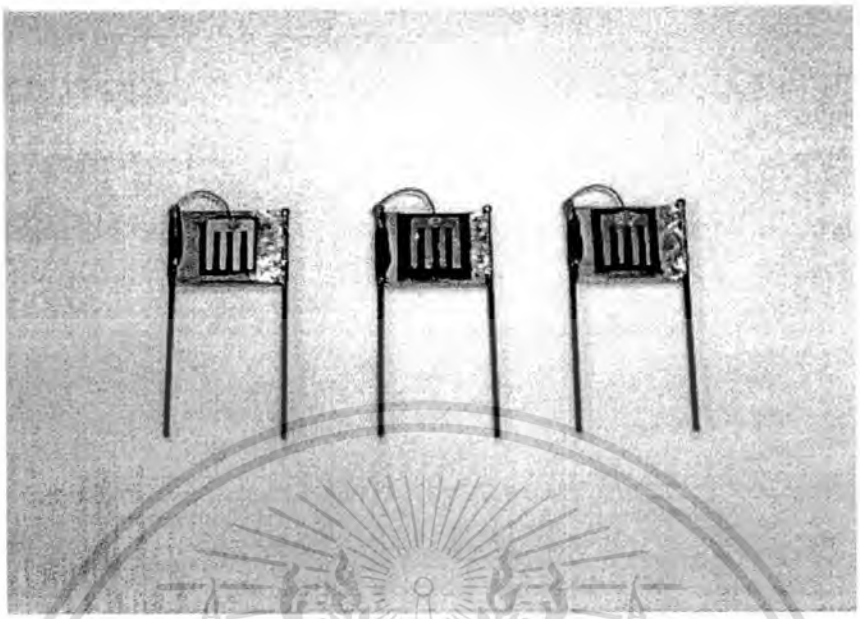
ในส่วนของการสร้างอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์นั้น ชั้นพอรัสซิลิกอนเริ่มต้นจะถูกสร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี ที่มีค่าสภาพต้านทานเท่ากับ 10 โอห์ม-เซนติเมตร โดยใช้ความหนาแน่นกระแสในระหว่างการ anodization มีค่าเท่ากับ 10 mA/cm^2 ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 47 % เป็นเวลานานเท่ากับ 10 นาที ซึ่งภายหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการ anodization ชั้นพอรัสซิลิกอนที่ได้จะถูกนำไปจุ่มลงในน้ำปราศจากประจุไฟฟ้า (DI water) เพื่อชำระล้างสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่ยังตกค้างอยู่บริเวณผิวหน้า และนำไปเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน เมื่อกระบวนการสร้างมาถึงขั้นตอนนี้แล้วชั้นพอรัสซิลิกอน จะต้องไม่ผ่านกระบวนการทางเคมี หรือกระบวนการทางความร้อนใดๆอีก โดยชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจะถูกนำไปจัดเก็บเอาไว้ในภาชนะสูญญากาศของเครื่องระเหยสารด้วยความร้อนทันที ทั้งนี้ก็เพื่อเตรียมเข้าสู่กระบวนการสร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมบนชั้นพอรัสซิลิกอน ซึ่งอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นจะมีขนาดเท่ากับ 7 x 7 mm^2 ดังแสดงในรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 แสดงแบบจำลองโครงสร้างอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์

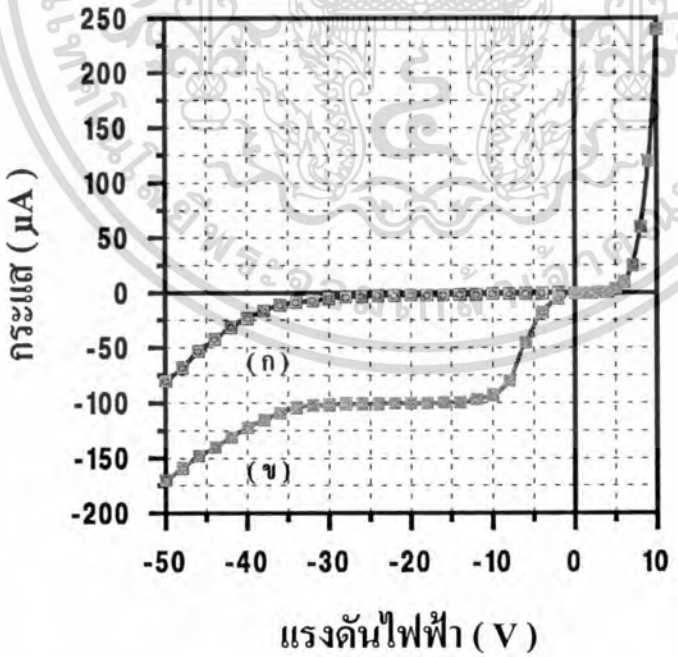
ส่วนภาพถ่ายของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นได้ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 7.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.2 แสดงภาพถ่ายของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นได้

ต่อจากนั้นจึงนำเอาอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ที่สร้างไปทำการวัดคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้า ซึ่งผลที่ได้จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 7.3

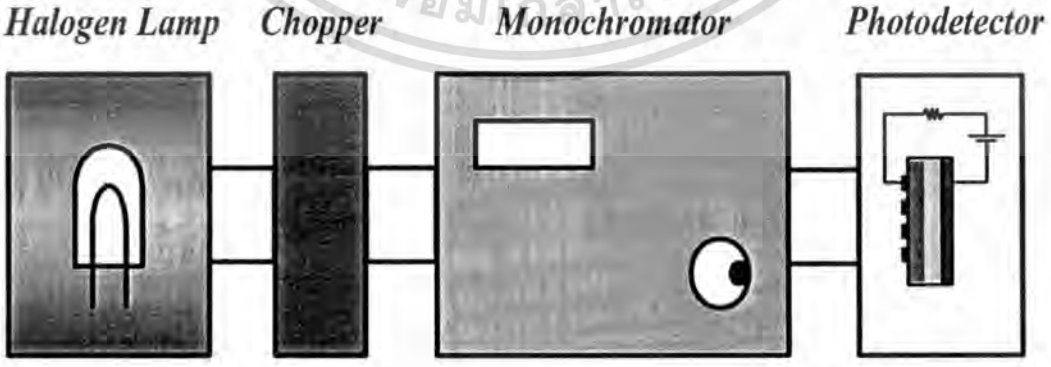


รูปที่ 7.3 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์
โดย (ก) อุปกรณ์ถูกจัดเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายแสง
(ข) อุปกรณ์ได้รับการฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่าลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ มีพฤติกรรมแบบ rectifying ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดกำแพงศักย์แบบ Schottky ขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียมกับชั้นพอรัสซิลิกอนนั่นเอง โดยการไบอัสแบบไปหน้าอุปกรณ์จะเริ่มมีกระแสไหลที่แรงดันไฟฟ้าประมาณ 5 โวลต์ ส่วนการไบอัสแบบย้อนกลับซึ่งเป็นช่วงการทำงานของอุปกรณ์โฟโต้ดีเทคเตอร์ พบว่าอุปกรณ์จะมีกระแสรั่วย้อนกลับมีค่าประมาณ 2 μA (I_d) และเมื่อทำการฉายแสงไฟจากหลอดฮาโลเจนให้กับอุปกรณ์จะมีผลทำให้กระแสรั่วย้อนกลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้นโดยจะมีค่าอยู่ประมาณ 100 μA (I_b) ซึ่งผลต่างของกระแสทั้งสองนี้ ($I_p = I_b - I_d$) ก็คือกระแสโฟโต้ที่เกิดขึ้นจากการฉายแสงให้กับอุปกรณ์นั่นเอง โดยกระแสโฟโต้ (I_p) ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอุปกรณ์ นอกจากนี้ยังมีค่าที่เปลี่ยนแปลงได้ตามปริมาณความเข้มแสงและค่าความยาวคลื่นของแสงที่ทำการฉายให้แก่อุปกรณ์

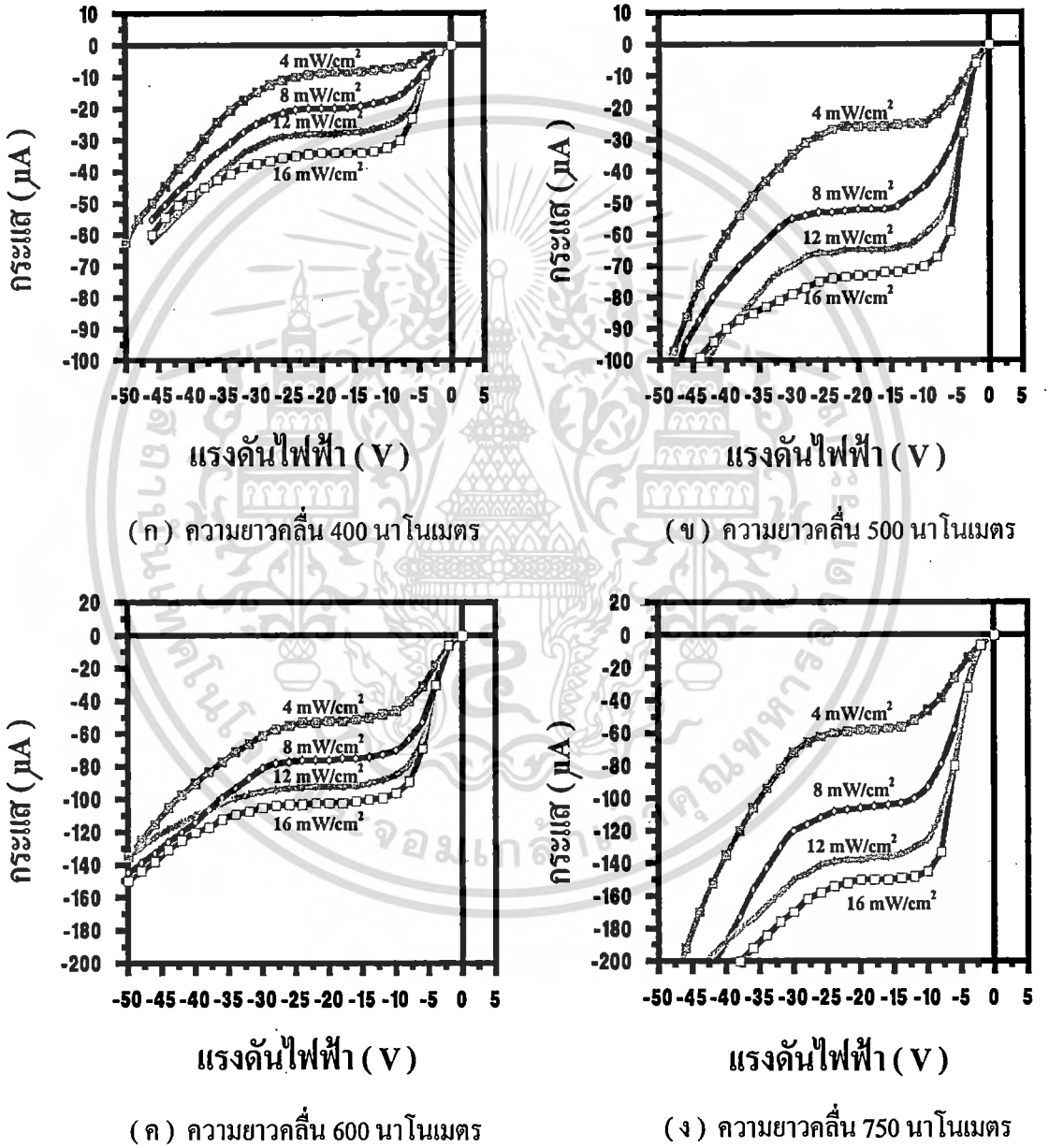
โดยในการทดลองนี้จะทำการศึกษาถึงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนต่างๆ (ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในระหว่างการ anodization เป็นค่าต่างๆคือ 10 , 20 และ 40 mA/cm^2 จนได้ชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนประมาณ 65% , 70% และ 80% ตามลำดับ) อุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นเหล่านี้จะถูกทำการไบอัสแบบย้อนกลับ และได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มแสงค่าต่างๆ โดยการอาศัยต้นกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนส่องผ่านเครื่อง monochromator เพื่อกำหนดค่าความยาวคลื่นและความเข้มแสง ที่จะออกไปยังอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ซึ่งการจัดลำดับอุปกรณ์เครื่องมือวัดที่กล่าวมานี้ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.4 แสดงแผนภาพของอุปกรณ์เครื่องมือวัดการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์

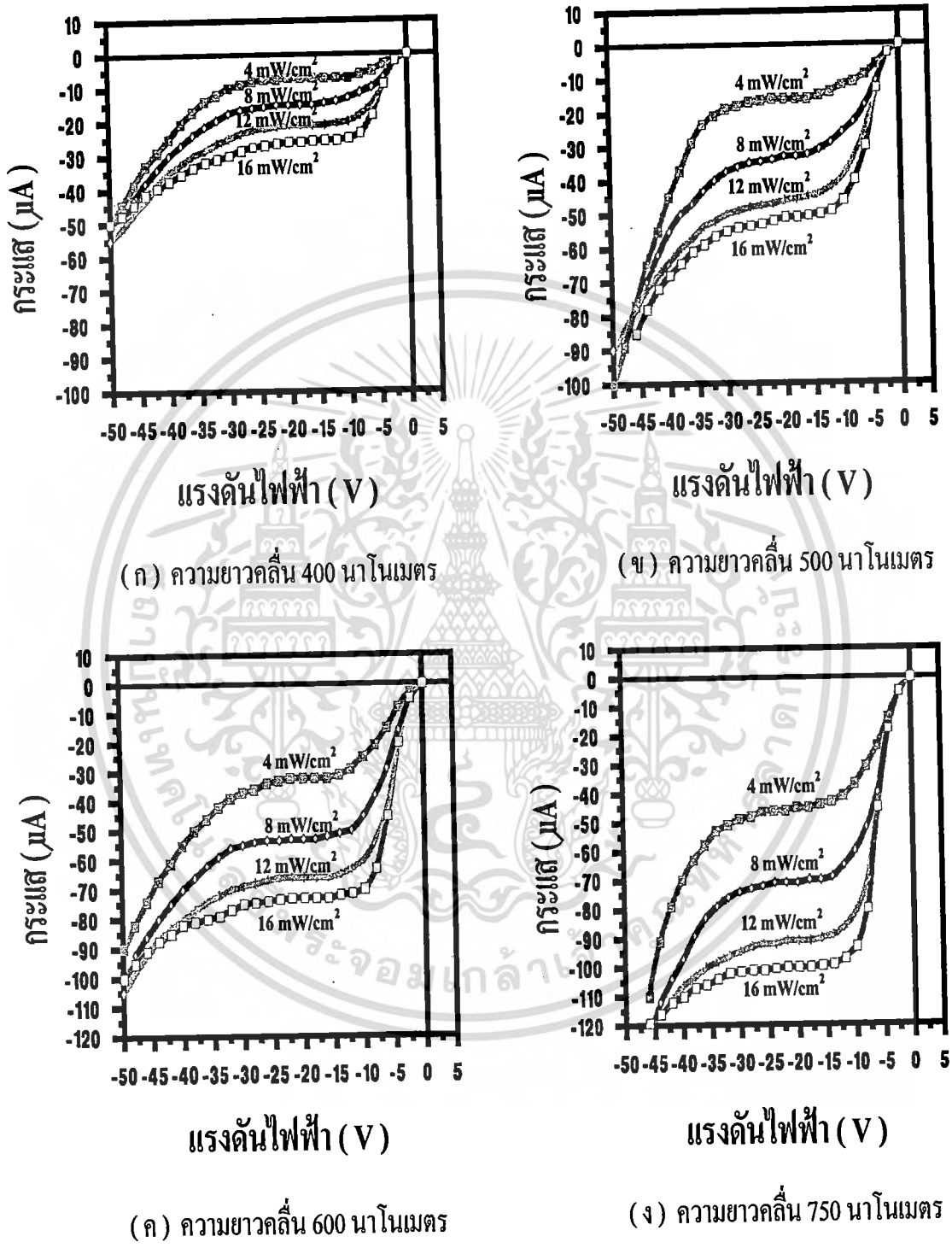
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะทำการไบอัสแบบย้อนกลับของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนเท่ากับ 65% , 70% และ 80% ซึ่งได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มแสงค่าต่างๆ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 7.5 , 7.6 และ 7.7 ตามลำดับ ดังนี้



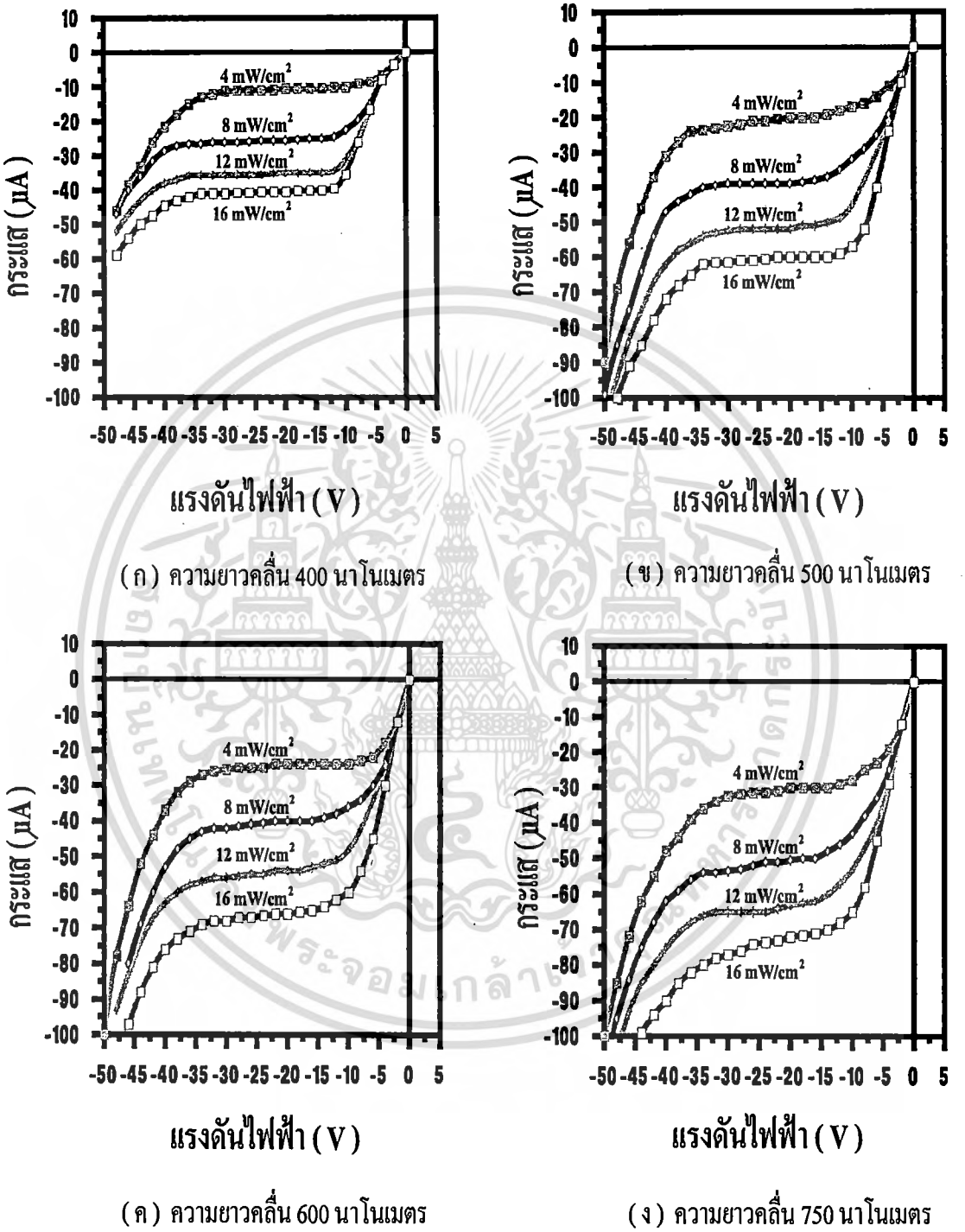
รูปที่ 7.5 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะทำการไบอัสแบบย้อนกลับของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุน 65% ซึ่งได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มแสงค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.6 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะทำการไบอัสแบบย้อนกลับของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุน 70% ซึ่งได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มแสงค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร

(ข) ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร

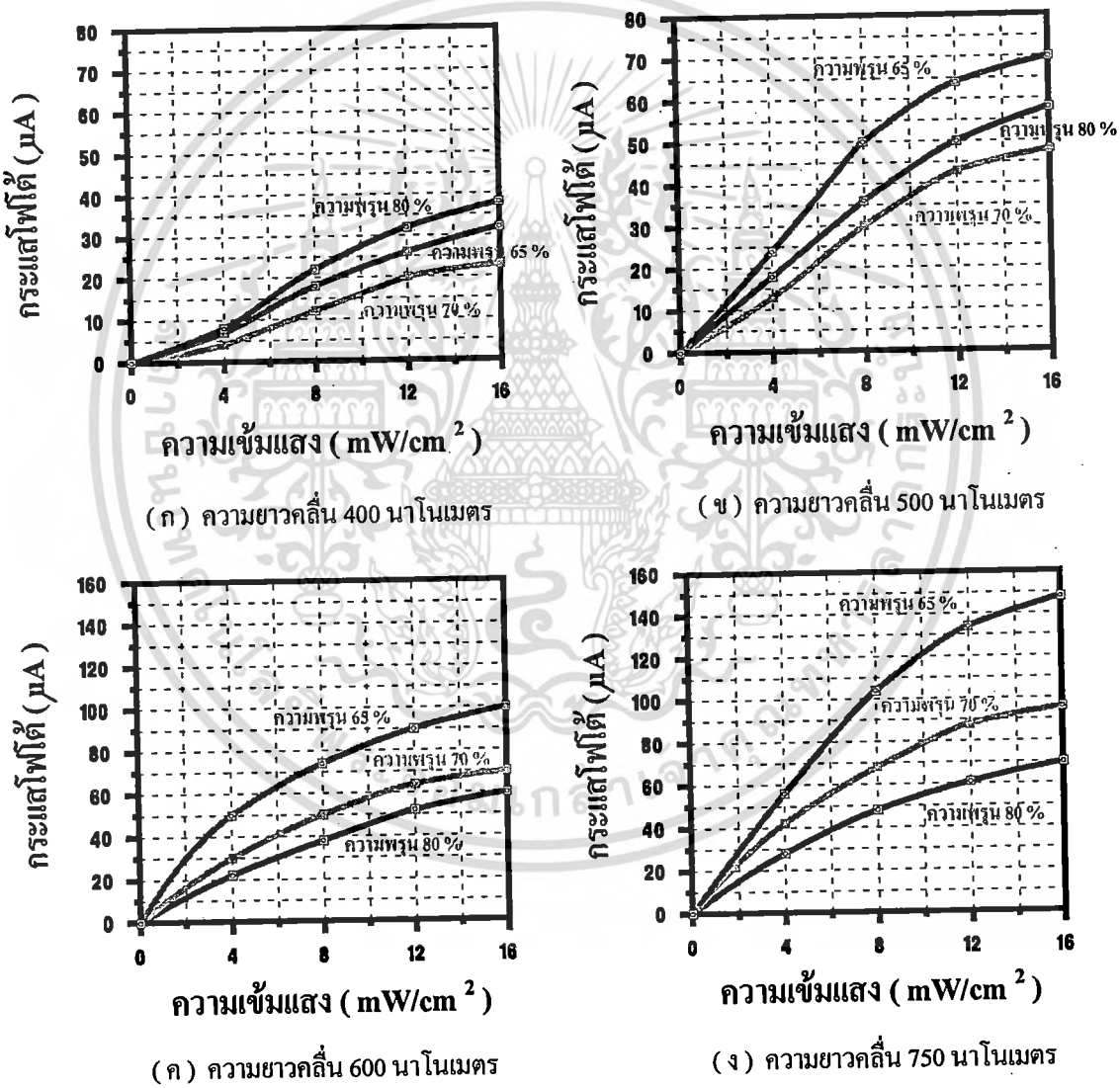
(ค) ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร

(ง) ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร

รูปที่ 7.7 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะทำการไบอัสแบบย้อนกลับของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุน 80% ซึ่งได้รับการฉายด้วยแสงที่มีความยาวคลื่นและความเข้มแสงค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

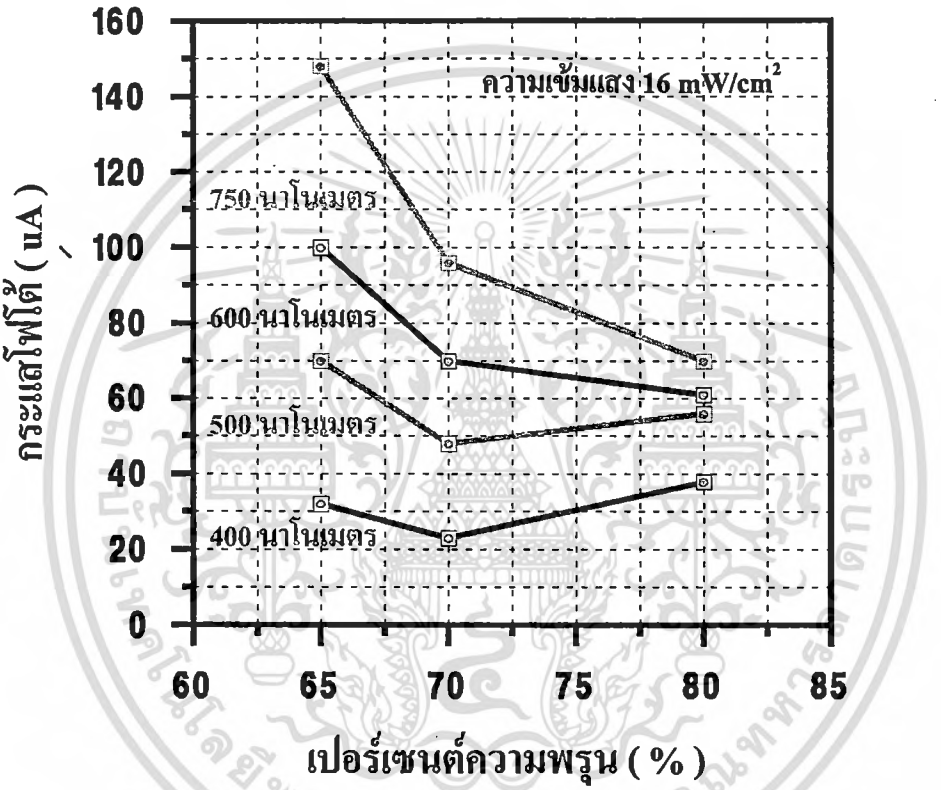
จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 7.5 , 7.6 และ 7.7 ข้างต้น จะเห็นได้ว่าปริมาณกระแสที่เกิดขึ้นมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปริมาณความเข้มแสง และค่าความยาวคลื่นของแสงที่ฉายให้แก่อุปกรณ์ ซึ่งจากข้อมูลที่ได้สามารถนำมาเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต้กับความเข้มแสงของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซนต์ความพรุน 65% , 70% และ 80% ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ ในขณะทำการไบอัสแบบย้อนกลับที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ -15 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 7.8



รูปที่ 7.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต้กับความเข้มแสงในขณะทำการไบอัสแบบย้อนกลับที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ -15 โวลต์ ของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุน 65% , 70% และ 80% ตามลำดับ ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ทุกตัวมีปริมาณกระแสโฟโต้เพิ่มสูงขึ้น ตามปริมาณความเข้มแสงที่ฉายให้แก่อุปกรณ์ในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่ากระแสโฟโต้ที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณที่แตกต่างกันออกไปตามค่าเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนที่นำมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์โฟโต้ดีเทคเตอร์ และตามค่าความยาวคลื่นแสงที่ได้ทำการฉายให้แก่อุปกรณ์ โดยมีความสัมพันธ์ดังแสดงเอาไว้ในรูปที่ 7.9



รูปที่ 7.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต้กับเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอนที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ

จากกราฟข้างต้นจะพบว่าอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนต่างกัน จะให้ปริมาณกระแสโฟโต้ที่แตกต่างกันออกไปด้วย โดยจะมีปริมาณกระแสโฟโต้เรียงตามลำดับจากมากไปน้อย ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ ดังนี้คือ

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

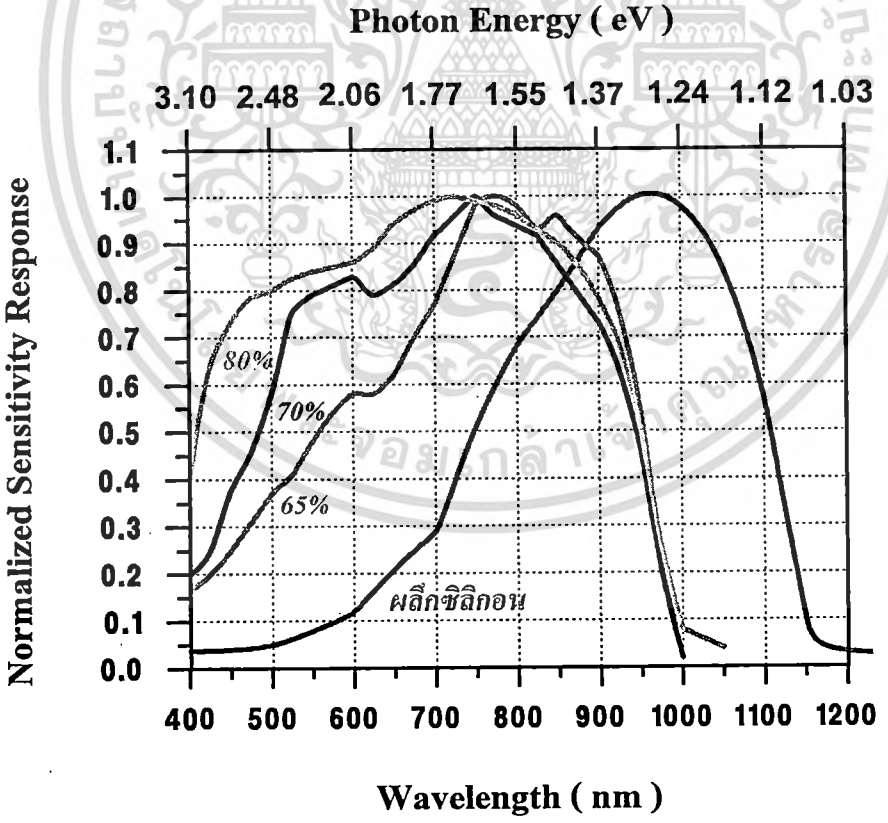
ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร : $I_{p65\%} > I_{p70\%} > I_{p80\%}$

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

ที่ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร : $I_{p80\%} > I_{p65\%} > I_{p70\%}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าที่ความยาวคลื่นแสง 500 , 600 และ 750 นาโนเมตร อุปกรณ์พอรัสซิลิกอน โฟโต้ดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุน 65% จะให้กระแสโฟโต้ในปริมาณที่สูงกว่าอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์อื่นๆ ยกเว้นที่ความยาวคลื่นแสง 400 นาโนเมตร อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุน 80% จะกลับให้กระแสโฟโต้ในปริมาณที่สูงกว่าอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์อื่น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ที่แตกต่างกันของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นนั่นเอง โดยอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากขั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนสูงๆจะตอบสนองต่อแสงความยาวคลื่นสั้นได้ดี ทั้งนี้เป็นผลจากการที่ชั้นพอรัสซิลิกอนดังกล่าวมีความกว้างของช่องว่างพลังงานเพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง ดังนั้นในการทดลองต่อไปจึงได้ทำการตรวจวัดการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆในช่วงตั้งแต่ 400-1200 นาโนเมตร ที่ความเข้มแสงขาเข้ามีค่าเท่ากัน ของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอรัสซิลิกอน ที่มีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนต่างๆ (65% , 70% และ 80% ตามลำดับ) เปรียบเทียบผลกับอุปกรณ์ซิลิกอนโฟโต้ไดโอดชนิด PIN ดังแสดงผลเอาไว้ในรูปที่ 7.10



รูปที่ 7.10 แสดงผลการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนต่างๆ เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ซิลิกอนโฟโต้ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่า ผลการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ ที่ผ่านการ normalized ด้วยความเข้มแสงที่ให้ออกมาจากต้นกำเนิดแสงแล้ว จะมีการตอบสนองในช่วงความยาวคลื่นสั้นได้ดี นอกจากนี้ยังมีย่านในการตอบสนองที่กว้างมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ซิลิกอนโฟโต้ไดโอดโดยมีรายละเอียดข้อมูลตามตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1

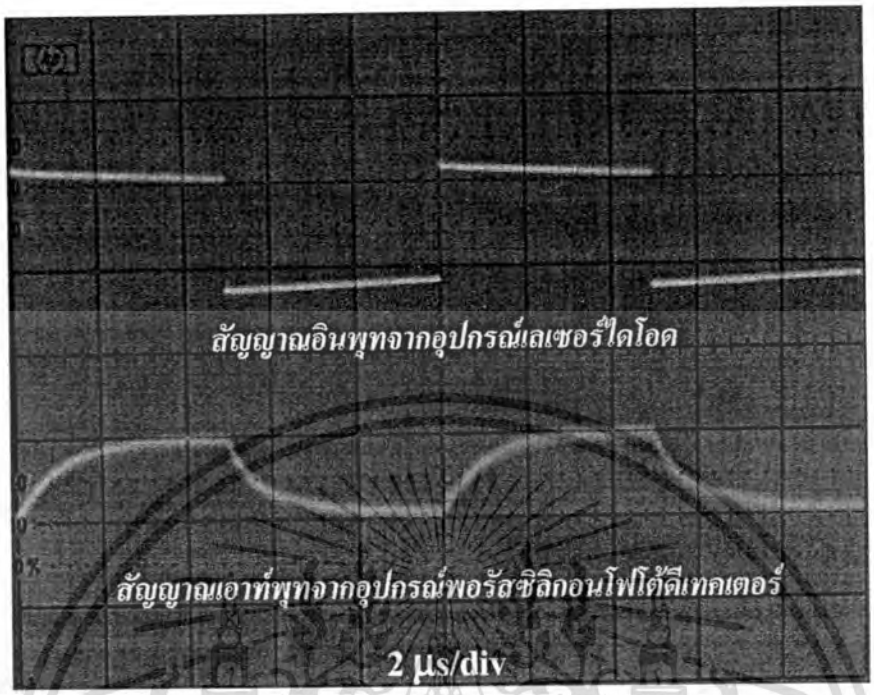
แสดงข้อมูลการตอบสนองทางแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนต่างๆ เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ซิลิกอนโฟโต้ไดโอด

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

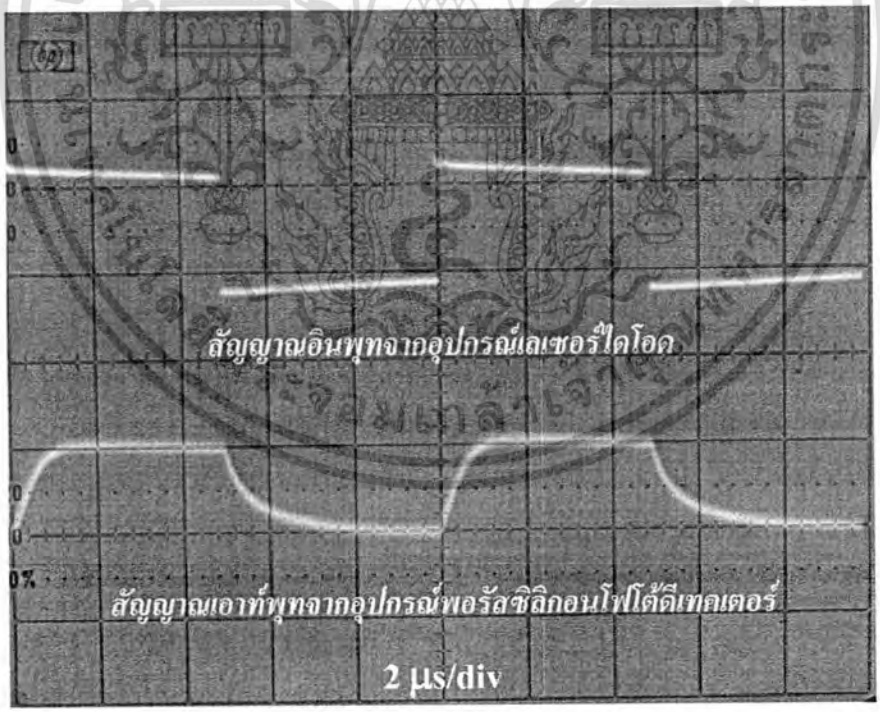
จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 7.10 และข้อมูลในตารางที่ 7.1 จะเห็นได้ว่าย่านในการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์จะขยายไปยังด้านความยาวคลื่นสั้น และมีความกว้างครอบคลุมความยาวคลื่นแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ (visible light) เมื่ออุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ได้รับการสร้างขึ้นจากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนสูงขึ้น โดยจะเกิดสเปกตรัมของการตอบสนองทางแสงในย่านที่ตามองเห็นได้ในช่วงประมาณ 500 ถึง 625 นาโนเมตรขึ้นอีกด้วย ทั้งนี้เป็นผลจากการที่โครงสร้างแถบพลังงานของพอรัสซิลิกอนมีค่าความกว้างของช่องว่างพลังงานมากขึ้น เมื่อขนาดโครงสร้างในระดับนาโนเมตรมีค่าลดลง ซึ่งเป็นไปตามปรากฏการณ์ quantum size effect ที่ได้ทำการเสนอมาแล้ว

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาผลการตอบสนองเชิงเวลา ของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงความเร็วในการทำงานของอุปกรณ์ โดยอินพุทคือแสงสีแดงจากอุปกรณ์เลเซอร์ไดโอด (LD) ความถี่ 100 KHz จากผลการศึกษาพบว่าอุปกรณ์พอรัสซิลิกอน โฟโต้ดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนประมาณ 65 % และ 80 % มีค่าความเร็วในการตอบสนอง (Rise Time : T_r) ประมาณ 2 μS และ 0.8 μS ที่ R_L เท่ากับ 1 KΩ ตามลำดับ ดังแสดงผลเอาไว้ในรูปที่ 7.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 7.11 แสดงผลการตอบสนองเชิงเวลาของอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นจาก
(ก) ชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนประมาณ 65 %
(ข) ชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนประมาณ 80 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองนี้ทำให้ทราบว่าอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นจากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนสูง จะมีความเร็วในการทำงานที่สูงกว่าอุปกรณ์ที่ได้รับการสร้างขึ้นจากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนต่ำ ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าของพอรัสซิลิกอนที่มีค่าความต้านทานสูง โดยค่าความต้านทานนี้จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นอีกเมื่อชั้นพอรัสซิลิกอนมีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนสูงขึ้น ส่งผลทำให้เมื่ออุปกรณ์ทำงานจะมีสนามไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณชั้นพอรัสซิลิกอนในปริมาณที่สูงขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อเกิดพาหะนำกระแสขึ้นภายในชั้นพอรัสซิลิกอนเนื่องจากผลของการฉายแสง พาหะเหล่านั้นจะถูกสนามไฟฟ้าภายในปัดออกมาสู่ขั้วไฟฟ้าภายนอกอย่างรวดเร็วกว่าเดิมมากขึ้นด้วย ด้วยเหตุผลนี้เองจึงทำให้อุปกรณ์ตรวจจับแสงที่ได้รับการสร้างขึ้นจากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนสูงๆนั้น จึงมีความเร็วในการตอบสนองต่อแสงที่สูงขึ้นตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8
สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

8.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการวิจัยพื้นฐานที่เกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอน เพื่อการประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง โดยพอรัสซิลิกอนนั้นเป็นชั้นวัสดุที่สามารถสร้างขึ้นได้จากกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีที่เรียกว่า anodization ของแผ่นผลึกซิลิกอน ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดยเนื้อหาการทดลองสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ คือ

1. ส่วนที่เป็นการทดลองและผลการทดลองที่เกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างของพอรัสซิลิกอน ซึ่งได้เสนอไว้ในหัวข้อการทดลองที่ 6.1 6.2 และ 6.3

2. ส่วนที่เป็นการทดลองและผลการทดลองที่เกี่ยวกับคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอน ซึ่งได้เสนอไว้ในหัวข้อการทดลองที่ 6.4 6.6 และ 6.7

นอกจากนี้แล้วจากการศึกษาพบว่าเนื้อหาทั้งสองส่วนข้างต้น ยังมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันอยู่ ซึ่งได้ถูกเสนอเอาไว้ในหัวข้อการทดลองที่ 6.5 โดยรายละเอียดทั้งหมดที่ได้กล่าวนำมานี้สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้คือ

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 6.1 6.2 6.3 และ 6.4 แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขในการ anodization ซึ่งก็คือเงื่อนไขในการสร้างชั้นพอรัสซิลิกอนนั่นเอง อันได้แก่ ชนิดและค่าสภาพต้านทานของผลึกซิลิกอน ความหนาแน่นกระแส เปอร์เซนต์ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก และเวลาที่ใช้ในการ anodization จะมีผลต่อลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอรัสซิลิกอน โดย

1. เกี่ยวกับโครงสร้างของพอรัสซิลิกอน

จากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการ anodization ต่างๆอย่างใดอย่างหนึ่ง คือ

- การเพิ่มค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี (0.1 - 30 โอห์ม-เซนติเมตร)
- การลดค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น (30 - 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร)
- การเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส (10 - 90 mA/cm^2)
- การลดเปอร์เซนต์ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (47 % - 10 %)
- การเพิ่มเวลาในการ anodization (5 - 30 นาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีผลทำให้ชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นมีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนสูงขึ้นกว่าเดิมได้ ซึ่งการที่ชั้นพอรัสซิลิกอนมีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนสูงขึ้นนั้น สามารถสรุปได้ว่าเป็นผลมาจากการที่โครงสร้างของพอรัสซิลิกอนมีขนาดลดลง ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีตามเงื่อนไขในการ anodization แบบต่างๆที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั่นเอง โดยเราสามารถสังเกตุการลดลงของขนาดโครงสร้างพอรัสซิลิกอนอย่างหยาบๆได้จากภาพถ่ายของเครื่องจุลทรรศ์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 - 15,000 เท่า สำหรับพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น และที่กำลังขยาย 50,000 เท่า สำหรับพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นจากแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี นอกจากนี้แล้วยังได้มีการนำเอาเทคนิครามานสเปกโทรสโทปี (FT-Raman) มาใช้วิเคราะห์หาขนาดของโครงสร้างพอรัสซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนต่างๆ โดยจะเปรียบเทียบกับสเปกตรัมรามานของผลึกซิลิกอนที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยตรงให้มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรค่าต่างๆ ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลมาตราฐานในงานวิจัยนี้ จากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่า พอรัสซิลิกอนที่ถูกสร้างให้มีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนสูงขึ้น จะมีขนาดของโครงสร้างในระดับนาโนเมตรลดลงได้ โดย

พอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุน 65 % จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 13 nm

พอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุน 75 % จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 8 nm

พอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุน 79 % จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 5 nm

พอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุน 85 % จะมีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 3 nm

2. เกี่ยวกับคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอน

จากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการ anodization ต่างๆอย่างใดอย่างหนึ่ง คือ

- การเพิ่มค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี (0.1 - 30 โอห์ม-เซนติเมตร)
- การลดค่าสภาพต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น (30 - 0.1 โอห์ม-เซนติเมตร)
- การเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแส (10 - 90 mA/cm^2)
- การลดเปอร์เซนต์ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (47 % - 10 %)
- การเพิ่มเวลาในการ anodization (5 - 30 นาที)

จะมีผลทำให้แสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่ให้ออกมาจากพอรัสซิลิกอนมีค่าความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงลดลง หรืออีกความหมายหนึ่งก็คือมีค่าพลังงานโฟตอนของแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์เพิ่มมากขึ้น โดยสามารถสังเกตุได้ จากการเคลื่อนของยอดสเปกตรัมแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ไปทางด้านความยาวคลื่นสั้น นั่นแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างแถบพลังงานของพอรัสซิลิกอนนั้นๆ จะต้องมีค่าความกว้างของช่องว่างพลังงานเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้แล้วผลการทดลองทั้ง 4 หัวข้อ (6.1 6.2 6.3 และ 6.4) ยังได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันระหว่างขนาดโครงสร้างในระดับนาโนเมตรของพอรัสซิลิกอน กับคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ โดยสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 6.5 ดังนี้คือ การกำหนดเงื่อนไขในการ anodization แบบต่างๆข้างต้น ส่งผลทำให้โครงสร้างในระดับนาโนเมตรของพอรัสซิลิกอนมีขนาดลดลงได้ ซึ่งสามารถสังเกตุได้จากการเพิ่มขึ้นของค่าเปอร์เซนซ์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอน นอกจากนี้ยังมีผลต่อคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ โดยทำให้ความยาวคลื่นแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์มีค่าลดลงนั่นแสดงว่าการลดขนาดโครงสร้างในระดับนาโนเมตรของพอรัสซิลิกอนลง มีผลทำให้ขนาดช่องว่างพลังงานของพอรัสซิลิกอนมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งสามารถสังเกตุได้จากค่าพลังงานโฟตอนของแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่มีค่ามากขึ้นนั่นเอง และจากการทดลองพบว่าชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนต่ำกว่า 50 % ลงไปนั้น ไม่สามารถแสดงคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ได้ ส่วนชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ 54 % ไปจนถึง 90 % สามารถแสดงคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ได้ โดยจะมีค่าความยาวคลื่นแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ลดลงจาก 625 นาโนเมตร ไปสู่ 545 นาโนเมตร หรือมีค่าพลังงานโฟตอนเพิ่มขึ้นจาก 1.98 eV ไปถึง 2.27 eV ได้ ซึ่งทั้งหมดที่สรุปมานี้สามารถยืนยันได้ถึงการเกิดปรากฏการณ์ Quantum size effect ได้เป็นอย่างดี

ส่วนการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติในการเปล่งแสงแบบโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ พบว่าเมื่อทำการลดอุณภูมิของสิ่งแวดล้อมภายในระบบปิดลง จะมีผลทำให้ปริมาณความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม และจะมีค่าคงที่ในที่สุดเมื่ออุณหภูมิมีค่าต่ำกว่า 50 K ลงไป

สุดท้ายเป็นการศึกษาถึงเสถียรภาพโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอน จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 6.7 จะเห็นได้ว่าการฉายแสงอุลตร้าไวโอเลตให้แก่พอรัสซิลิกอนเป็นเวลานานๆ มีผลทำให้ความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์มีการเปลี่ยนแปลงลดลงได้ ซึ่งจากผลการศึกษายังพบต่อไปอีกว่าในการเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์นี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงอย่างรวดเร็วมาก เมื่อพอรัสซิลิกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตตลอดเวลาอยู่ในสภาพแวดล้อมของก๊าซออกซิเจน ส่วนพอรัสซิลิกอนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมของสูญญากาศพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงน้อยที่สุด และไม่มีการเปลี่ยนแปลงลดลงของความเข้มแสงเลยเมื่อพอรัสซิลิกอนถูกจัดเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตตลอดเวลา ในสภาพแวดล้อมของสูญญากาศ ดังสรุปผลการทดลองเอาไว้ในตารางที่ 8.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8.1

แสดงข้อมูลปริมาณความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตตลอดเวลา กับพอรัสซิลิกอนที่ถูกจัดเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลต ในสภาพแวดล้อมของก๊าซต่างๆ เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง

สภาพแวดล้อม	ปริมาณความเข้มแสงของพอรัสซิลิกอนที่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลตตลอดเวลา	ปริมาณความเข้มแสงของพอรัสซิลิกอนที่ถูกเก็บเอาไว้ในที่มืดไม่ได้รับการฉายด้วยแสงอุลตร้าไวโอเลต
ออกซิเจน	10 %	80 %
อากาศ	30 %	90 %
ไนโตรเจน	70 %	99 %
สูญญากาศ	90 %	100 %

โดยการลดลงของปริมาณความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์นี้ มีสาเหตุที่สำคัญมาจากการสูญเสียไฮโดรเจนอะตอมที่ปกคลุมอยู่ที่ผิวของนาโนพอรัสซิลิกอน ทำให้ที่บริเวณผิวนาโนพอรัสซิลิกอนเกิดพันธะแขนขาดของซิลิกอนอะตอม (dangling bonds) และพันธะระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจน (Si-O-Si) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกริยาออกซิเดชั่นกับออกซิเจนในอากาศ โดยในงานวิจัยนี้สามารถทำการวิเคราะห์ตรวจสอบชนิดและปริมาณของพันธะต่างๆ ที่บริเวณผิวของนาโนพอรัสซิลิกอนได้จากเครื่องวัดฟูเรียร์ทรานฟอรม์อินฟราเรดสเปกโทรโฟโต้มิเตอร์ (FTIR) ด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (absorbance) พันธะแขนขาดและพันธะระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจนที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ จะเป็นจุดที่ทำให้การรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวนาโนพอรัสซิลิกอนมีลักษณะเป็นการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง (nonradiative recombination) ขึ้นได้ ซึ่งเป็นสาเหตุของการที่ปริมาณความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ลดลง ผลการทดลองนี้ได้สนันสนุนถึงสาเหตุและที่มาของการเปล่งแสงแบบโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอนได้ว่า น่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากการรวมตัวแบบเปล่งแสง (radiative recombination) ที่บริเวณผิวของนาโนพอรัสซิลิกอนนั่นเอง ซึ่งเป็นไปตามแบบจำลองสถานะของระดับพลังงาน 3 ระดับ (three-level luminescent state model) ที่ถูกเสนอขึ้นมา

จากผลการทดลองทางด้านโครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของพอรัสซิลิกอนที่ได้สรุปมาข้างต้น งานวิจัยนี้ได้นำผลการศึกษาเหล่านี้มาใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน เพื่อนำเอาพอรัสซิลิกอนมาประยุกต์ใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง ด้วยการสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในงานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการนำเอาพอรัสซิลิกอนมาใช้งานสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสง จากผลการศึกษาพบว่าอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์ที่สร้างขึ้นสามารถตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นสั้นได้ดี และมีความกว้างในการตอบสนองครอบคลุมความยาวคลื่นแสงในย่านที่ตามองเห็นได้ (visible light) มากขึ้น เมื่ออุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทค เตอร์นั้นๆได้รับการสร้างขึ้นจากชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีเปอร์เซนต์ความพรุนสูงขึ้น โดยจะเกิดสเปกตรัมของการตอบสนองทางแสงในย่านที่ตามองเห็นได้ในช่วงประมาณ 500 ถึง 625 นาโนเมตรขึ้น ทั้งนี้เป็นผลจากปรากฏการณ์ quantum size effect และจากผลการทดลองนี้เองทำให้มีความเป็นไปได้ที่สามารถจะนำเอาอุปกรณ์ดังกล่าวไปพัฒนาเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดสีของแสง (color sensor) หรือผลิตเป็นตัวตรวจวัด (detector) สัญญาณแสงภายในชิพวงจรรวมที่มีการสื่อสารด้วยแสงต่อไปภายอนาคตได้

8.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในการคำนวณหาค่าเปอร์เซนต์ความพรุนด้วยเทคนิคกราวิเมตริก และการวัดค่าความยาวคลื่นแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอรัสซิลิกอน ที่สร้างขึ้นจากการใช้เงื่อนไขในการ anodization แบบเดียวกัน พบว่าวิธีการทั้งสองในการวัดแต่ละครั้งให้ค่าเปอร์เซนต์ความพรุนและค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกันออกไปบ้าง ดังนี้คือ

ตารางที่ 8.2

แสดงค่าเปอร์เซนต์ความพรุนและค่าความยาวคลื่นแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้น โดยใช้เงื่อนไขในการ anodization แบบเดียวกัน

	พอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นโดยใช้ ■ แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี 10 Ω-cm ■ ความหนาแน่นกระแส 10 mA/cm^2 ■ สารละลายกรด HF 47 % ■ เวลาในการ anodization 10 นาที			พอรัสซิลิกอนที่สร้างขึ้นโดยใช้ ■ แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดพี 10 Ω-cm ■ ความหนาแน่นกระแส 10 mA/cm^2 ■ สารละลายกรด HF 20 % ■ เวลาในการ anodization 10 นาที		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
เปอร์เซนต์ความพรุน (%)	68 %	64 %	65 %	85 %	87 %	86 %
ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	600	605	605	560	555	560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ถึงความคลาดเคลื่อนของเปอร์เซนต์ความพรุน และค่าความยาวคลื่นแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอรัสซิลิกอน ที่สร้างขึ้นโดยใช้เงื่อนไขในการ anodization แบบเดียวกัน โดย

- สำหรับค่าเปอร์เซนต์ความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอน พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงประมาณ 2-3 % และสำหรับชั้นพอรัสซิลิกอนที่มีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนที่สูงเกินกว่า 81-83 % ขึ้นไป ค่าเปอร์เซนต์ความพรุนที่คำนวณมีแนวโน้มว่าจะมีค่าสูงกว่าความเป็นจริงได้ ทั้งนี้เนื่องจากผลของโครงสร้างที่เปราะบางของชั้นพอรัสซิลิกอน โดยสามารถสังเกตุได้จากการลดลงของความเข้มแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ เมื่อพอรัสซิลิกอนมีค่าเปอร์เซนต์ความพรุนสูงกว่า 81-83 % ขึ้นไป

- ส่วนค่าความยาวคลื่นแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอน พบว่า จะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ประมาณ $\pm$ 5 นาโนเมตร หรือประมาณ $\pm$ 0.018 eV สำหรับค่าพลังงานโฟตอนของแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ที่ให้ออกมา ทั้งนี้เนื่องจากในการทดลองได้ทำการวัดค่าความยาวคลื่นแสงโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ตลอดสเปกตรัมครั้งละ 5 นาโนเมตร นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Leigh Canham , *"A glowing future for silicon"* , NEW SCIENTIST , 10 April 1995.

[2] Kazuo Imai , *"A New Dielectric Isolation Method Using Porous Silicon"* , Solid State Electronics , Vol. 24 , pp. 155 - 164 , 1980.

[3] Kazou Imai and Hideyuki 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.

[4] Donald A. Neamen , SEMICONDUCTOR PHYSICS AND DEVICES ,IRWIN,INC , 1992

[5] สมเกียรติ ศุภเดช , อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ , พิมพ์ครั้งที่ 1 , 2521

[6] F. Kozlowski and W. Lang , *"Spatially resolved raman measurement at electroluminescent porous silicon"* , J. Appl. Phys. , Vol. 72 , No. 11 , pp. 5401 - 5408 , 1992.

[7] 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.

[8] 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 speciec and the photoluminescence intensity of porous silicon"* , Appl. Phys. Lett. Vol. 60 , pp. 1700 - 1702 , 1992.

[9] 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.

[10] Helmut F. Wolf , SEMICONDUCTORS , WILEY - INTERSCIENCE a division of Jonhn & Sons , pp. 50 , 1971.

[11] Yoshihiko , Kanemitsu , *"Light emission from porous silicon and related materials"* , Physics reports , Vol. 263 , No. 1 , pp. 8 , 1995.

[12] TudorE. Jenkin ,SEMICONDUCTOR SCIENCE GROWTH and CHARACTERIZATION TECHNIQUES , pp. 177

[13] Ying Kang and Jacob Jorne , *"Porous silicon formation : Morphological Stability Analysis"* , Appl. Phys. Lett. , Vol. 62 , No. 8 , pp. 2224 - 2226 , 1993.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[14] W. Lang , P. Steiner , H. Sandmaier, *"Porous silicon:anovel material for microsystems"*, Sensors and Actuators A51, pp. 31-36, 1995

[15] V. Lehmann and U. Gosele , *"Porous silicon formation : A Quantum Wire Effect , Appl. Phys. Lett."* , Vol. 58 , No. 8 , pp. 856 - 858 , 1991.

[16] 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.

[17] Y. Kanemitsu , *"Luminescence properties of nanometer- size Si crystallites : core and surface states"* , Phys. Rev. B , Vol. 49 , No. 23 , pp. 16845 - 16848 , 1994.

[18] 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.

[19] H. Takagi , M. Mitome , R. Yano and T. Nakagiri , Solid State Phys , Vol. 27 , 1992 , pp. 875

[20] Y. Kanemitsu , T. Ogawa , K. Shiraishi and K. Takeda , Phys. Rev. , B48 , 1993 , pp.4883.

[21] T. Kawaguchi and S. Miyazima , Japan J. Appl. Phys. , Vol. 32 , pp. L215 , 1993.

[22] R.E. Hummel , A. Morrone , M. Ludwing and S.S. Chang , Appl. Phys. Lett. , Vol. 63 , pp. 2771 , 1993.

[23] M.H. Ludwig , E.E. Hummel and M. Stora , Thin Solid Films , Vol. 255 , pp. 103 , 1995.

[24] 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.

[25] แม้น อมรสิทธิ์ , อมร เพชรสม , *"หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ"* , พิมพ์ครั้งที่ 1 , 2523.

[26] G. Lucovsky and W.B. Pollard , *"Vibrational Properties in The Physics of Hydrogenated Amorphous Silicon II"* , edited by J.D. Joennopoulos (Springer - Verlay) , pp. 301 , 1984.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ชื่อ	สัญญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	q	1.60×10^{-19}	C
ค่าคงที่ของโบลต์มันน์	k	1.38×10^{-23}	J/K
ค่าคงที่ของแพลงค์	h	6.63×10^{-34}	J-s
ค่าเพอร์มิตติวิตี้ของสูญญากาศ	ε_o	8.85×10^{-14}	F/cm
ค่าความเร็วแสง	c	3×10^{8}	m/s

2. คุณสมบัติของซิลิกอน

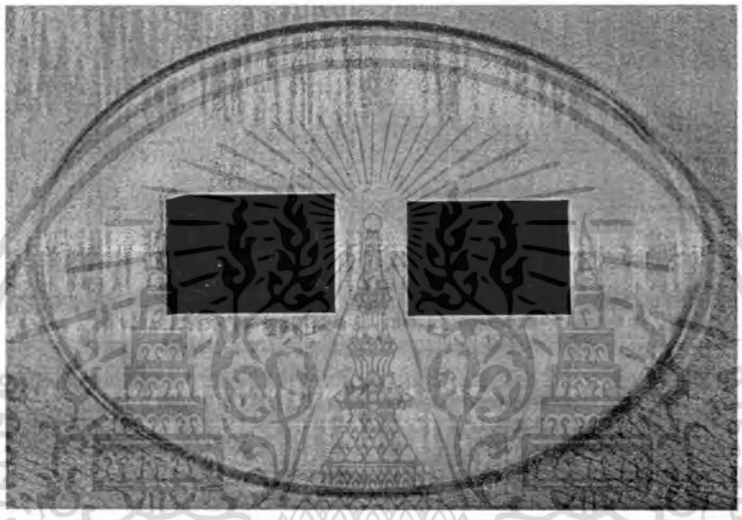
เลขอะตอม	14	
น้ำหนักอะตอม	28.086	
ความหนาแน่นอะตอม	2.96×10^{22}	cm^3
ความหนาแน่น	2.328	g/cm^3
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	11.7	
พลังงานแถบต้องห้าม	1.14	eV
สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของพลังงานแถบต้องห้าม	-2.3×10^{-4}	$eV/^oC$
จุดหลอมเหลว	1417	^oC
ดัชนีหักเห	3,420	
การนำความร้อน	1.57	W/cm
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	2.6×10^{-6}	$(^oC)^{-1}$
ค่าคงที่ของผลึก	5.4307	^oA
ความดันต่อหน่วยปริมาตร	0.98×10^{12}	cm^2/dyn
ความร้อนในการละลาย	1000	J/g
ความหนาแน่นพาหะของซิลิกอนบริสุทธิ์	1.54×10^{10}	cm^{-3}
ความดันไอ	2.8×10^{-4}	mm Hg
โครงสร้างผลึก	fCC , diamond	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

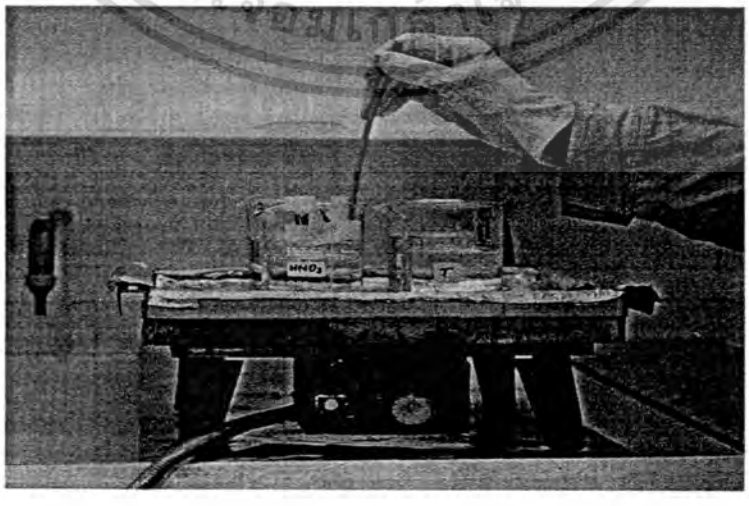
1. ลำดับภาพขั้นตอนในการสร้างชั้นนาโนพอรัสซิลิกอน

1. การเตรียมแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น



รูปที่ 1ข แสดงแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้นที่มีผิวด้านหน้าขัดมันเป็นกระจกเงา

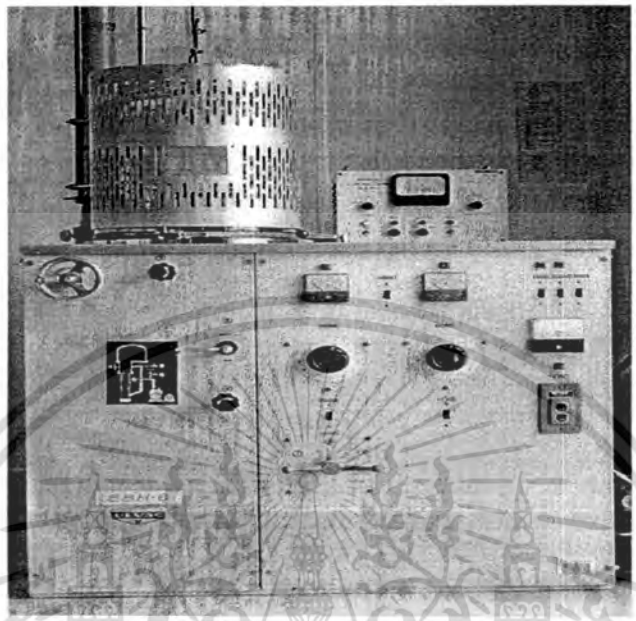
2. การทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น



รูปที่ 2ข แสดงการทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกซิลิกอน

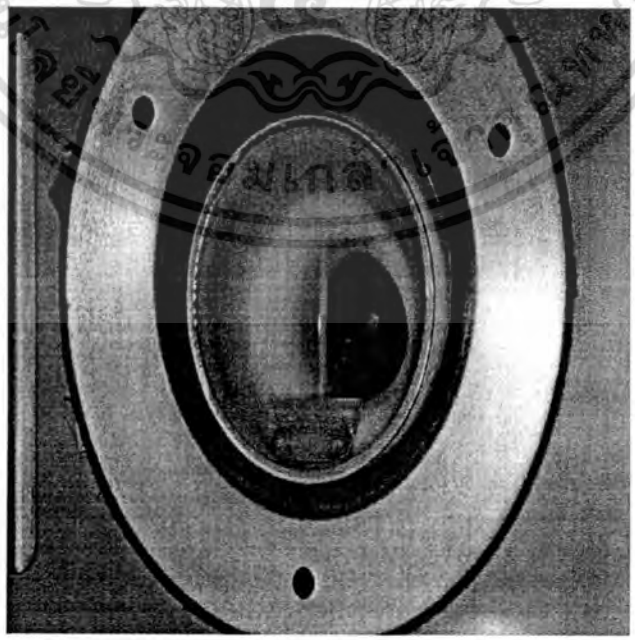
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสูญญากาศ



รูปที่ 3ข แสดงการเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสูญญากาศด้วยเครื่อง vacuum evaporator

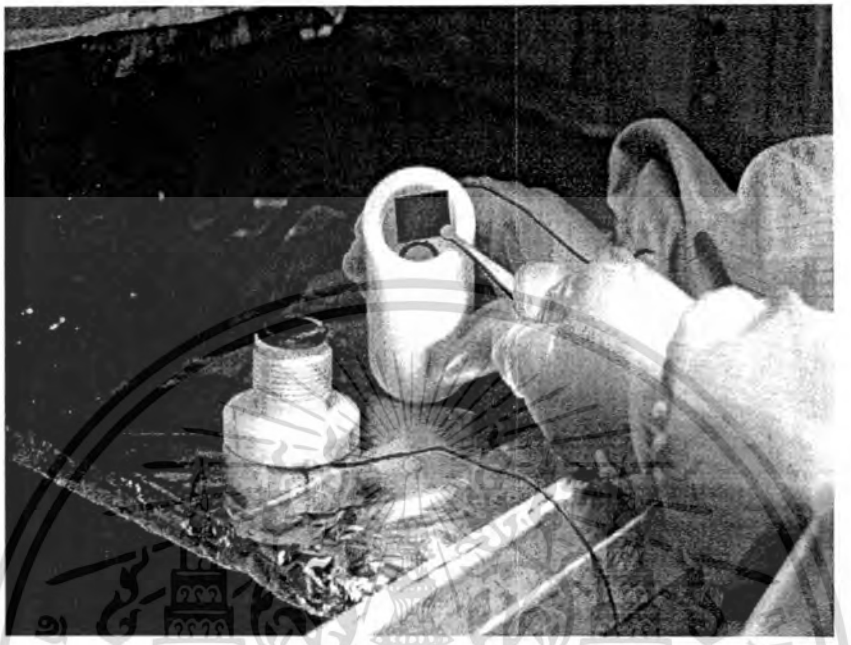
4. กระบวนการซินเตอร์ริ่ง



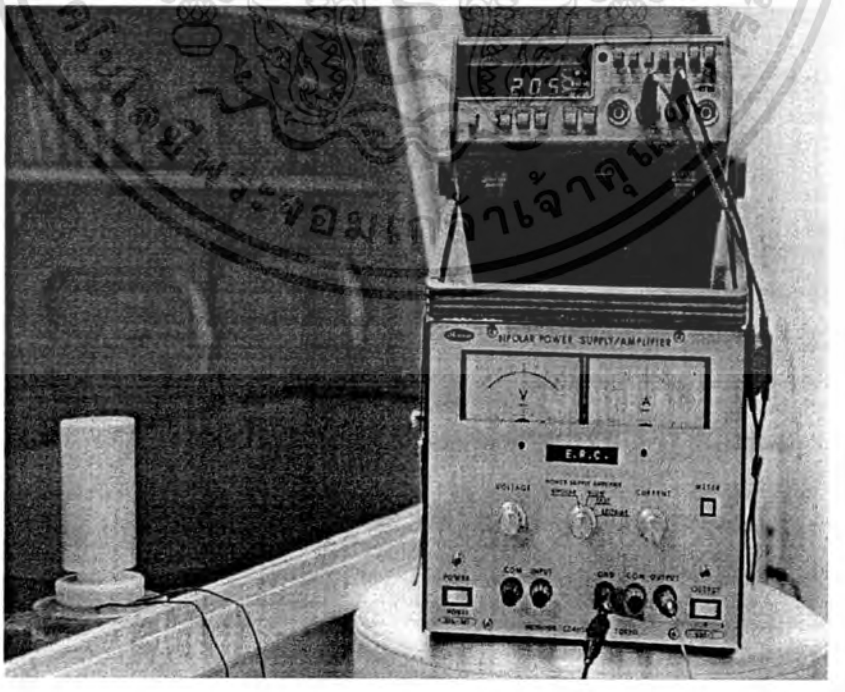
รูปที่ 4ข แสดงการซินเตอร์ริ่งโลหะอลูมิเนียมด้านหลังแผ่นผลึกซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การสร้างชั้นพอรัสซิลิกอน



รูปที่ 5ข แสดงการบรรจุแผ่นผลึกซิลิกอนเข้าสู่ชุดกัดทางไฟฟ้าเคมี



รูปที่ 6ข แสดงกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมีเพื่อสร้างชั้นพอรัสซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์ที่ได้รับการตีพิมพ์ทางวิชาการ

- เกียรติชัย มากเกษม , นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง , สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล และสมเกียรติ ศุภเดช, *"การศึกษาคุณสมบัติโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอรัสซิลิกอน"* ,วิศวสารลาดกระบัง , ปีที่ 12 , ฉบับที่ 1 , หน้า 8 - 14 , 2538.

- นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง , ผศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล และรศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช , *"เสถียรภาพโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอน"* , การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 18, หน้า 678 - 683 , พฤศจิกายน 2538.

- สุรเชษฐ์ วัฒนไพโรจน์ , นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง , ผศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล และรศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช , *"ผลของเงื่อนไข anodization ที่มีต่อโฟโต้ลูมิเนสเซนซ์ของพอรัสซิลิกอน"* , การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19 , หน้า EL 27-32 , 7 - 8 พฤศจิกายน 2539.

- กลุธิดา สวาทะสุข , นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง , สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล และสมเกียรติ ศุภเดช , *"การศึกษาลักษณะโครงสร้างและความพรุนของชั้นพอรัสซิลิกอน"* , การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 , หน้า 680 - 683 , 12 - 13 พฤศจิกายน 2541.

- อุบล ศรีจง , นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง , สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล และสมเกียรติ ศุภเดช , *"การศึกษาอุปกรณ์พอรัสซิลิกอนโฟโต้ดีเทคเตอร์"* , การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 , หน้า 676 - 679 , 12 - 13 พฤศจิกายน 2541.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้