

การประยุกต์ใช้งานชั้นพอร์ซซิลิคอนในเซลล์แสงอาทิตย์

APPLICATION OF POROUS SILICON IN SILICON SOLAR CELL



นาย วิบูลย์ กิ่งชะกิจ

นาย เศรษฐชัย เวชพุกภัยไพบูลย์

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 61845

วัน,เดือน,ปี 21 ก.ค. 2549



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้งานพอร์ซซิลิคอนในเซลล์แสงอาทิตย์
APPLICATIONS OF POROUS SILICON IN SILICON
SOLAR CELLS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประยุกต์ใช้งานชั้นพอร์ซซิลิคอนในเซลล์แสงอาทิตย์

APPLICATION OF POROUS SILICON IN SILICON SOLAR CELLS

จัดทำโดย

นาย วิบูลย์ กิ่งสะกิจ

รหัส 45015252

นาย เสริมจชัย เวชพดกษย์ไพบูลย์ รหัส 45015255



ปริญญาานิพนธ์นี้ได้ผ่านการตรวจสอบแล้วโดยอาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. สมเกียรติ สุกเดช)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้งานชั้นพอร์ซิลิคอนในเซลล์แสงอาทิตย์

APPLICATION OF POROUS SILICON IN SILICON SOLAR CELLS

จัดทำโดย

นาย วิบูลย์ กิ่งสะกิจ

รหัส 45015252

นาย เศรษฐชัย เวชพุกษ์ไพบูลย์ รหัส 45015255



โครงการนี้ได้รับการตรวจสอบแล้วพร้อมที่จะทำการสอบได้



(รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการ เรื่อง การประยุกต์ใช้งานชั้นพอร์สซิติกอนในเซลล์แสงอาทิตย์ต้องขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ สุกเดช อาจารย์ที่ปรึกษา เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้ความรู้ คำสั่งใจ คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่อง และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการนี้ ทำให้การทำโครงการชิ้นนี้มีความก้าวหน้าขึ้นมาก ขอกราบขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ ดิชมในโครงการนี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์และนักศึกษาปริญญาโทและเพื่อนนักศึกษาปริญญาตรีทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในหลายๆด้าน โดยเฉพาะเรื่องคำแนะนำในการใช้ อุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ จึงขอถือโอกาสแสดงความขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

(นาย วิบูลย์ กิ่งชะกิจ)

(นาย เสริมรัฐ ยวาทฤกษ์ไพบูลย์)

ผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้งานชั้นพอร์สซิลิคอนในเซลล์แสงอาทิตย์

นาย วิบูลย์ กิ่งสะกิจ

นาย เศรษฐชัย เวชพุกฤษ์ไพบูลย์

รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

พอร์สซิลิคอนเป็นวัสดุใหม่ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญหลายประการ จึงถูกนำไปใช้งานด้านต่างๆอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ รายงานฉบับนี้ได้เสนอการทดลองและผลการทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนบนผิวแผ่นผลึกซิลิคอนระนาบ(111) ด้วยเทคนิคการกัดข้อมลสี(Stain etching) โดยใช้สารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริกและน้ำ อัตราการเกิดชั้นพอร์สซิลิคอนจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนและอุณหภูมิของสารละลายที่ใช้ ชนิดและขนาดของสภาพความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นผลึกซิลิคอน และการกระตุ้นด้วยแสงยังช่วยเพิ่มอัตราการเกิดชั้นพอร์สได้อีกด้วย ชั้นพอร์สที่สร้างได้ ถูกนำไปตรวจสอบคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ด้วยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต และคุณสมบัติการสะท้อนแสง ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าชั้นของพอร์สซิลิคอนสามารถทำหน้าที่เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้ยังได้เสนอผลการทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเฉพาะบริเวณที่ต้องการ โดยใช้ชั้นของน้ำยาไวแสง (Photo resist) เป็นชั้นหน้ากักป้องกันการกัดของสารละลาย และด้วยเทคนิคดังกล่าว สามารถทำให้ได้กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบประหยัดและมีประสิทธิภาพสูง (Low cost and High efficiency) เนื่องจากสามารถลดขั้นตอนการสร้างจากกระบวนการเดิมและทั้งยังช่วยเพิ่มพื้นที่ไวแสงของเซลล์ได้ จากการทดลองสร้างและเปรียบเทียบเซลล์แบบใหม่ที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง มีคุณสมบัติที่ดีกว่าเซลล์แบบดั้งเดิมที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงโดยให้กระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นราว 20 % ประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มขึ้นประมาณ 24 % และค่ากำลังงานสูงสุดเพิ่มขึ้นมากกว่า 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

APPLICATION OF POROUS SILICON IN SILICON SOLAR CELLS

Mr. Wiboon Kuenghakit

Mr. Srethachai Wedchaipukpaiboon

Assoc.Prof.Dr. Somkiat Supadech (Advisor)

Academic Year 2004

Abstract

Because of the many important properties of new material porous silicon, it is widely used in various field especially in electronic devices.

This paper presents the experiments and results of formation of porous silicon layer on the surface of single crystalline (111) plane silicon wafer by stain etching technique of HF, HNO₃ based solution. The growth rate of porous silicon layer depend on the ratio of acid and solution temperature, type and resistivity of silicon wafer, more over the growth rate is increased with light exposure during porous formation. The porous silicon layer can shows photoluminescence property and act as good anti-reflection layer.

The technique of selected area of porous silicon formation by using photo resist layer as the mask layer is also reported. By applying this technique, the simple, low cost and high efficiency silicon solar cells fabrication process is achieved. The steps of fabrication process is reduced, while active area is increased. From the experimental results, it is evident that the characteristics of silicon p-n junction solar cells with porous silicon anti-reflection layer are better than the conventional cells with silicon dioxide anti-reflection layer. The short circuits current, cells efficiency are increased about 20%, 24% respectively, while maximum power is increased more than 20%

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
Abstract	IV
สารบัญ	VI
บทที่ 1 ประวัติความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์	
บทนำ	1
ประวัติและความเป็นมา	2
เซลล์แสงอาทิตย์	4
พลังงานแสงอาทิตย์และการแผ่รังสี	6
รังสีของแสงอาทิตย์บนพื้นโลก	10
ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย	10
สารกึ่งตัวนำ	11
บทที่ 2 ทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น	
บทนำ	14
2.1 รอยต่อพี-เอ็น ในภาวะสมดุล ขณะที่ไม่มีแรงดันไบอัส	14
2.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง	18
2.3 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	21
2.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	23
2.4.1 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นไม่ได้รับแสง	23
2.4.2 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง (Illumination)	24
2.5 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น	27
2.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นและวงจรมุมล	32
2.7 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์	34
2.8 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	36
2.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	37
2.9.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_j	37
2.9.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_p	38
2.9.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ (V_{oc})	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.10 ผลของชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์	40
2.11 การสะท้อนของแสงในค้ำกลางต่างชนิดกัน	41
บทที่ 3 พอร์สซิลิคอน (Porous Silicon)	41
3.1 บทนำ	42
3.2 โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน	42
3.3 ความพรุนของพอร์สซิลิคอน	44
3.4 การแบ่งประเภทของพอร์สซิลิคอน	44
3.4.1 แบ่งตามขนาดของแท่งพอร์ส	44
3.4.2 แบ่งตามลักษณะของรูพรุน	45
3.4.3 แบ่งตามรูปร่างของรูพรุน	45
3.5 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิคอน	47
3.6 พฤติกรรมทางแสง	47
3.6.1 พฤติกรรมทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	48
3.6.2 พฤติกรรมทางแสงของผลึกซิลิคอน	50
3.6.3 พฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิลิคอน	52
3.7 คุณสมบัติของพอร์สซิลิคอน	53
บทที่ 4 กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอน	53
4.1 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี	54
4.1.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมี	55
4.1.2 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี	59
4.1.3 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนกับสารละลายไฮโดรฟลูออริก	60
4.1.4 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี	62
4.1.5 กลไกการเกิดพอร์สซิลิคอน	62

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.6 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน	70
4.1.7 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของพอร์สที่สร้างด้วยวิธี Anodication	73
4.2 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching	75
4.2.1 กลไกการทำปฏิกิริยาเคมี	75
4.2.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน ที่สร้างจากวิธี Stain etching	76
4.3 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Microwave plasma decomposition ของก๊าซไซเรน (SiH_4)	77
4.4 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Laser breakdown ก๊าซไซเรน (SiH_4)	78
4.5 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี High frequency discharge	79
บทที่ 5 การทดลอง	82
5.1 การทดลองสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมลึ	82
5.1.1 การทดลองสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมลึ	82
5.1.2 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสร้างพอร์สซิลิคอน โดยมีการส่อง แสงกระตุ้น	83
5.1.3 การศึกษาผลของปัจจัยภายนอกในการสร้างพอร์สซิลิคอน	85
5.2 การศึกษาการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอน (Selection Area)	88
5.2.1 วัตถุประสงค์	88
5.2.2 การทดลอง	88
5.2.2.1 การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนด้วยชั้น ป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350	88
5.2.2.2 การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการ เคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสง ชนิดบวก Az เบอร์ 1350 และทำการลอกชั้นอลูมิเนียมด้วยกรดกัด อลูมิเนียมก่อนทำการสร้างพอร์สซิลิคอน	89
5.2.2.3 การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการ เคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสง ชนิดบวก Az เบอร์ 1350	89
5.2.2.4 การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนด้วยชั้น ป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818	90

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.2.2.5	การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 และทำการลอกชั้นอลูมิเนียมด้วยกรดกัดอลูมิเนียมก่อนทำการสร้างพอร์สซิติคอน	90
5.2.2.6	การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818	91
5.2.2.7	การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 โดยทำการเคลือบน้ำยาไวแสงหลายชั้น	91
5.2.3	ผลการทดลอง	92
5.2.3.1	ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนด้วย ชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350	92
5.2.3.2	ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 และทำการลอกชั้นอลูมิเนียมด้วยกรดกัดอลูมิเนียมก่อนทำการสร้างพอร์สซิติคอน	93
5.2.3.3	ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350	94
5.2.3.4	ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818	95
5.2.3.5	ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 และทำการลอกชั้นอลูมิเนียมด้วยกรดกัดอลูมิเนียมก่อนทำการสร้างพอร์สซิติคอน	96
5.2.3.6	ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818	97

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.2.3.7	ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 โดยทำการเคลือบน้ำยาไวแสงหลายชั้น	98
5.3	การทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อน	100
5.3.1	วัตถุประสงค์	100
5.3.2	การทดลอง	104
5.3.3	ผลการทดลอง	103
5.4	สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	125
5.4.1	การสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกักขังอมสี	125
5.4.2	การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอน	126
5.4.3	การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	127
ภาคผนวก ก	คำคงที่ทางฟิสิกส์	A
ภาคผนวก ข	น้ำยาไวแสง	E
ภาคผนวก ค	สารเคมีและการใช้สารเคมี	J
ภาคผนวก ง	น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกักขังซิติคอน โคออลไซด์ และอะลูมิเนียม	M
ภาคผนวก จ	การทำความสะอาดแผ่นซิติคอน	O
ภาคผนวก ฉ	ประวัติทีมงาน	P
บรรณานุกรม		R



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ของผลึกซิลิคอน	3
รูปที่ 1.2 การทดลองให้แสงตกกระทบขั้วไฟฟ้าเพียงขั้วเดียว	3
รูปที่ 1.3 ระบบการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์	4
รูปที่ 1.4 พลังงานแสงอาทิตย์ที่โลกได้รับ	6
รูปที่ 1.5 แหล่งพลังงานต่างๆ ของโลก	7
รูปที่ 1.6 มุมของลำแสงจากดวงอาทิตย์ที่ทำกับแนวตั้งฉากกับระดับพื้นโลก	9
รูปที่ 1.7 การหาค่ามุม θ โดยการพิจารณาเงาของแสง	9
รูปที่ 1.8 แผนที่แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศต่างๆ	10
รูปที่ 1.9 ลักษณะของผลึกซิลิคอนซึ่งถูกเจือด้วยอะตอม โบรอนและฟอสฟอรัส	13 14
รูปที่ 2.1 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริง	15
รูปที่ 2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น	15
รูปที่ 2.3 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ ขณะที่ไม่มีไบอัส	15
รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของด้านพีและด้านเอ็น ขณะที่ไม่เกิดรอยต่อพี-เอ็น	16
รูปที่ 2.5 รอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นแสดงด้วยแถบพลังงาน	17
รูปที่ 2.6 รอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้รับการไบอัสตรง	18
รูปที่ 2.7 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง	19
รูปที่ 2.8 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A	20
รูปที่ 2.9 รอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	21
รูปที่ 2.10 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	22
รูปที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ V_A	22
รูปที่ 2.12 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.13 ภาพจำลองการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์	25
รูปที่ 2.14 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแสง	25
รูปที่ 2.15 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดัน ของรอยต่อพี-เอ็นซึ่งไม่ได้รับแสง และได้รับแสง	26
รูปที่ 2.16 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ และพารามิเตอร์ที่สำคัญ	27
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ในอุณหภูมิต่ำที่ 300K กับขนาด E_G ของสารกึ่งตัวนำ	30
รูปที่ 2.18 ตัวอย่างลักษณะ โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบประสิทธิภาพสูง	31
รูปที่ 2.19 โครงสร้างภายในของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน	32
รูปที่ 2.20 ลักษณะวงจรมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น	32
รูปที่ 2.21 ผลของความต้านทานอนุกรม	34
รูปที่ 2.22 ผลของความต้านทานขนาน	35
รูปที่ 2.23 การลดลงของพลังงานขณะที่ค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้น	35
รูปที่ 2.24 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์	36
รูปที่ 2.25 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์	38
รูปที่ 2.26 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นสกรีนสะท้อนแสง	39
รูปที่ 2.27 การสะท้อนของแสงในตัวกลางแบบ 2 ชั้น และแบบ 3 ชั้น	40
รูปที่ 3.1 ภาคตัดขวางของโครงสร้างนาโนพอร์สซิลิคอน	41
รูปที่ 3.2 ภาพจำลองโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอน	41
รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเนื้อผลึกซิลิคอน (q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์สซิลิคอน	43
รูปที่ 3.4 แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์สซิลิคอน ที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ	43
รูปที่ 3.5 แสดงถึงรูพรุนของพอร์สซิลิคอนลักษณะต่าง ๆ	44
รูปที่ 3.6 แสดงถึงรูพรุนของพอร์สซิลิคอนรูปร่างต่าง ๆ	45
รูปที่ 3.7 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ	46
รูปที่ 3.8 แผนภาพสีของแสงที่ความยาวคลื่น และค่าพลังงานต่างๆ	48
รูปที่ 3.9 แสดงแผนภาพโครงสร้างของแถบพลังงานแบบ Direct band gap	48
รูปที่ 3.10 แสดงแผนภาพโครงสร้างของแถบพลังงานแบบ Indirect and gap	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.11 แบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้ง 3 ระดับภายในพอร์สซิลิคอน	51
รูปที่ 4.1 แสดงภาคตัดขวางของอุปกรณ์เซดไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการ Anodization	53
รูปที่ 4.2 ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่างๆ	54
รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซดไฟฟ้าเคมีระหว่างผลึกซิลิคอน	55
รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซดไฟฟ้าเคมี	
ในส่วนที่มีการไบอัสแบบ Anodic bias	57
รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอน	59
รูปที่ 4.6 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่าง ๆ	61
รูปที่ 4.7 ขั้นตอน และกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน	64
รูปที่ 4.8 แสดงแบบจำลองการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน	65
รูปที่ 4.9 แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะ โฮลที่ถูกดึงมารวมกันที่บริเวณก้นหลุม	66
รูปที่ 4.10 แสดงบริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ผนังของรูหรือหลุม	
ที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอน	67
รูปที่ 4.11 แสดงการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบ ๆ ผนังของรูพอร์น	68
รูปที่ 4.12 แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบ ๆ ผนังของรูพอร์น	69
รูปที่ 4.13 แสดงการกระจายตัวของกระแสรอบ ๆ ผนังของรูพอร์น	69
รูปที่ 4.14 แสดงกลไกในการหยุดกัด โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนชนิดพี	70
รูปที่ 4.15 แสดงแผนภาพบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (SCR) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของ	
พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น	73
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัสในปฏิกิริยาการกัดและค่าตัวแปรต่าง ๆ ใน	
พอร์สซิลิคอน	74
รูปที่ 4.17 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching และ ตัวอย่างของพอร์สซิลิคอนที่ได้จาก	
การกัดแบบข้อมลี้	75
รูปที่ 4.18 ภาพเปรียบเทียบของการใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้างด้วยวิธี Stain etching	77
รูปที่ 4.19 แสดงอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการ	
Microwave plasma decomposition ก๊าซไซเรน (SiH_4)	78
รูปที่ 4.20 แสดงการ Spark ที่เกิดขึ้นระหว่างปลายลวดทั้งสแตนกับแผ่นผลึกซิลิคอน	79
รูปที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบการสะท้อนแสงของ ออกไซด์, แผ่นซิลิคอน และพอร์สซิลิคอน	81
รูปที่ 5.2 (ก)พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากกระบวนการการกัดข้อมลี้	

(ข)การเรียงแสงของพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากกระบวนการการกัดข้อมลี้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิติคอนที่ได้จากการกัดข้อมสีที่เวลาต่างๆ ด้วยเครื่อง SEM ที่เวลาต่างกัน	84
รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบวัดเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่เวลาต่าง ๆ	85
รูปที่ 5.5 (ก)ชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างด้วยสารละลายที่ไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม (ข) ชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม	86
รูปที่ 5.6 (ก)ชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างด้วยสารละลายที่ไม่ผสมกับเอทานอลแอลกอฮอล์ (ข)ชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างด้วยสารละลายผสมกับเอทานอลแอลกอฮอล์ 5 หยด (ค)ชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างด้วยสารละลายผสมกับเอทานอลแอลกอฮอล์ 10 หยด (ง)ชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างด้วยสารละลายผสมกับเอทานอลแอลกอฮอล์ 20 หยด	87
รูปที่ 5.7 พอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนที่มีชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350	92
รูปที่ 5.8 พอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนที่ทำการเคลือบ อลูมิเนียมที่มีชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที	94
รูปที่ 5.9 การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350	95
รูปที่ 5.10 รูปการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818	95
รูปที่ 5.11 รูปการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 และทำการลอกชั้นอลูมิเนียมด้วยกรดกัดอลูมิเนียมก่อน	97
รูปที่ 5.12 รูปการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818	98
รูปที่ 5.13 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิติคอนที่ได้จากการกัดข้อมสีที่เวลา 40 วินาที และ 60 วินาที โดยเปรียบเทียบการกัดแบบปกติ และการกัดทะลุชั้นอลูมิเนียมบาง ด้วยเครื่อง SEM	99
รูปที่ 5.14 แสดง เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิติคอนและซิติคอนไดออกไซด์ เป็นชั้นลดการสะท้อนสร้างบนฐานรองเดียวกัน	104
รูปที่ 5.15 การเรืองแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อน	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.16 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 3-5 Ω -cm	105
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงาน และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 3-5 Ω -cm	106
รูปที่ 5.18 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 3-5 Ω -c	107
รูปที่ 5.19 กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงาน และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 3-5 Ω -cm	107
รูปที่ 5.20 (ก) กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 3-5 Ω -cm	
(ข) กราฟแสดงการ เปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 3-5 Ω -cm	109
รูปที่ 5.21 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 6-12 Ω -cm	110
รูปที่ 5.22 กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงาน และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 6-12 Ω -cm	111
รูปที่ 5.23 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 6-12 Ω -cm	112
รูปที่ 5.24 กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงาน และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 6-12 Ω -cm	112
รูปที่ 5.25 (ก) กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 6-12 Ω -cm	
(ข) กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพด้านทาน 6-12 Ω -cm	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.26	กราฟแสดง ความถี่ของรอยต่อพี-เอ็นที่ได้จากการวัด โดยทำการ Pre-dep 30 นาที และทำการ Drive-in 40 นาที ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส ของแผ่นที่มีฐานรองที่มีสภาพต้านทาน 6-12 Ω -cm ได้ความถี่รอยต่อประมาณ 1.3 ไมโครเมตร	115
รูปที่ 5.27	กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω -cm และทำการขั้วลึกรอยต่อด้านหลัง 4 ชั่วโมง	116
รูปที่ 5.28	กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงาน และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω -cm และทำการขั้วลึกรอยต่อด้านหลัง 4 ชั่วโมง	116
รูปที่ 5.29	กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω -cm และทำการขั้วลึกรอยต่อด้านหลัง 4 ชั่วโมง	117
รูปที่ 5.30	กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงาน และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω -cm และทำการขั้วลึกรอยต่อด้านหลัง 4 ชั่วโมง	118
รูปที่ 5.31 (ก)	กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 6-12 Ω -cm	
(ข)	กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 6-12 Ω -cm	119
รูปที่ 5.32 (ก)	กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยมีสนามไฟฟ้าด้านหลังที่เวลาต่างๆ ที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω -cm	
(ข)	กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยมีสนามไฟฟ้าด้านหลังที่เวลาต่างๆ ที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω -cm	121

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

- รูปที่ 5.33 (ก) กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิกอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยมีสนามไฟฟ้าด้านหลังที่เวลาต่างๆ ที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω -cm
- (ข) กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิกอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อน โดยมีสนามไฟฟ้าด้านหลังที่เวลาต่างๆ ที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω -cm 122
- รูปที่ 5.34 (ก) กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ และพอร์สซิลิกอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 6-12 Ω -cm
- (ข) กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ และพอร์สซิลิกอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 6-12 Ω -cm 124
- รูปที่ 5.35 (1) กราฟแสดงช่วงการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการสร้างพอร์สซิลิกอนโดยวิธีการกัดแบบข้อมีสี่ (2)กราฟแสดงช่วงการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการสร้างพอร์สซิลิกอนโดยวิธีการกัดแบบข้อมีสี่โดยการกัดทะลุอะลูมิเนียม (3)กราฟแสดงช่วงการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการสร้างพอร์สซิลิกอน โดยวิธีการกัดแบบข้อมีสี่ โดยการกัดทะลุอะลูมิเนียมที่ทำการขึ้นเตอร์ริง 126

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆที่สามารถนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์	5
ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบขนาดของแหล่งพลังงานต่างๆ บน โลก	8
ตารางที่ 2.1 ค่าของช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน	28
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างดัชนีหักเห (n) ของสารที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง	39
ตารางที่ 4.1 สรุปลักษณะสำคัญที่เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะการไบอัส	57
ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบเวลาในการเกิดในปัจจัยในการสร้างที่ต่างกัน	88
ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการ เคลือบ อลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 และทำการลอกชั้นอลูมิเนียมด้วยครกคั่วอลูมิเนียมก่อนทำการสร้างพอร์ส ซิลิคอน	93
ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการ เคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350	94
ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนด้วยชั้น ป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818	96
ตารางที่ 5.5 ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนด้วยชั้น ป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818	97
ตารางที่ 5.6 ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการ เคลือบ อลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 โดยทำการค้อนน้ำยาไวแสงหลายชั้น	99
ตารางที่ 5.7 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอน ไดออกไซด์ และพอร์ส ซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω -cm	108
ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอน ไดออกไซด์ และพอร์ส ซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 6-12 Ω - cm	113
ตารางที่ 5.9 ตารางแสดงเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอน ไดออกไซด์ และ พอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 6-12 Ω -cm	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 5.10 ตารางแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสง แบบซิลิคอนไดออกไซด์ โดยมีสนามไฟฟ้าด้านหลังที่เวลาต่างๆ	120
ตารางที่ 5.11 ตารางแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อน แสง โดยมีสนามไฟฟ้าด้านหลังที่เวลาต่างๆ	121
ตารางที่ 5.12 ตารางแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอน ไดออกไซด์ และพอร์ซซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองความต้านทาน 6-12 Ω -cm	123



บทที่ 1

บทนำ

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นพื้นฐานทั้งทางตรง, ทางอ้อมของการเกิด และดำรงอยู่ของชีวิตทั้งหลาย รูปแบบของพลังงานที่ใช้กันมากมักอยู่ในรูปพลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้า ซึ่งแหล่งกำเนิดพลังงานหลักๆ ในปัจจุบัน คือ น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ พลังงานจากเชื้อเพลิงต่างๆ เหล่านี้ นอกจากจะมีปริมาณจำกัดแล้ว ยังสร้างปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงทำลายชั้นบรรยากาศของโลกด้วย ส่วนพลังงานไฟฟ้าจากเขื่อนกั้นน้ำนั้น ได้พัฒนาไปถึงจุดอิ่มตัวแล้วสำหรับเกือบทุกประเทศ

ปัจจุบันประเทศไทยมีความสามารถผลิตไฟฟ้าในระดับ 20000MWp โดยได้มาจากการผลิตต่างๆ คือ ไฟฟ้าพลังความร้อน (จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง) 80%, ไฟฟ้าพลังน้ำ 10% จะเห็นว่า เราต้องอาศัยการผลิตไฟฟ้าจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นหลัก ซึ่งเชื้อเพลิงที่ใช้ดังกล่าวต้องนำเข้าเกือบทั้งหมด และมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นในระยะกลาง และระยะยาวแนวทางแก้ปัญหา คือ การพยายามหาแหล่งพลังงานอื่นมาทดแทน เช่น พลังงานนิวเคลียร์, การพยายามใช้แหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีอยู่ในประเทศตนเอง เช่น ความร้อนใต้พิภพ, พลังงานลม, พลังงานคลื่น, พลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อสร้างไฟฟ้ารวมทั้งความร้อน ในกลุ่มพลังงานใหม่เหล่านี้ พลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างเด่นกว่าชนิดอื่น เพราะมีทั่วไป, มีไม่จำกัด, สะอาด, ไร้ต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการสร้างพลังงานไฟฟ้าโดยตรงจึงเป็นสิ่งที่ทั่วโลกกำลังพยายามพัฒนาให้สำเร็จทั้งในด้านเทคโนโลยีและเศรษฐกิจ เพราะนอกจากจะแก้ปัญหาข้อจำกัดของเชื้อเพลิงธรรมชาติแล้ว ยังจะแก้ปัญหาในด้านมลพิษด้วย ซึ่งการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงนั้น สามารถทำได้ โดยอาศัยตัวเปลี่ยนพลังงานที่มนุษย์ได้พยายามประดิษฐ์คิดค้นขึ้นเรียกว่า “เซลล์แสงอาทิตย์” หรือ “โซลาร์เซลล์” (Solar Cells)

ปัจจุบันได้มีการศึกษา, วิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีวัตถุประสงค์หลักอยู่ 2 ประการ คือ

1. การลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์
2. การเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

โครงการนี้นำเสนอถึงการพัฒนาระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอนแบบรอยต่อพี-เอ็น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการหากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้ประสิทธิภาพมากที่สุด, การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการทดลอง คือ กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc}), แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc}), ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดทางอุดมคติ (P_m), ค่า

ความเข้มของกระแสต่อพื้นที่ (I_{sc}), กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m), แรงดันที่ทำให้เกิด

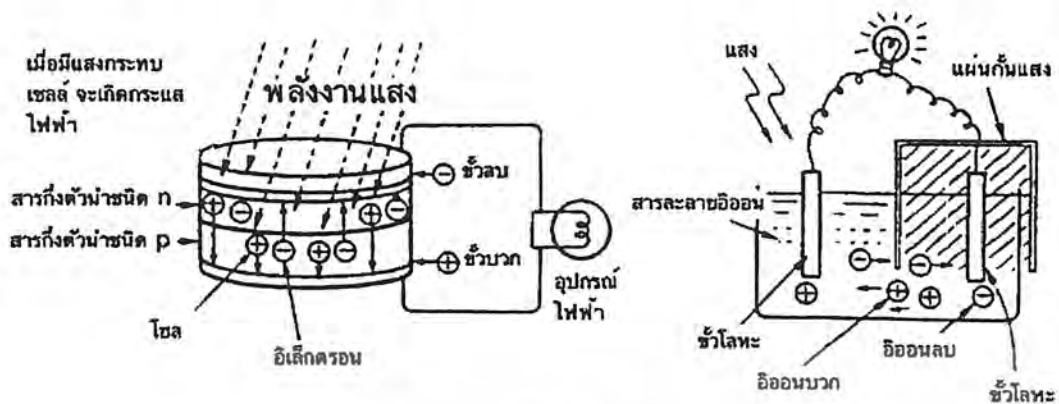
กำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m), ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์จ่ายได้จริง (P_m), ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.), ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η), การหาค่าความต้านทานภายใน (R_s), ผลของค่าความต้านทานภายในต่อเซลล์แสงอาทิตย์ (R_{ss}) และผลของความเข้มแสงต่อเซลล์แสงอาทิตย์ พร้อมทั้งเสนอแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธี Back Surface Field (BSF) และการใช้ชั้นลดการสะท้อนแสง (Anti-Reflection Coating: ARC) แบบพอร์ซซิลิคอน (Porous Silicon: PS)

การทดลองนี้อาจจะมีต้นทุนในการทดลองสูงอยู่บ้าง ในการนำ Premium-Grade Silicon ที่มีราคาสูงมาใช้เป็นวัสดุในการทดลอง แต่ถ้ามองในมุมกลับกัน ซึ่งเราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้มากเท่าไร ก็หมายถึง ในพื้นที่เซลล์เท่าเดิมเราจะได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น หรือในประสิทธิภาพเท่าเดิม เราสามารถสร้างเซลล์ได้ในพื้นที่ที่ลดลง นั่นก็คือเป็นการลดต้นทุนในการผลิตเซลล์ไปในตัวด้วย

ประวัติและความเป็นมา

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์สิ่งประดิษฐ์ทางวิศวกรรมซึ่งประยุกต์ใช้คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำเมื่อมีแสงตกกระทบในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า บุคคลแรกที่สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปของ p-n junction ของผลึกซิลิคอน (ดังรูปที่ 1.1) คือนักวิจัยชื่อ Gerald Pearson แห่ง Bell Laboratories ในปีค.ศ.1954 ซึ่งเป็นช่วงหลังจากการค้นพบทรานซิสเตอร์โดย William Shockley แห่ง Bell Laboratory ในปีค.ศ.1949 ไม่นานนัก โดยในครั้งแรกนี้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพียง 6% เท่านั้น

เมื่อย้อนหลังกลับไปศึกษาถึงประวัติศาสตร์การค้นคว้าเกี่ยวกับปฏิกิริยาระหว่างแสง และ วัตถุในแง่ของไฟฟ้าจะทราบว่า ในปี ค.ศ.1839 E.Bequerel นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส เป็นคนแรกที่ค้นพบว่า เมื่อแสงตกกระทบวัตถุจะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น เขาได้ทำการทดลองดังรูปที่ 1.2 โดยเอาขั้วโลหะสองขั้วจุ่มในสารละลายฮีออน แล้วให้แสงกระทบได้เพียงขั้วเดียว ปรากฏว่า มีกระแสไหลในสายไฟที่ต่อระหว่างขั้วทั้งสอง แสดงให้เห็นถึงการเกิดกระแสไฟฟ้าในวัตถุเมื่อมีแสงตกกระทบ และเขายังได้พบด้วยว่า เมื่อเปลี่ยนสี (ความยาวคลื่น, พลังงาน) ของแสง ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนตามด้วย



รูปที่ 1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ของผลึกซิลิคอน

รูปที่ 1.2 การทดลองให้แสงตกกระทบ
ขั้วไฟฟ้าเพียงขั้วเดียว

ในปี ค.ศ. 1873 Willoughby Smith พบว่า เมื่อส่องแสงใส่ selenium ความต้านทานของมันจะเปลี่ยนไป แสดงให้เห็นว่า เกิดไฟฟ้าในของแข็งเมื่อถูกแสงได้ (Photo Conductivity), ในปีค.ศ. 1876 Adams และ Day พบว่า เมื่อส่องแสงถูก selenium จะเกิดความต่างศักย์ขึ้น (Photovoltaic ใน selenium) ซึ่งเป็นก้าวค้นพบครั้งแรกของการเกิดศักย์ทางไฟฟ้าจากแสง ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (แสงเป็นไฟฟ้า) ของ selenium นั้นต่ำแค่ประมาณ 1% เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามสามารถนำเอาความรู้นี้ไปใช้ประโยชน์ในการวัดความเข้มของแสงในเครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์ได้ เป็นต้น

ในปีค.ศ.1883 นาย Fritts อธิบายทฤษฎีการทำงานของ Photovoltaic cell แบบซีลีเนียมได้เป็นครั้งแรก ต่อมาในปีค.ศ.1904 นาย Hallwachs ได้ค้นพบคุณสมบัติทางแสงของสาร Copper Cuprous Oxide สำหรับในปีค.ศ. 1941 จึงเริ่มมีการค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อพี-เอ็นด้วยวิธี Grown junction และในปีค.ศ. 1954 เริ่มมีการค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อพี-เอ็นแบบใหม่ โดยวิธีการแพร่สาร ซึ่งเป็นปีเดียวกันกับที่ Bell lab. สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นมา

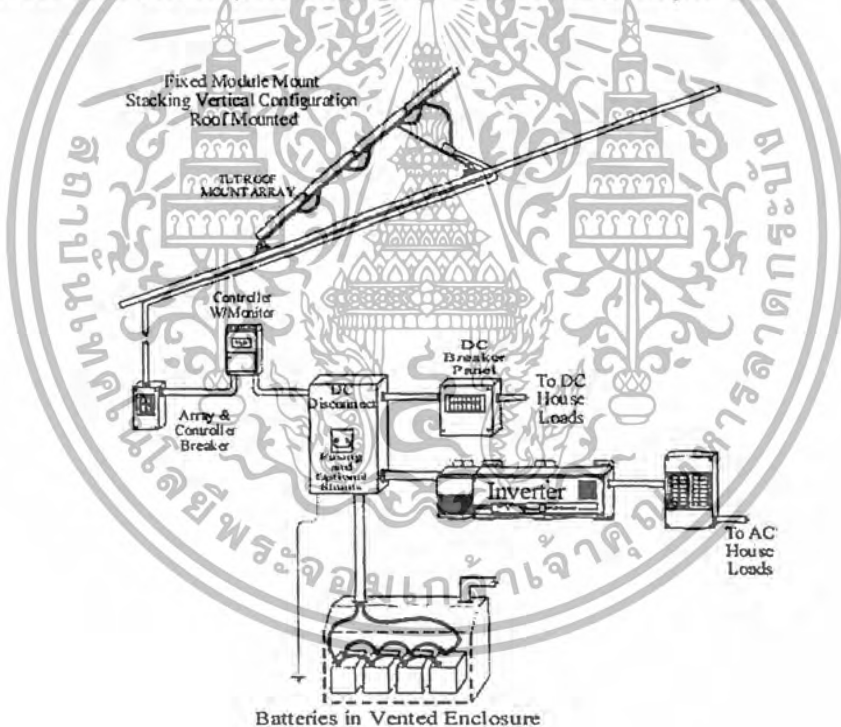
เซลล์แสงอาทิตย์ได้เริ่มเป็นที่สนใจในวงกว้างครั้งแรก ในปี ค.ศ. 1958 เมื่ออเมริกาได้ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์บนดาวเทียม “แวนการ์ด หมายเลข 1” เพื่อเป็นตัวจ่ายพลังงานสำหรับการสื่อสารระหว่างดาวเทียมกับสถานีบนพื้นโลก หลักการทำงานก็เช่นเดียวกับระบบบนโลก คือ เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้าชาร์จเข้าแบตเตอรี่ แล้วแบตเตอรี่จะเป็นตัวจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์การสื่อสาร ข้อดีข้อหนึ่งก็คือ ในอวกาศต่างจากบนโลกตรงที่มีอนุภาคพลังงานสูง (cosmic ray) ที่อาจจะทำลายแผงเซลล์ได้ จึงต้องมีอุปกรณ์เสริมเพื่อป้องกันเพิ่มเติม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งแต่ปีค.ศ.1960 เป็นต้นมาเซลล์แสงอาทิตย์ก็ได้ถูกพัฒนา และสร้างขึ้น เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานบนพื้นโลก โดยเฉพาะการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ และการลดค่าต้นทุนในการสร้าง การใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานจึงขยายวงออกไปอย่างกว้างขวาง จนกระทั่งในปัจจุบันนี้ เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึก ซิลิคอนมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานสูงถึงราว 15-24%

เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ คือ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง เซลล์จะจ่ายไฟฟ้าออกมาซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์นี้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (Direct Current) พลังงานไฟฟ้าที่ได้สามารถนำไปใช้ได้ทันที หรืออาจมีอุปกรณ์ร่วมเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternating Current) แล้วจึงนำไปใช้เพื่อให้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ทำงานได้ต่อไป ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ระบบการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนา และใช้งานในปัจจุบันนั้น แทบทั้งหมดทำจากธาตุซิลิคอน ซึ่งเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับสองบนโลกรองจากออกซิเจน ทราบตามชายหาดของท้องทะเล, หินต่างๆ ที่เห็นรอบตัวเรา ก็มีซิลิคอนเป็นส่วนประกอบหลักๆ นั่นคือ เป็นธาตุที่มีมากมายเหลือใช้ (แต่การนำมา

ทำให้บริสุทธิ์ใช้งานได้ ต้องมีเทคนิค และใช้พลังงาน นั่นคือต้องมีค่าใช้จ่าย) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิคอนเป็นวัสดุที่ใช้มากในอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำในปัจจุบัน โดยแทบจะเรียกได้ว่าเป็นเมล็ดข้าวสารของอุตสาหกรรมนี้เลยทีเดียว ทรานซิสเตอร์, ICs, LSI และ VLSI ทั้งหมดสร้างโดยใช้ซิลิคอนนี้

อย่างไรก็ดี จากผลการวิเคราะห์ปรากฏว่า วัสดุสารกึ่งตัวนำซึ่งมีความเหมาะสมที่สุด สำหรับการนำมาใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ วัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีค่าของช่องว่างพลังงาน (Energy gap) ประมาณ 1.5 eV ซึ่งสารกึ่งตัวนำชนิด GaAs มีค่าช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.43 eV ดังแสดงในตารางที่ 1.1 และจากการทดลองสร้างก็ปรากฏว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจาก GaAs ด้วยโครงสร้างที่เหมาะสมจะสามารถให้ประสิทธิภาพในการแปรรูปพลังงานได้สูงถึง 30% แต่ทว่า GaAs เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีราคาแพงซึ่งเป็นข้อเสียเปรียบเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารซิลิคอน

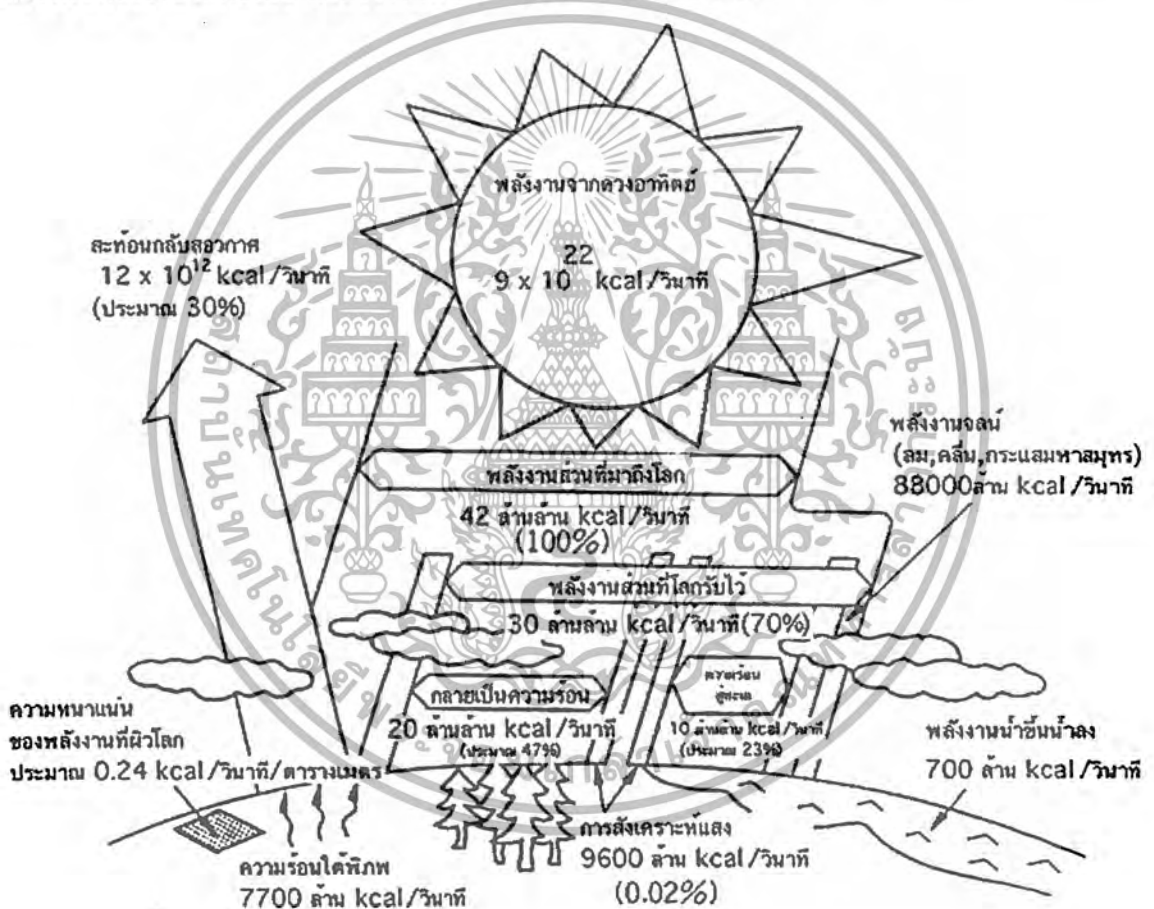
Material	Major material					Experimental diffusion length (μ)
	Energy Gap (eV)	Mobility(300k) ($cm^2 \cdot v^{-1} \cdot s^{-1}$)		Lifetime(s)		
		μ_n	μ_p	τ_n	τ_p	
Si	1.1	1450	500	400		100
GaAs	1.4	8500	400	50	110^{-2}	5
CdS	2.6	340	615	100	10^7	-1
B	1.5	6000	4000			
Se(HEX)	1.6	2	17			
SsC(β)	2.6	1000	10			
As ₂ Se ₃	1.6	15	45			
Ab ₂ Se ₃	1.2	15	45			
AlSb	1.6	400	400			
GaP	2.2	>200	150			
CdAs ₂	1.0		100			
InP	1.2	4000	>600	2000	2	
ZnSe	2.6	500	16			
ZnTe	2.2	500	900			
CdSe	1.7	600				
CdTe	1.4	700	65			

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่สามารถนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานแสงอาทิตย์และการแผ่รังสี

ดวงอาทิตย์อยู่ห่างจากโลกประมาณ 150 ล้านกิโลเมตร ปล่อยพลังงานจากปฏิกิริยาฟิวชั่นออกสู่อวกาศในระดับ 9×10^{22} kcal/วินาที ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ซึ่งเป็นพลังงานที่มากมายมหาศาล พลังงานนี้กระจายไปในอวกาศ และส่วนที่มาถึงโลกนั้นจะมีความเข้มที่บริเวณนอกเขตบรรยากาศของโลกในระดับ 1.38 kW/ตารางเมตร (0.33 kcal/วินาที) คิดเป็นพลังงานที่โลกได้รับได้เป็น 42×10^{12} kcal/วินาที โดยในนี้ 30% จะสะท้อนกลับออกนอกบรรยากาศโลก ที่เหลือ 70% จะมาถึงโลก ซึ่งเมื่อเทียบกับพลังงานที่มนุษย์ทั้งโลกใช้ในปี 1988 คือ 10^{17} kcal จะเห็นว่า เทียบเท่ากับพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่เข้ามาถึงโลกเพียงแค่ประมาณ 40 นาทีเท่านั้น

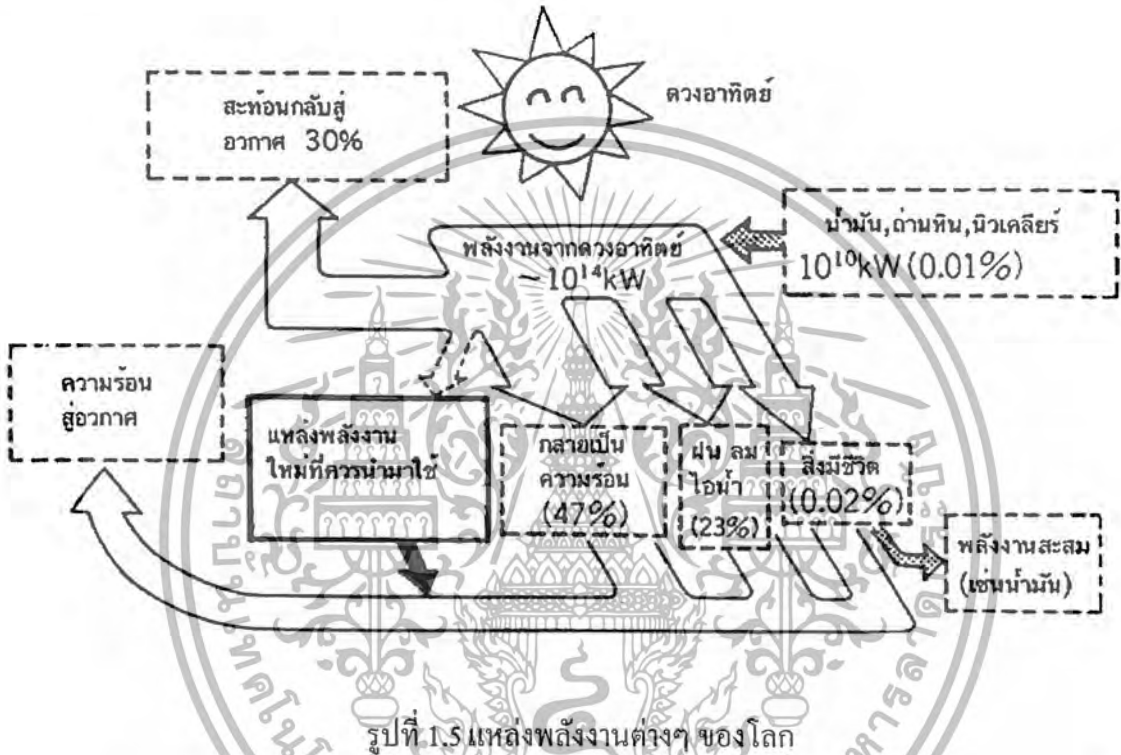


รูปที่ 1.4 พลังงานแสงอาทิตย์ที่โลกได้รับ

จะเห็นว่าพลังงานจากดวงอาทิตย์นั้นมากมายมหาศาลเพียงใด และโลกของเราก็ได้วิวัฒนาการมาภายใต้เงื่อนไขทางพลังงานเช่นนี้ โดยพลังงานที่มาถึงผิวโลกจะเป็นแหล่งพลังงานความร้อนให้แก่ผิวดิน และทะเล ทำให้เกิดลม, ไอน้ำ, ฝน และ วัฏจักรต่างๆ ของโลกทั้งทางกายภาพ

และชีวภาพ รวมทั้งทำให้เกิดการสังเคราะห์แสงของพืช โดยคร่าวๆแล้วใน 70% ที่มาถึงผิวโลก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณ 42% จะกลายเป็นความร้อน ประมาณ 23% จะเป็นพลังงานในการเกิดวัฏจักรของน้ำ (ระเหย, เมฆ, ลม, ฝน) ประมาณ 0.02% เท่านั้นที่ถูกใช้ในการดำเนินชีวิตของพืช และสัตว์ การทับถมของซากสิ่งมีชีวิตเหล่านี้เกิดเป็นน้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ ก็เป็นการสะสมพลังงานที่ได้จากดวงอาทิตย์ไว้ในรูปของพลังงานเคมีในสิ่งเหล่านั้นนั่นเอง นั่นคือ พลังงานที่เราได้จากเชื้อเพลิงเหล่านี้ล้วนมีต้นกำเนิดมาจากพลังงานจากดวงอาทิตย์ทั้งสิ้น ดังรูปที่ 1.5



ตารางที่ 1.2 แสดงการเปรียบเทียบขนาดของพลังงานของแหล่ง หรือรูปแบบต่างๆ จะเห็นว่า พลังงานจากดวงอาทิตย์ที่ตกถึง โลกมีขนาดมหึมาเมื่อเทียบกับอย่างอื่น ๆ คือประมาณ 42 ล้านล้าน kcal/วินาที พลังงานลมจะมีลำดับรองลงมา คือ 0.088 ล้านล้าน kcal/วินาที ส่วนพลังงานความร้อนจากใต้พิภพซึ่งเป็นพลังงานจากภายในของโลกเองมีขนาด 0.0077 ล้านล้าน kcal/วินาที โดยสรุปแล้วจะเห็นว่า พลังงานในธรรมชาติบน โลกนั้น แทบทั้งหมดมาจากดวงอาทิตย์ก็ว่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานน้ำ	4.8×10^8	kcal/วินาที
พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง	7.2×10^8	kcal/วินาที
พลังงานความร้อนใต้พิภพ	77×10^8	kcal/วินาที
พลังงานลม	880×10^8	kcal/วินาที
พลังงานจากดวงอาทิตย์	$420,000 \times 10^8$	kcal/วินาที

ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบขนาดของแหล่งพลังงานต่างๆ บนโลก

พลังงานจากการแผ่รังสีต่อพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางของดวงอาทิตย์ นอกบรรยากาศของโลกจะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ความเข้มของการแผ่รังสีนี้ เราเรียกว่า Solar Constant หรือที่นิยมเรียกกันว่า แบบ Air mass zero เขียนย่อๆ ได้เป็น AM0 ซึ่งในงาน Photovoltaic การแผ่รังสีแบบ AM0 กำหนดว่ามีค่าเท่ากับ 135.3 mW/cm^2

สำหรับบนพื้นผิวโลก พลังงานจากแสงอาทิตย์จะสูญเสียไปในชั้นบรรยากาศของโลกเนื่องจากชั้นของก๊าซต่างๆ เช่น O_2 , O_3 , ไอน้ำ, CO_2 เป็นต้น ดังนั้นความเข้มของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จะลดลง และองค์การนาซ่า (NASA) แห่งสหรัฐอเมริกาได้เป็นผู้กำหนดมาตรฐานของพลังงานที่ได้รับในระดับน้ำทะเล เมื่อแสงอาทิตย์มีทิศทางตั้งฉากกับผิวโลกมีค่า 100 mW/cm^2 และกำหนดว่าเป็นการแผ่รังสีแบบ Air mass 1 หรือเขียนย่อๆ ได้เป็น AM1 ค่าของพลังงานนี้ถูกนำมาใช้เป็นค่า เปรียบเทียบความสามารถ หรือประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่างๆ ในการเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้า

ลักษณะการแผ่รังสีแบบต่างๆ อาจพิจารณาได้ดังนี้คือ

$$\text{Air.mass} = \frac{1}{\cos\theta} = \sec\theta \quad (1.1)$$

เมื่อ θ คือ มุมที่ลำแสงจากดวงอาทิตย์ทำกับทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิว โลกบริเวณที่ทำการวัด

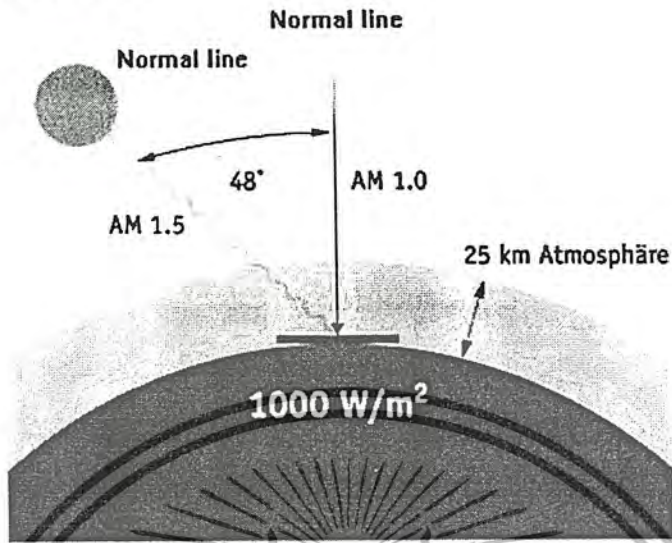
ดังนั้น ถ้าดวงอาทิตย์ทำมุมตั้งฉากกับโลกเป็นมุม 60° ลักษณะของการแผ่รังสีนี้จะเรียกว่าเป็นแบบ AM2

ตัวอย่างการหาลักษณะการแผ่รังสีทำได้ง่ายๆ โดยการพิจารณาเงาของวัตถุที่มีความสูง h วางอยู่ตั้งฉากกับผิวโลก ดังแสดงในรูปที่ 1.6 และรูปที่ 1.7 ถ้าหากความยาวของเงาที่เกิดขึ้นมีค่า s ดังนั้นค่าของ Air mass หาได้โดย

$$\text{Air.mass} = \sqrt{1 + \frac{s^2}{h^2}} \quad (1.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Air Mass



รูปที่ 1.6 มุมของลำแสงจากดวงอาทิตย์ที่ทำกับแนวตั้งฉากกับระดับพื้นโลก



รูปที่ 1.7 การหาค่ามุม θ โดยการพิจารณาเงาของแสง

ยิ่งค่าของ Air mass มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เงื่อนไขอื่นๆไม่เปลี่ยนแปลง พลังงานแสงอาทิตย์ที่มายังผิวโลกก็จะยิ่งมีค่าลดลง ค่าพลังงานมาตรฐานบนพื้นโลกที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางอีกค่าหนึ่งคือ ลักษณะการแผ่รังสีแบบ AM1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีของแสงอาทิตย์บนพื้นโลก

ลำแสง หรือรังสีของแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนพื้นโลก จะประกอบด้วยรังสี 2 ส่วน คือ

1. Direct sunlight หรือ ลำแสงโดยตรง
2. Indirect or Diffused sunlight ลำแสงอาทิตย์ที่แพร่กระจาย

ลำแสงอาทิตย์โดยตรง หรือ Direct sunlight เป็นส่วนของแสงอาทิตย์ที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง และลำแสงอาทิตย์ที่แพร่กระจาย หรือ Diffused sunlight เป็นส่วนของแสงอาทิตย์ที่ไม่ได้มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง แต่เกิดขึ้นเนื่องจากการสะท้อนกับชั้นบรรยากาศของโลก ประมาณกันว่า แม้แต่ในวันที่ท้องฟ้าแจ่มใสปราศจากเมฆหมอก ลำแสงแพร่กระจายจะมีค่าเป็น 10-20% ของรังสีทั้งหมดที่ได้รับ ยิ่งในวันที่มีเมฆหมอกปกคลุมมากๆ ปริมาณของแสงอาทิตย์แบบแพร่กระจายนี้จะยังมีค่ามากขึ้นตามลำดับ

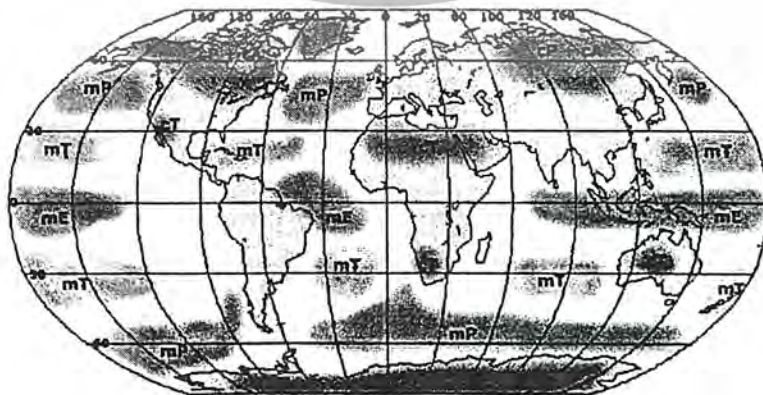
สเปกตรัมของแสงที่ได้รับโดยตรง กับสเปกตรัมของแสงที่ได้รับจากการแพร่กระจายจะมีลักษณะแตกต่างกัน และสเปกตรัมของแสงอาทิตย์แบบแพร่กระจายจะไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับลักษณะและทิศทางของการสะท้อน และแพร่กระจาย นอกจากนี้แล้ว ลักษณะการแพร่รังสีแบบ Air mass ค่าสูงๆ จะมีผลทำให้ปริมาณของแสงที่ได้รับในส่วนแพร่กระจายมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทย

Maritime Tropical (mT) เขตร้อนบริเวณเส้นศูนย์สูตร

Continental Polar (cP) เขตหนาวเย็นประมาณละติจูดที่ 60

Maritime Polar (mP) เขตหนาวเย็นในบริเวณมหาสมุทร



รูปที่ 1.8 แผนที่แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของพื้นที่แห่งหนึ่งจะสูง หรือต่ำขึ้นกับปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่นั้น โดยบริเวณที่ได้รับรังสีดวงอาทิตย์มากจะมีศักยภาพในการนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้งานสูง จากรูปที่ 1.8 แสดงศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศต่างๆ พบว่า ประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ปานกลางแต่เป็นบริเวณกว้าง โดยเฉลี่ยทั้งปีประมาณ 1,300-1,600 กิโลวัตต์/ ตารางเมตร

จากการเปรียบเทียบความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยของประเทศต่างๆที่ได้รับพบว่า ประเทศไทยได้รับความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เป็นค่ารายวันเฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 18.2 เมกะจูล/ตร.เมตร-วัน ซึ่งถือได้ว่าประเทศไทยเป็นประเทศที่มีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง

สารกึ่งตัวนำ

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งสร้างจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ดังนั้น ทฤษฎีการทำงาน และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จึงมีส่วนเกี่ยวข้องทั้งโดยตรง และโดยทางอ้อมกับคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

วัสดุต่างๆที่มีอยู่ใน โลกนี้ อาจพิจารณาจัดแบ่งออกเป็นหมู่ใหญ่ๆ ตามคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ได้เป็น 3 หมู่ คือ

1. วัสดุตัวนำ (Conductor) ได้แก่ วัสดุนำไฟฟ้าได้ดี เช่น โลหะต่างๆ เป็นต้น
2. วัสดุสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ได้แก่ วัสดุนำไฟฟ้าได้ดีกว่าฉนวนแต่เลวกว่าตัวนำ เช่น Si, Ge เป็นต้น
3. วัสดุฉนวน (Insulator) ได้แก่ วัสดุนำไฟฟ้าได้ไม่ดี เช่น แก้ว, เบกาไลต์, ไมกา เป็นต้น

สารกึ่งตัวนำอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุแท้ (Element semiconductor) ได้แก่ ธาตุในหมู่ที่ 4 ของตารางพีริออดิก เช่น ซิลิคอน, เยอรมันเนียม, ดีบุก, คาร์บอน เป็นต้น
2. สารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบ (Compound semiconductor) ได้แก่ สารประกอบของธาตุในหมู่ที่ 3 และหมู่ที่ 5 เช่น GaAs, GaP และสารประกอบของธาตุในหมู่ที่ 2 และหมู่ที่ 6 เช่น CdS เป็นต้น

ในบรรดาวัสดุไฟฟ้า เช่น ตัวนำ, ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ จะเห็นได้ว่าสารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุที่น่าสนใจมากที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษอื่นๆ แตกต่างจากตัวนำ และฉนวน คุณสมบัติที่เห็นได้ชัดก็คือ ค่าความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ จะเปลี่ยนแปลงได้โดยง่ายกับอุณหภูมิ หรือแสงจาก

ภายนอก และที่สำคัญเมื่อมีการเติมอะตอมสารเจือปนลงไปแม้เพียงเล็กน้อย ค่าความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากมาย ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะมีเฉพาะในสารกึ่งตัวนำเท่านั้น

ชนิดของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. สารกึ่งตัวนำอินทรินซิก (Intrinsic semiconductor) บางครั้งถูกเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำชนิด I (I-Type Semiconductor) หมายถึง สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ กล่าวคือ ปราศจากการเจือปนด้วยอะตอมแปลกปลอม หรืออะตอมเจือปน (Impurity atom)

2. สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (Extrinsic semiconductor) เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ จะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และโฮลมีค่าน้อย ซึ่งถ้าคำนวณเป็นค่าความนำไฟฟ้าแล้วจะมีค่าน้อยกว่าวัสดุตัวนำมาก และในทางปฏิบัติ เพื่อให้สารกึ่งตัวนำสามารถถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง เช่น การนำไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ จำเป็นที่จะต้องเติมอะตอมสารเจือ ซึ่งผลของอะตอมสารเจือที่เติมจะทำให้สารกึ่งตัวนำสามารถนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้นอย่างมากมาย และยังสามารถควบคุมค่าความนำไฟฟ้าได้อีกด้วยซึ่งเรียกสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยอะตอมของธาตุอื่นว่าสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (Extrinsic semiconductor)

อะตอมสารเจือ (Impurity atoms) หมายถึง อะตอมของธาตุในกลุ่มที่ III หรือกลุ่ม V ของตารางพีริออดิกของธาตุ ซึ่งใช้เติมลงไปในผลึกสารกึ่งตัวนำ ด้วยปริมาณเพียงเล็กน้อยเพื่อให้ได้พาหะ เช่น อิเล็กตรอนหรือโฮล และปริมาณของพาหะตามที่ต้องการ อะตอมที่นำมาเป็นสารเจือควรจะต้องมีขนาดของอะตอม และคุณสมบัติกายภาพที่ใกล้เคียงกับอะตอมสารกึ่งตัวนำนั้นๆ เพื่อไม่ให้เกิดการเสียหายของโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำได้ อะตอมสารเจือ อาจถูกจัดแบ่งเป็น 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 1.9 คือ

(ก) อะตอมสารเจือชนิดเอ็น (n-Type Impurity atoms) ได้แก่ อะตอมของธาตุในกลุ่มที่ V ของตารางพีริออดิกของธาตุ เช่น ฟอสฟอรัส (P), สารหนู (As), พลวง (Sb) และบิสมัท (Bi) เป็นต้น และที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ ฟอสฟอรัส (P) อะตอมสารเจือชนิดนี้คล้ายกับเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน ดังนั้น บางครั้งเราจึงเรียกอะตอมสารเจือชนิดนี้ว่า “อะตอมผู้ให้” (Donor atoms) ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมผู้ให้จะมีปริมาณอิเล็กตรอนมากกว่าโฮลมาก อิเล็กตรอนจึงเป็นพาหะส่วนมาก และเป็นหลักในการนำไฟฟ้า ทำให้สารชนิดนี้ถูกเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น” (n-Type Semiconductor) คำว่า เอ็น (n: Negative charge) หมายถึง ประจุลบ

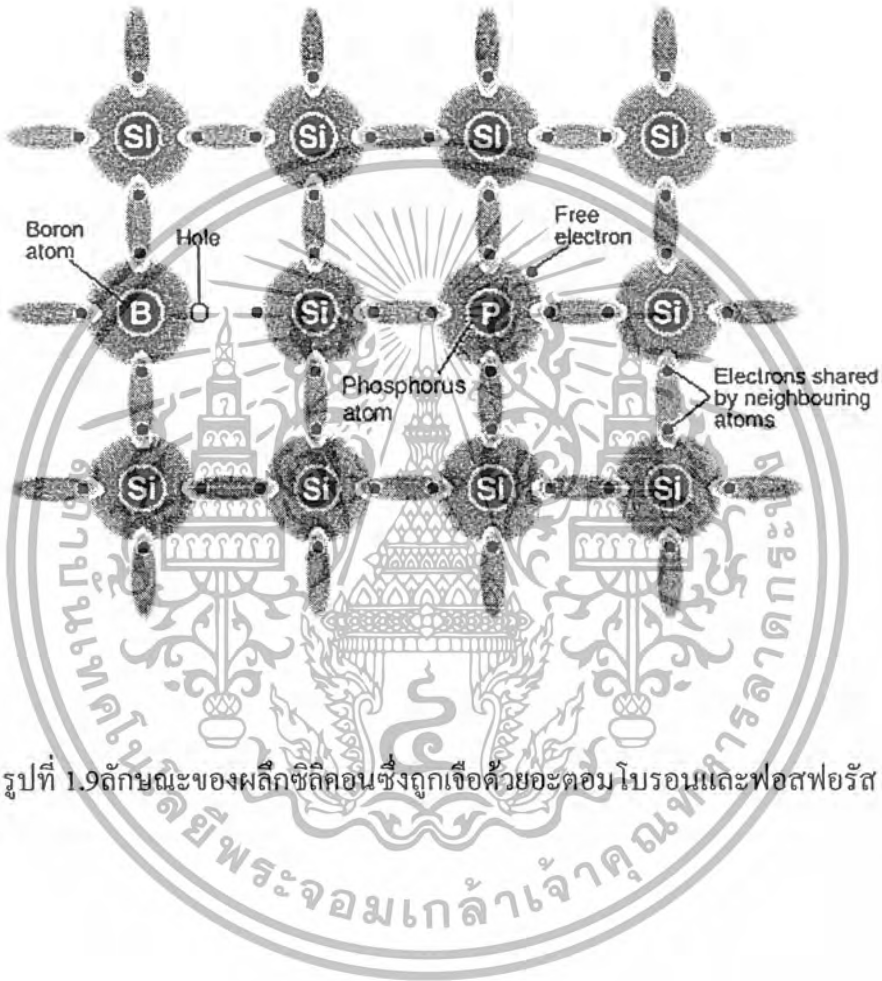
(ข) อะตอมสารเจือชนิดพี (p-Type Impurity atoms) ได้แก่ อะตอมของธาตุในกลุ่มที่ III ของตารางพีริออดิกของธาตุ เช่น โบรอน (B), อะลูมิเนียม (Al), อินเดียม (In) และแกลเลียม (Ga) เป็นต้น และที่นิยมใช้งานมาก ได้แก่ โบรอน (B) อะตอมสารเจือชนิดนี้คล้ายกับเป็นผู้ให้โฮลหรือผู้รับอิเล็กตรอน ดังนั้นบางครั้งเราจึงเรียกอะตอมสารเจือชนิดนี้ว่า “อะตอมผู้รับ” (Acceptor atoms) ซึ่งสาร

กึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมผู้รับจะมีปริมาณโฮลมากกว่าอิเล็กตรอนมาก โฮลจึงเป็นพาหะส่วนมากในการนำไฟฟ้า

เอกสารนี้ กึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมผู้รับจะมีปริมาณโฮลมากกว่าอิเล็กตรอนมาก โฮลจึงเป็นพาหะส่วนมากในการนำไฟฟ้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเป็นหลักในการนำไฟฟ้า ทำให้สารชนิดนี้ถูกเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำชนิดพี” (p-Type Semiconductor) คำว่า พี (p: Positive charge) หมายถึง ประจุบวก



รูปที่ 1.9 ลักษณะของผลึกซิลิคอนซึ่งถูกเจือด้วยอะตอมโบรอนและฟอสฟอรัส

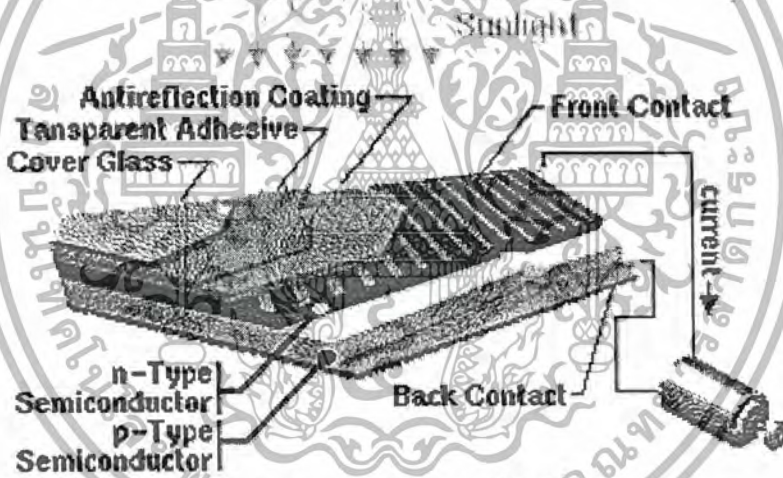
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันนั้น มักมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อพี-เอ็นคล้ายๆกับโครงสร้างของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น หากแต่เซลล์แสงอาทิตย์จะมีขนาดใหญ่กว่าไดโอดหลายๆดังแสดงได้ในรูปที่ 2.1 ทั้งนี้เพื่อให้เซลล์สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากพอที่จะนำไปใช้งานได้ การสร้างรอยต่อพี-เอ็นในเซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำได้โดยวิธีการเดียวกันกับการสร้างไดโอด ซึ่งมักนิยมใช้วิธีการแพร่สารเจือปน (Impurity) ชนิดเอ็น หรือชนิดพีเข้าไปในเนื้อของสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นชนิดตรงกันข้าม ในบทนี้จะได้กล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานของรอยต่อพี-เอ็น ทั้งในขณะที่ไม่ได้รับแสง และในขณะที่ได้รับแสง



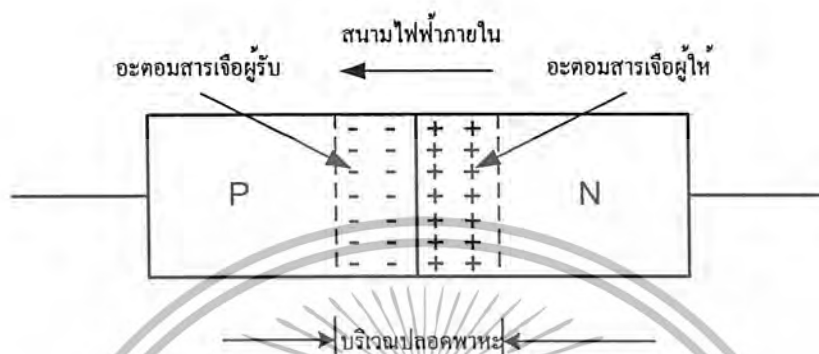
รูปที่ 2.1 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริง

2.1 รอยต่อพี-เอ็น ในภาวะสมดุล ขณะที่ไม่มีความดันไบอัส

เมื่อรอยต่อพี-เอ็นเกิดขึ้น จะเห็นได้ว่าด้านทั้งสองของรอยต่อมีความแตกต่างกันของความหนาแน่นของพาหะ กล่าวคือ โหลดทางด้านพีจะมากกว่าโหลดทางด้านเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นจะมากกว่าอิเล็กตรอนทางด้านพี จึงเป็นเหตุให้เกิดแรงกระทำต่อพาหะให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ เพื่อให้ด้านทั้งสองของรอยต่อมีพาหะเท่ากัน ดังนั้น พาหะจากด้านซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าจะแพร่ไปทางด้านซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่า คือ โหลดทางด้านพีจะแพร่ข้ามรอยต่อเข้าไปทางด้านเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นจะแพร่ข้ามรอยต่อเข้ามาทางด้านพี การแพร่ของพาหะข้ามรอยต่อนี้จะเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้รอยต่อเป็นอันดับแรก ดังนั้น อะตอมสารเจือผู้รับทางด้านพีบริเวณรอยต่อจะมีสภาพเป็น

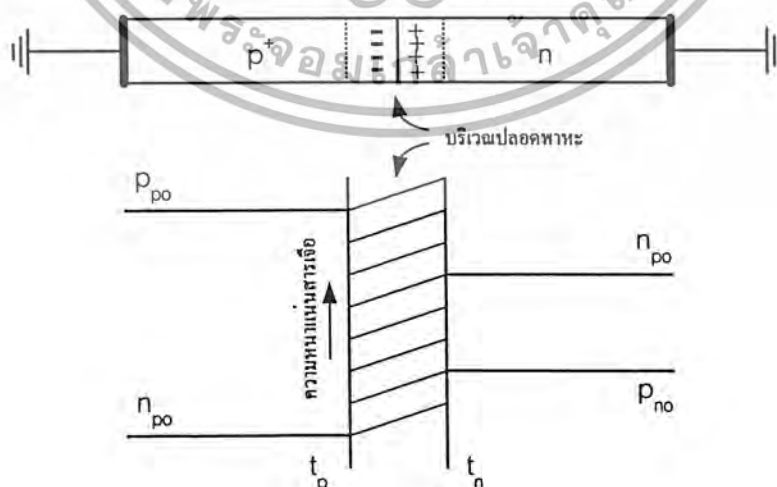
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อ็อน ลบ และอะตอมสารเจือผู้ให้ทางด้านเอ็นบริเวณรอยต่อจะมีสภาพเป็นอ็อนบวก ประจุไฟฟ้าของอ็อนทั้งสองจะเริ่มทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อ เรียกว่า สนามไฟฟ้าภายใน แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น

สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะช่วยต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮลจากด้านพี และอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นจนกระทั่งสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นมีผลพอดีทำให้โฮล และอิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ในภาวะนี้จะไม่มีการแพร่ของพาหะใดๆข้ามรอยต่อเลย เราเรียกรวมภาวะนี้ว่า “ภาวะสมดุล” ที่บริเวณรอยต่อซึ่งมีสนามไฟฟ้าภายในเกิดขึ้นจะเป็นบริเวณที่ไม่มีพาหะอยู่ เนื่องจากพาหะจะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าปิดออกไปจากรวมนี้ บริเวณดังกล่าวถูกเรียกว่า “บริเวณปลอดพาหะ” (Depletion region หรือ Space charge region หรือ Transition region)



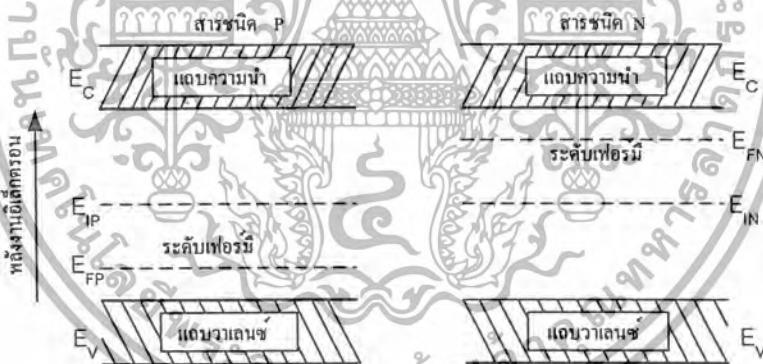
รูปที่ 2.3 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะที่ไม่มีไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.3 การที่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อพี-เอ็นในบริเวณปลอดพาหะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างด้านพีและด้านเอ็น เราเรียกว่า “ศักย์สัมผัส” (Contact potential, V_0) หรือ “แรงดันภายใน” (Built in voltage) ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \quad (2.1)$$

- เมื่อ V_0 คือ ศักย์สัมผัส (โวลต์)
- k คือ ค่าคงตัวของโบลต์มันน์มีค่า $= 8.62 \times 10^{-5}$ eV/K
- T คือ อุณหภูมิองศาสัมบูรณ์ (K)
- q คือ ประจุอิเล็กตรอน $= 1.6 \times 10^{-19}$ คูลอมป์
- N_A คือ ความหนาแน่นของสารเจือพีรับ (cm^{-3})
- N_D คือ ความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้ (cm^{-3})
- n_i คือ ความหนาแน่นของประจุพาหะของสารกึ่งตัวนำ (cm^{-3})

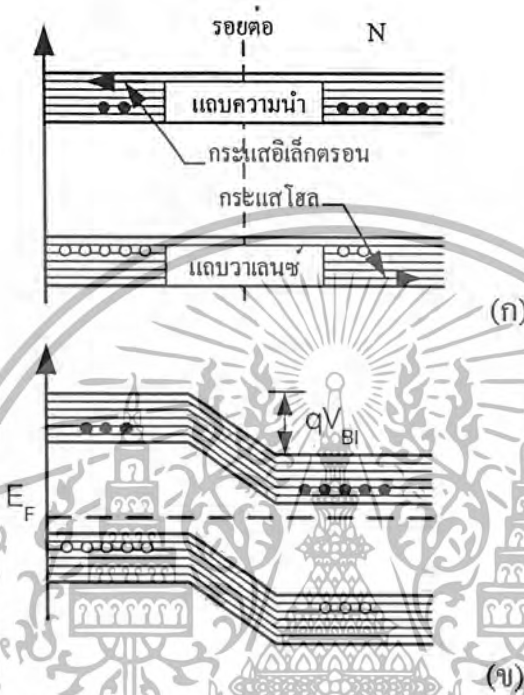


รูปที่ 2.4 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของด้านพีและด้านเอ็น
ขณะยังไม่เกิดรอยต่อพี-เอ็น

ในการเขียนลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (Energy band diagram) เราต้องพิจารณาถึงระดับเฟอร์มีเป็นสำคัญ จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีระดับพลังงาน เฟอร์มี E_f ไม่เท่ากัน แต่ในภาวะสมดุลระดับเฟอร์มีของด้านทั้งสองของรอยต่อจะต้องต่อเนื่องเป็นระดับเดียวกันตลอดผ่านรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพี และชนิดเอ็นมาสัมผัสกันจะเกิดมีการถ่ายเทพาหะเกิดขึ้น โดยที่อิเล็กตรอนจะไหลจากด้านที่มีระดับ E_f สูงกว่า คือด้านเอ็น ไปยังระดับพลังงานที่ว่างในแถบความนำของด้านพีซึ่งมีระดับ E_f ต่ำกว่า และไหลจากส่วนพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็จะไหลเข้ามายังระดับที่ว่างในแถบวาเลนซ์ของส่วนเอ็น ขณะที่มีการถ่ายเทของพาหะข้ามรอยต่อนี้ ระดับเฟอร์มิจะมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อปรับระดับใหม่ จนกระทั่งในภาวะสมดุล ระดับเฟอร์มิของด้านเอ็น และด้านพีจะอยู่ที่ระดับเดียวกัน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 รอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นแสดงด้วยแถบพลังงาน (ก) ขณะสัมผัส (ข) ภาวะสมดุลหลังสัมผัสแล้ว

ในภาวะสมดุล ระยะความกว้างของบริเวณปลอดพาหะแสดงได้ดังสมการที่ 2.2

$$X_m = \sqrt{\frac{2\epsilon \cdot V_0 (N_A + N_D)}{q \cdot N_A \cdot N_D}} \quad \text{cm.} \quad (2.2)$$

- เมื่อ X_m คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะในภาวะสมดุล (cm.)
- ϵ คือ permittivity ของสารกึ่งตัวนำ
- V_0 คือ ศักย์สัมผัส (V.)

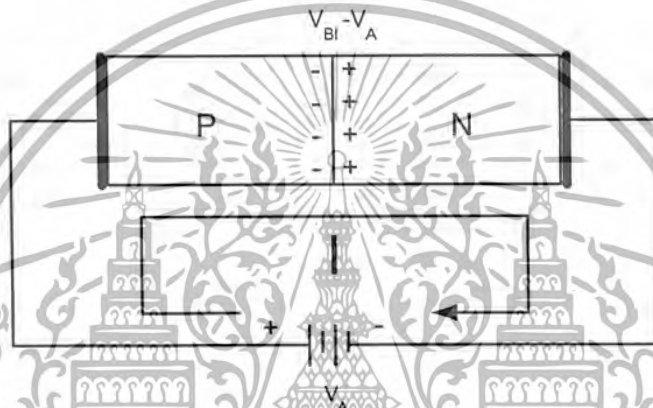
นอกจากนี้ยังพบว่า ที่บริเวณรอยต่อมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacity) ค่าความหนาแน่นของความจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่รอยต่อแสดงได้ดังสมการที่ 2.3

$$C_j = \sqrt{\frac{\epsilon \cdot q \cdot N_A \cdot N_D}{2(N_A + N_D) \cdot V_0}} \quad \text{F/m}^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ C_j คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ (F/m^2)

2.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

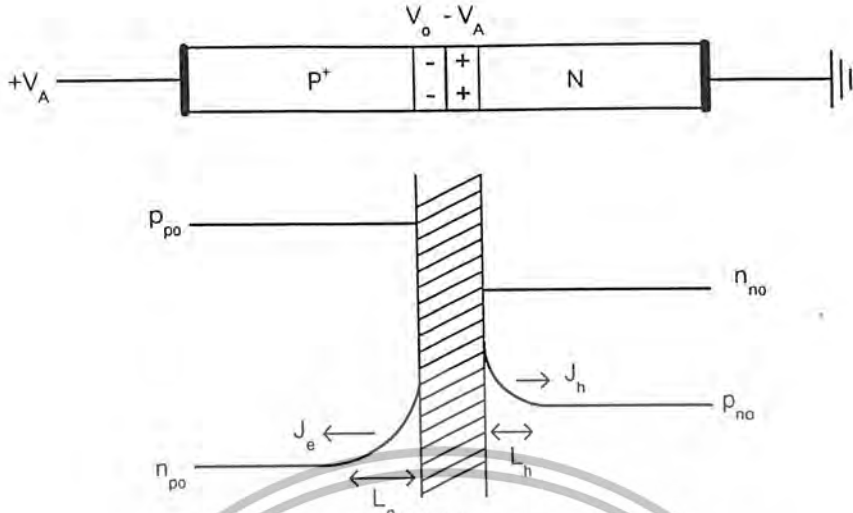
ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสตรง กล่าวคือ ทางด้านพีจะมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านเอ็น ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 รอยต่อพี-เอ็น ซึ่งได้รับการไบอัสตรง

จากการพิจารณาว่า ความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพี และชนิดเอ็นมีค่าน้อยมาก ดังนั้นแรงดันไบอัสตรงจากภายนอก (V_A) จะไปปรากฏที่รอยต่อพี-เอ็นทั้งหมด ในลักษณะที่หักล้างหรือช่วยลดศักย์ค่าไฟฟ้าภายในรอยต่อพี-เอ็น เป็นผลให้แรงดันภายในรอยต่อ และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะลดลง น้อยกว่าในกรณียังไม่ได้รับไบอัส ดังนั้น โอลทางด้านพีสามารถเคลื่อนที่ไปทางด้านเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นสามารถเคลื่อนที่ไปทางด้านพีได้โดยสะดวก เสมือนรอยต่อพี-เอ็นเป็นตัวนำ ขอมให้กระแสไหลผ่านได้ดี ซึ่งกระแสดังกล่าวจะถูกต้านทานเฉพาะความต้านทานอันเนื่องมาจากเนื้อสารกึ่งตัวนำเท่านั้น ซึ่งมีค่าน้อยมาก

เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง โอลทางด้านพีจะถูกฉีดเข้ามาทางด้านเอ็น ดังนั้น ปริมาณของโอลทางด้านเอ็นบริเวณใกล้ๆ กับรอยต่อจะเพิ่มขึ้น ทำนองเดียวกัน เมื่ออิเล็กตรอนถูกฉีดเข้าไปทางด้านพี ปริมาณของอิเล็กตรอนทางด้านพีก็จะเพิ่มขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

เมื่อ

- p_{p0} คือ ความหนาแน่นของโฮลทางด้านพี ในภาวะสมดุล
- n_{p0} คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านพี ในภาวะสมดุล
- n_{n0} คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านเอ็น ในภาวะสมดุล
- p_{n0} คือ ความหนาแน่นของโฮลทางด้านเอ็น ในภาวะสมดุล
- L_h คือ ระยะการแพร่ของโฮล
- L_e คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน

การเพิ่มขึ้นของพาหะส่วนน้อยที่ขอบของบริเวณปลอดพาหะ อธิบายได้ด้วย สมการ “กฎของรอยต่อ” โดย

$$p_n|_{x_n} = p_{n0} \cdot e^{\frac{qV_A}{kT}} \tag{2.4}$$

$$n_p|_{x_p} = n_{p0} \cdot e^{\frac{qV_A}{kT}} \tag{2.5}$$

เมื่อ $p_n|_{x_n}, n_p|_{x_p}$ คือ ความหนาแน่นของโฮลที่ปลายสุดของบริเวณปลอดพาหะ และ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ปลายสุดของบริเวณปลอดพาหะ ตามลำดับ

เมื่อห่างออกไปจากบริเวณปลอดพาหะ พาหะส่วนน้อยจะมีการลดลง เนื่องจากมีการรวมตัว (Recombination) ของพาหะเกิดขึ้น ทำให้ปริมาณของพาหะที่ถูกฉีดเข้ามาลดลงกระทั่งในที่สุด เมื่อห่างจากขอบของบริเวณปลอดพาหะเป็นระยะ L_e และ L_h ความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยจะมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับในภาวะสมดุล นั่นคือ พาหะส่วนน้อยมีการรวมตัวของพาหะเกิดขึ้นจนหมดสิ้น โดยระยะ L_c และ L_n เรียก ระยะการแพร่ (Diffusion length) ของอิเล็กตรอน และโฮล ตามลำดับ

เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะส่วนมาก n_{no} และ p_{po} มีค่ามากกว่าปริมาณของพาหะที่ถูกฉีดเข้ามารอยต่อ ดังนั้นค่าของ n_{no} และ p_{po} ที่บริเวณรอยต่อจะไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้จะมีการฉีดพาหะเข้ามารอยต่อ เมื่อพิจารณาที่รอยต่อจะเห็นได้ว่า กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อ คือ กระแสการแพร่ของพาหะส่วนน้อย ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการไดโอด หรือเรียกว่า Shockley diode equation หรือสมการเรกติไฟร์

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right) \tag{2.6}$$

เมื่อ
$$I_0 = Aqn_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n n_n} + \frac{D_p}{L_p p_p} \right) \tag{2.7}$$

และ V_A คือ แรงดันไบอัสตรงภายนอก

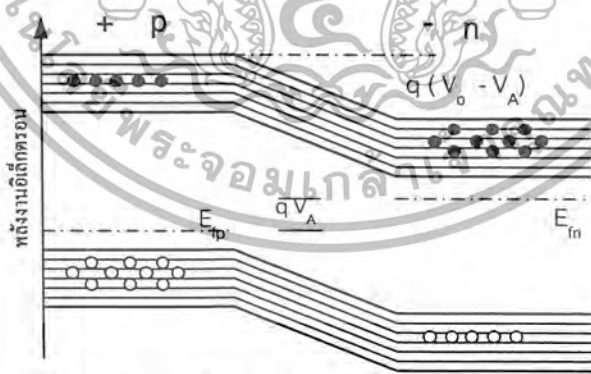
I_0 คือ กระแสอิ่มตัว

A คือ พื้นที่หน้าตัดของรอยต่อพี-เอ็น

D_n คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล

D_p คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน

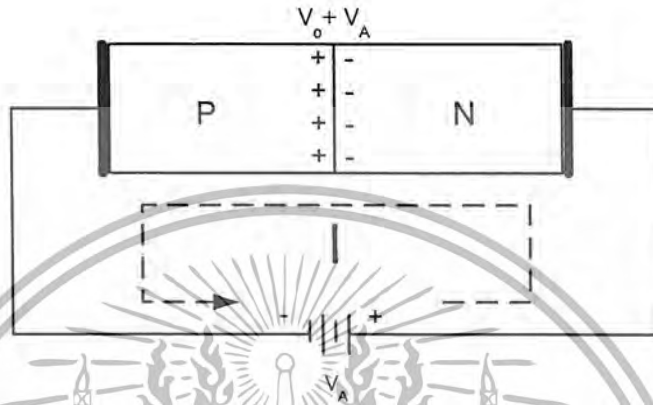
และขณะรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง ทำให้ระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อแตกต่างกัน แสดง ได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A

2.3 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็น ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ กล่าวคือ ทางด้านพีจะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับทางด้านเอ็น ดังรูปที่ 2.9



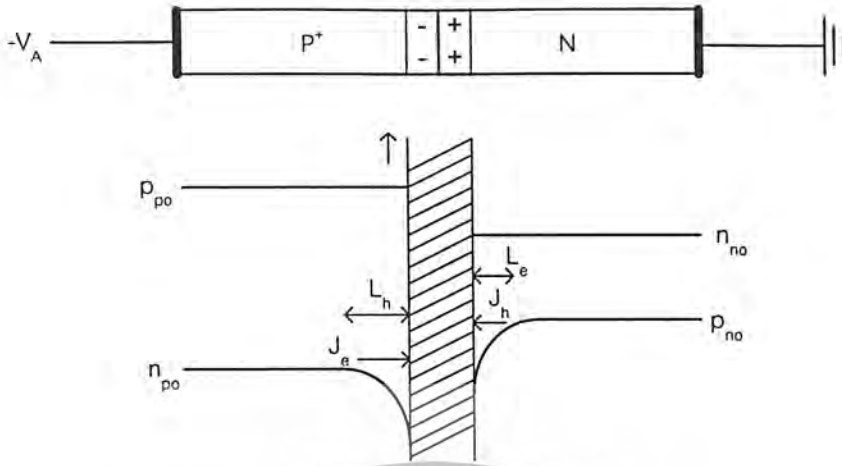
รูปที่ 2.9 รอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

หากให้แรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่า V_A แล้ว แรงดัน V_A จะไปช่วยเพิ่มแรงดันภายในที่รอยต่อให้มีความสูงชันจากเดิม ทำให้พาหะส่วนมากไม่มีโอกาสที่จะแพร่ข้ามรอยต่อได้ รอยต่อพี-เอ็นในขณะนี้จึงกระทำตัวคล้ายฉนวนซึ่งไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะมีความเพิ่มขึ้น และกว้างกว่าในตอนที่ยังไม่ได้รับการไบอัส

เนื่องจากแรงดันไบอัสย้อนกลับ V_A จะทำให้พาหะส่วนน้อยเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ดังนั้นปริมาณความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยใกล้ๆ บริเวณปลอดพาหะจะมีจำนวนลดลงดังรูปที่ 2.10 และสามารถหาความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยได้จากกฎของรอยต่อ คือ

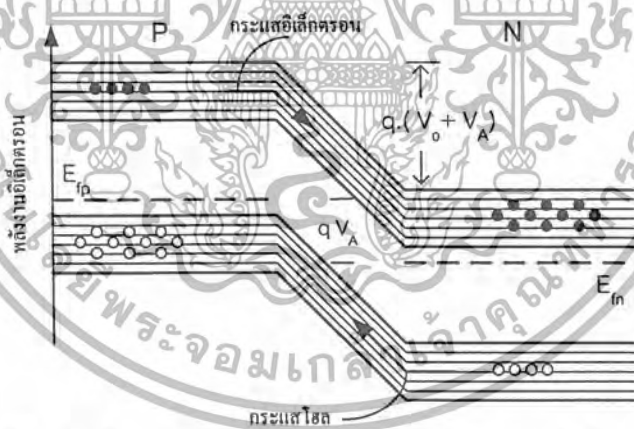
$$p_n \Big|_{x_n} = p_{n0} \cdot e^{\frac{-qV_A}{kT}} \quad (2.8)$$

$$n_p \Big|_{x_p} = n_{p0} \cdot e^{\frac{-qV_A}{kT}} \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.10 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ
ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ มีผลให้ระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อแตกต่างกัน qV_A ซึ่งใช้ธิบายว่าเกิดมีกระแสของพาหะส่วนน้อยไหลข้ามรอยต่อได้ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น
ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ V_A

จากสมการไดโอดในหัวข้อที่แล้ว เมื่อแทนค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$ จะได้ว่า

$$I \approx -I_0 \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องหมายลบ หมายถึง กระแสย้อนกลับ มีทิศทางตรงข้ามกับกระแสในกรณีได้รับไบอัสตรง จะเห็นได้ว่า กระแส I_0 เป็นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับซึ่งมีค่าน้อยมาก และไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัสที่ให้นอกจากอุณหภูมิของรอยต่อ

2.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

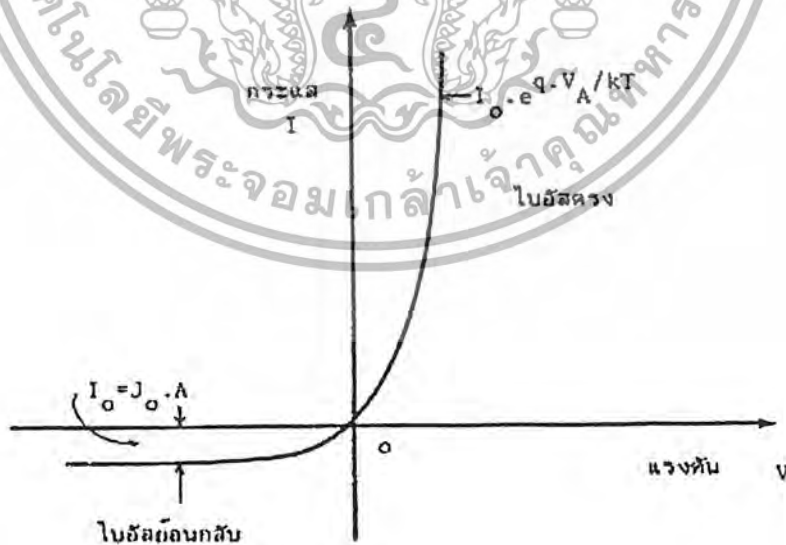
2.4.1 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นไม่ได้รับแสง

เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมาก และกระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเอ็กโปเนนเชียลกับแรงดัน และในขณะที่ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับจะมีกระแสจำนวนน้อยไหลย้อนกลับผ่านรอยต่อ ดังนั้น จากความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งกราฟนี้เราได้มาจากสมการที่ 2.6

ลักษณะกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ของรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นอาจเขียนได้ว่า

กรณีที่รอยต่อไม่ได้รับแสง (dark)

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right) \tag{2.11}$$



รูปที่ 2.12 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง (Illumination)

ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง เราพิจารณากันว่า ในลำแสงประกอบไปด้วยกลุ่มของ โฟตอน (Photon) ซึ่งมีพลังงานค่าหนึ่ง ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$E_{\text{photon}} = h \cdot \nu \quad (2.12)$$

เมื่อ	E_{photon}	คือ พลังงานของโฟตอน
	h	คือ ค่าคงตัวของพลังค์ = 6.624×10^{-34} joule-sec
	ν	คือ ค่าความถี่ของคลื่นแสง

เมื่อแสงตกกระทบบนรอยต่อพี-เอ็นซึ่งเป็นเนื้อของสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้แก่ อิเล็กตรอน ซึ่งอยู่ในแถบวาเลนซ์ให้สามารถออกไปเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) ในแถบ ความนำ (conduction band) ได้ และทิ้งให้เกิดโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกไว้ที่แถบวาเลนซ์ ประจุ พาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระที่เกิดขึ้นใหม่นี้ เป็นผลมาจากการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำด้วยแสง อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อหรือใกล้กับรอยต่อ จะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายใน ทำให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ โดยที่โฮลจะเคลื่อนที่ไปทางด้านพี และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางด้านเอ็น เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลในทิศตรงกันข้ามกับกระแสในขณะที่ยังไม่ได้รับแสง แสดงในรูปแบบ ที่ 2.13

กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “กระแสแสง (Photo current)” หรือเขียนย่อๆ ว่า I_p หรือ I_L ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะ ได้รับแสง แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 ดังนั้นอาจเขียน ได้ว่า

กรณีรอยต่อได้รับแสง (Illumination)

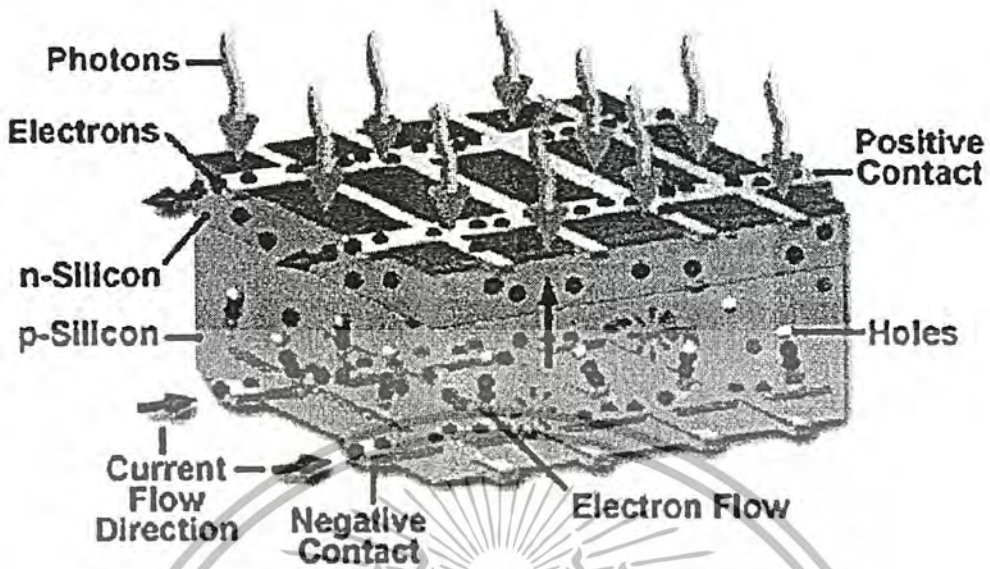
$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right) - I_p \quad (2.13)$$

โดยที่ I_p คือ กระแสเนื่องจากแสง (photo current) และกระแสเนื่องจากแสงสามารถ แสดงได้โดยสมการที่ 2.14

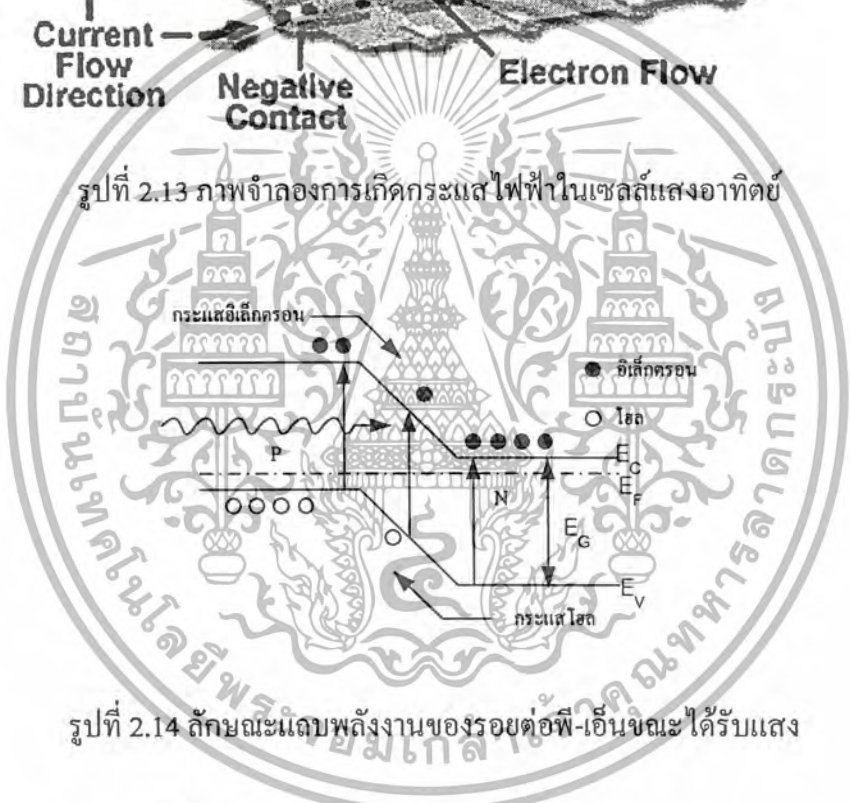
$$I_p = q \cdot A \cdot g_{op} (L_p + L_n) \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electron and Current Flow in Solar Cells



รูปที่ 2.13 ภาพจำลองการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์



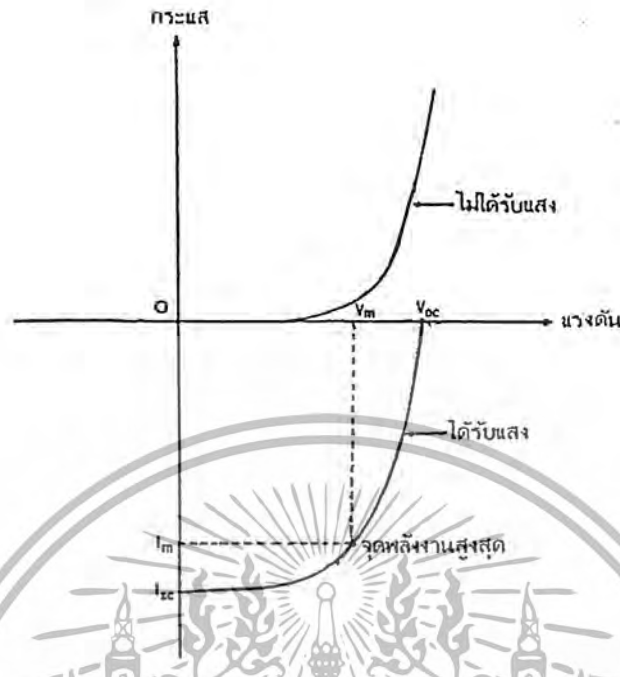
รูปที่ 2.14 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแสง

- เมื่อ q คือ ประจุของอิเล็กตรอน
- A คือ พื้นที่ของรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกแสง
- g_{op} คือ อัตราการเกิดประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากแสง (Optical Generation Rate)
- L_n, L_p คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

ดังนั้นคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแสง และไม่ได้รับแสงสามารถเขียนแสดง

เปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น
ขณะที่ไม่ได้รับแสง และ ได้รับแสง

2.5 พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ มีโครงสร้างแบบรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้น คุณสมบัติทางไฟฟ้า จึงเหมือนกับคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นทุกประการ และโดยที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้เป็น อุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า นั่นก็คือ เซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้เป็น แหล่งจ่ายพลังงาน ซึ่งจะต้องให้ทั้งแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าออกมาจากตัวเซลล์

ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ถูกตัดวงจร เมื่อเซลล์ได้รับแสงจะทำให้เกิดกระแสเนื่องจากแสง ไหลออกมาจากเซลล์ผ่านวงจร ในภาวะนี้กระแสจะมีค่าสูงสุด และถูกเรียกว่า I_{sc} ค่าของกระแสตัด วงจรนี้ พิจารณาหาได้จากสมการที่ 2.13 เมื่อกำหนดให้

ขณะลัดวงจร $V_A = 0$, ดังนั้นสมการที่ 2.13 จะเขียนใหม่ได้ว่า

$$I = -I_p = I_{sc} \quad (2.15)$$

ในขณะที่เซลล์ถูกเปิดวงจรออก (open circuit) และที่รอยต่อได้รับแสง จะพบว่า กระแสที่ ไหลในวงจรจะเป็นศูนย์ เนื่องจากวงจรถูกเปิด แรงดันที่ปรากฏคร่อมรอยต่อพี-เอ็นขณะนี้ถูกเรียกว่า “แรงดันเปิดวงจร (open circuit voltage)” เขียนย่อๆว่า V_{oc} ค่าของ V_{oc} นี้หาได้โดยพิจารณาว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

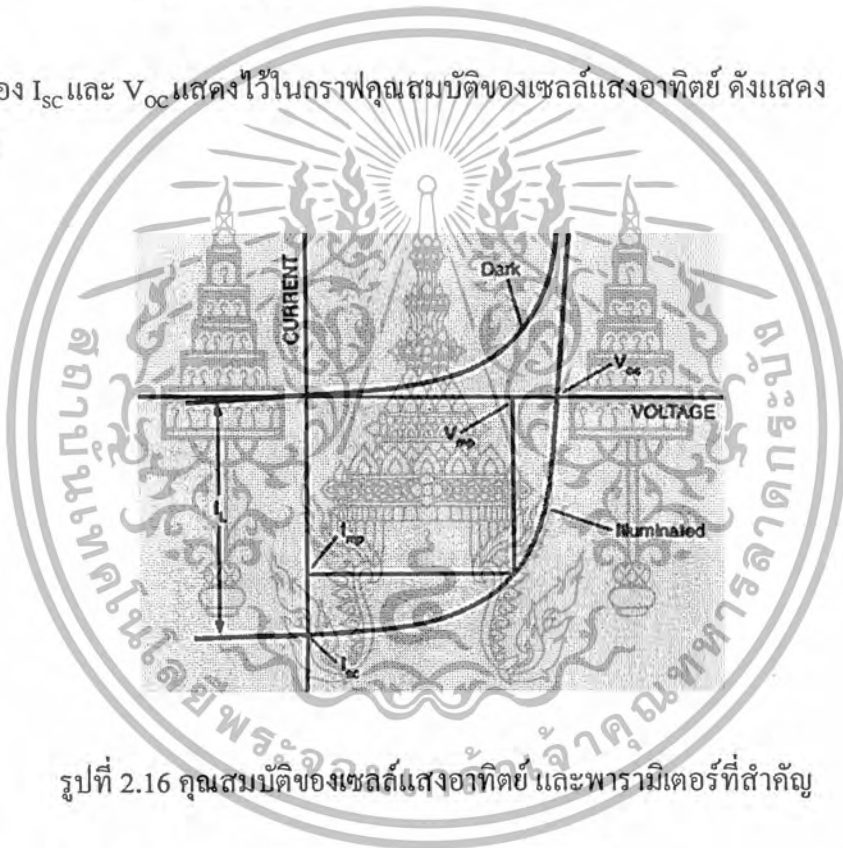
เมื่อเซลล์ถูกเปิดวงจร $I = 0$, สมการที่ 2.13 เขียนใหม่ได้ว่า

$$0 = I_0 \left(e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right) - I_p$$

ดังนั้น $V_A = V_{OC} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_p}{I_0} + 1 \right)$

หรือ $V_{OC} = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left(\frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right)$ (2.16)

ค่าของ I_{SC} และ V_{OC} แสดงไว้ในกราฟคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดง
ในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ และพารามิเตอร์ที่สำคัญ

กระแสไฟฟ้าเนื่องจากแสงที่เกิดจะมีขนาดมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ คือ ขนาดของพื้นที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็นซึ่งได้รับแสง, สัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนแสงเพื่อให้เกิดประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล, ระยะความลึกของรอยต่อพี-เอ็น, ขนาดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ, ค่าความคล่องตัวของประจุพาหะในเนื้อสารกึ่งตัวนำ, ค่าความเร็วในการรวมตัวของประจุพาหะที่ผิว, และค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์ โดยทั่วไป กระแสลัดวงจรในเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอน จะมีค่าประมาณ 35-40 mA/cm² และในกรณีของแกเลียมอาเซนายด์ค่า I_{SC} จะอยู่ราว 20 mA/cm² โดยวัดที่ค่า Air mass zero (AM0)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนค่าแรงดันเปิดวงจร (Open circuit voltage: V_{oc}) จะมีค่ามากขึ้นขึ้นอยู่กับขนาดของ ช่องว่างพลังงาน (Energy gap: E_g) ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเป็นเซลล์ อย่างไรก็ตาม ค่า V_{oc} นี้จะมีขนาด จำกัด คือ สูงสุดไม่เกินค่าของความกว้างของช่องว่างพลังงาน และปกติค่าของ V_{oc} ในเซลล์แบบ ซิลิคอนมีค่าประมาณ 0.5-0.6 โวลต์ และในกรณีของสารแกลเลียมอาเซนไนด์ V_{oc} จะมีค่าราว 0.9 โวลต์

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha \cdot T^2}{(T + \beta)} \text{ eV} \quad (2.17)$$

เมื่อ α, β เป็นค่าคงที่

ตารางที่ 2.1 ค่าของช่องว่างพลังงานที่อุณหภูมิต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน

สารกึ่งตัวนำ	$E_g(0K)$	$\alpha(\times 10^4)$	β	$E_g(300K)$
GaAs	1.519	5.405	204	1.422
Si	1.17	4.73	636	1.125
Ge	0.7437	4.774	235	0.663

อย่างไรก็ดีขณะที่นำเซลล์ไปใช้งาน เซลล์จะไม่ใช่ในภาวะลัดวงจร หรือเปิดวงจร ทั้งนี้ เนื่องจากเซลล์จะต้องถูกต่อเข้ากับ โหลด (load) ซึ่งมีค่าความต้านทานค่าหนึ่ง ดังนั้นแรงดัน และ กระแสที่เซลล์จ่ายออกมาให้แก่โหลดจะมีค่าน้อยกว่า ค่า V_{oc} และ I_{sc} โหลดซึ่งนำมาต่อ เมื่อมีค่าความต้านทานที่เหมาะสมค่าหนึ่ง จะทำให้ผลคูณของแรงดัน และกระแสที่เซลล์จ่ายออกมามีค่าสูงสุด หรือ ที่เรียกว่า “ค่ากำลังงานสูงสุด (maximum power)” ที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลดได้ เขียนย่อๆ ได้ว่า P_m ค่าของกระแสและแรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเขียนอักษรย่อแทนเป็น I_m และ V_m ตามลำดับ นั่นคือ

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (2.18)$$

และค่าความต้านทานของโหลดที่เหมาะสมหาได้โดยสมการที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{load} = \frac{V_m}{I_m} \quad (2.19)$$

ค่าของ P_m , V_m , และ I_m แสดงได้ดังกราฟคุณสมบัติของเซลล์ในรูปที่ 2.15

คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ก็คือ ค่าฟิลแฟคเตอร์ (Fill Factor) เขียนตัวย่อเป็น F.F ค่าของฟิลแฟคเตอร์ ถูกนิยามไว้ว่าเป็น อัตราส่วนระหว่างค่าพลังงานสูงสุดที่เซลล์จะจ่ายให้แก่โหลดได้จริงกับค่าของพลังงานสูงสุดในทางอุดมคติที่เซลล์จ่ายได้ นั่นคือ

$$F.F = \frac{P_m}{P_o} = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.20)$$

ค่าของฟิลแฟคเตอร์นี้จะไม่เกิน 1 ถ้าฟิลแฟคเตอร์มีค่าใกล้ 1 แสดงว่าเซลล์สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมาได้ใกล้เคียงกับเซลล์ในทางอุดมคติมากที่สุด เซลล์ที่ใช้งานโดยทั่วไปค่าฟิลแฟคเตอร์จะมีค่าระหว่าง 0.6-0.8 นอกจากนี้คุณสมบัติประการสำคัญยิ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ ก็คือ ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (energy conversion efficiency) เขียนตัวย่อเป็น η ประสิทธิภาพของเซลล์ ถูกนิยามไว้เป็น อัตราส่วนระหว่างพลังงานสูงสุดที่ได้จากเซลล์กับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนเซลล์ นั่นคือ

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P_{in}} \times 100\%$$

หรือ

$$= \frac{F.F \times I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.21)$$

เมื่อ P_{in} คือ พลังงานที่ตกกระทบบนหน้าของเซลล์ในหนึ่งวินาที หรือก็คือกำลังงานไฟฟ้าอินพุต นั่นเอง (Input power)

พลังงานจากแสงอาทิตย์ที่เซลล์ได้รับเกิดจากการดูดกลืนพลังงาน โฟตอนที่มีค่าสูงมากกว่า E_g ส่วนโฟตอนที่มีพลังงานต่ำกว่า E_g จะไม่มีผลทำให้เกิดกระแสแสง และในโฟตอนบางส่วนที่มีพลังงานสูงกว่า E_g อาจไม่เกิดกระแส แต่จะกระจายพลังงานออกมาในรูปของความร้อน ซึ่งหากเป็น

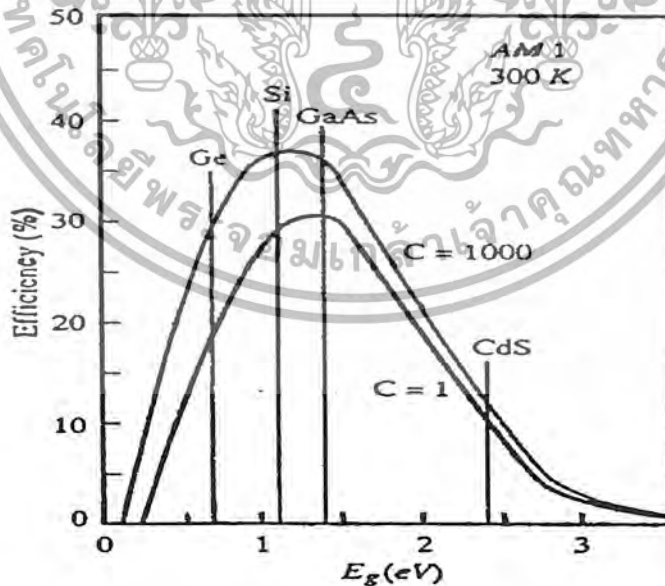
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีนี้ ประสิทธิภาพของเซลล์จะลดลง ดังนั้น ขนาดของ E_G จึงมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ จากสมการที่ 2.15 และสมการที่ 2.16 อาจสรุปได้ว่า

$$E_G \propto \frac{1}{I_m} \quad \text{และ} \quad E_G \propto V_m$$

แสดงว่า E_G ค่าหนึ่ง จะทำให้ผลคูณของ $I_m V_m$ มีค่าสูงสุด หรือประสิทธิภาพของเซลล์สูงสุด เราเรียก E_G ค่านี้นว่า " E_G (optimum) " หรือ Optimum Energy Gap

นอกจากนี้ยังมีการใช้เลนส์รวมแสงเพื่อเพิ่มความเข้มแสงให้มากขึ้น แล้วฉายลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเลนส์ขนาดใหญ่สามารถเพิ่มความเข้มของแสงได้เป็นหลายร้อยเท่า ทำให้เซลล์จ่ายกระแสได้สูง เนื่องจากกระแสแสงแปรกับความเข้มแสงโดยตรง รูปที่ 2.17 แสดงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุณหภูมิต่ำที่ 300K ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ โดยพลังงานแสงตกกระทบมีค่าเป็น 1 SUN และ 1000 SUN จะเห็นว่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแตกต่างกันเล็กน้อย แต่ข้อดีของระบบรวมแสง (Concentrating system) ก็คือ การเพิ่มกระแส โดยไม่ต้องเพิ่มพื้นที่ทำให้ระบบนี้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยกว่าปกติ



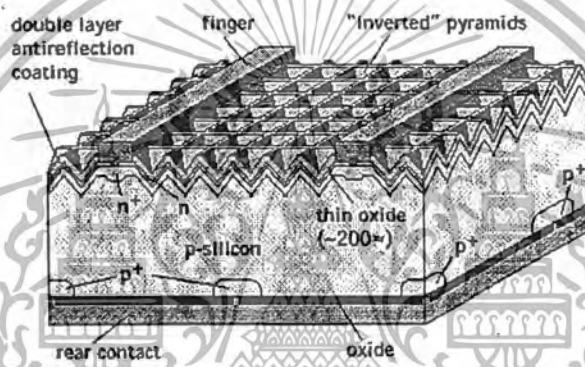
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในอุณหภูมิต่ำที่ 300K

กับขนาด E_G ของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 2.17 จะเห็นว่าซิลิคอน และแกเลียมอาเซไนด์ เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีขนาด E_g ที่ใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุด

เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น ในอุดมคติในทางทฤษฎี มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงสุด ราว 26% แต่มีปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อเซลล์ เช่น ความต้านทานอนุกรม (series resistance), ความต้านทานขนาน (shunt resistance), การสะท้อนกลับที่ผิว (surface reflection) และ อุณหภูมิใช้งาน ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ลดลงมาก โดยเซลล์ที่ขายในท้องตลาดมีประสิทธิภาพอยู่ราว 10-15% ปัจจุบันนี้การพัฒนา โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูง โดยการลดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการสะท้อน ทำให้เซลล์ที่ได้มีประสิทธิภาพสูงถึง 30% ตัวอย่าง ลักษณะโครงสร้างของเซลล์แบบประสิทธิภาพสูงดังแสดงในรูปที่ 2.18

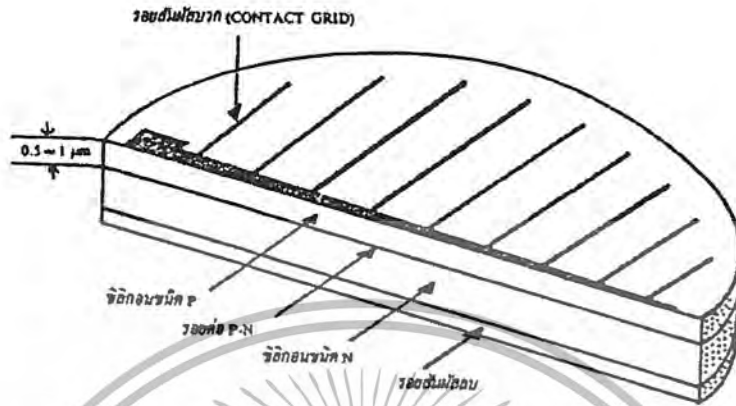


รูปที่ 2.18 ตัวอย่างลักษณะ โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบประสิทธิภาพสูง

เซลล์ที่กล่าวมาทั้งหมดผลิตขึ้นจากผลึกเดี่ยวของซิลิคอน (Silicon Single Crystalline) เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงแต่มีราคาแพง เพื่อลดราคาของเซลล์จึงนิยมเอาผลึกหลายรูป หรือ (Poly Crystalline) หรืออะมอร์ฟัส (Amorphous) มาสร้างแทนผลึกเดี่ยว ทำให้เซลล์เหล่านี้มีราคาถูก แต่ประสิทธิภาพต่ำกว่าเซลล์ผลึกเดี่ยว นอกจากนี้ยังมีการสร้างเซลล์แบบฟิล์มบาง (Thin Film) และแบบอื่นๆ อีกมากมาย แต่มีจุดมุ่งหมายที่สำคัญ คือ เซลล์ราคาถูก และประสิทธิภาพสูง เทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้น

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีควรมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น I_{sc} , V_{oc} , P_m , F.F และ η ซึ่งมีค่าสูงๆ ใดๆก็ดี พารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ก็ถูกจำกัดด้วยแฟคเตอร์อื่นๆ มากมาย ซึ่งบางแฟคเตอร์ก็ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ แต่บางแฟคเตอร์ก็สามารถที่จะปรับปรุงแก้ไข และพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นได้

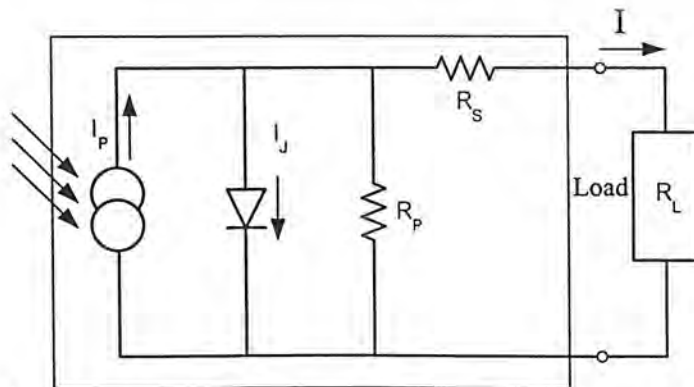
2.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็นและวงจรมุมูล



รูปที่ 2.19 โครงสร้างภายในของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน

ลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น แสดงได้ดังรูปที่ 2.19 โดยการแพร่สารเจือชนิดพี ลงไปในแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น จะทำให้เกิดรอยต่อพี-เอ็นขึ้น ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นจะมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ ปกติความลึกของรอยต่อนี้จะมีค่าน้อยกว่า $1\mu\text{m}$. เพื่อให้พลังงานจากโฟตอนของแสงสามารถผ่านเข้าไปถึงบริเวณรอยต่อได้สะดวก ชั้นป้องกันการสะท้อนของแสงมีหน้าที่ช่วยดูดกลืนแสง และช่วยลดการสะท้อนกลับของแสง จึงมีผลช่วยเพิ่มปริมาณการดูดกลืนแสง รอยสัมผัสทางด้านหน้าของเซลล์มักใช้โลหะอะลูมิเนียม ทำเป็นลายนิ้วมือหรือลายก้างปลา ทำหน้าที่รับกระแสที่ออกมาจากรอยต่อ ส่วนทางด้านล่างของเซลล์จะถูกฉาบด้วยอะลูมิเนียมเช่นกัน เพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าลบของเซลล์ อย่างไรก็ตามการนำเซลล์ไปต่อร่วมกันหลายๆ เซลล์ นิยมใช้วิธีการบัดกรี ดังนั้น เพื่อให้สามารถบัดกรีต่อสายร่วมกันได้ จึงนิยมนำเซลล์ไปทำการชุบนิเกิล เพื่อให้ส่วนที่เป็นขั้วสัมผัสบวก และขั้วลบของเซลล์สามารถบัดกรีต่อสายร่วมกันได้

จากลักษณะของเซลล์ดังกล่าว เราสามารถเขียนวงจรมุมูลได้ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ลักษณะวงจรมุมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยผู้จัดทำเอกสารนี้ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาและวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้เพื่อการค้าโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารได้ หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร จะถือว่าผิดกฎหมายและต้องรับผิดชอบต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ I_p	คือ กระแสเนื่องจากแสง
I_j	คือ กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น ขณะที่ไม่มีแสง
I	คือ กระแสรวมที่ไหลผ่านโหลดในวงจร
R_L	คือ โหลด
R_s	คือ ค่าความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์
R_p	คือ ค่าความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์

2.7 ผลของความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์

จากวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ในขณะใช้งาน จะเห็นได้ว่า กระแสเนื่องจากแสง (Photo current) แทนด้วยแหล่งจ่ายกระแส (current source: I_p) ซึ่งจะจ่ายกระแสออกมาในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็นในทางอุดมคติ I_j ค่าความต้านทานอนุกรม (Series resistance: R_s) เกิดขึ้นได้เนื่องจากค่าความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำ, ค่าความต้านทานของบริเวณรอยสัมผัสโอห์มิก (ohmic contact) ระหว่างโลหะกับส่วนพี และส่วนเอ็น และค่าความต้านทานของเส้นลวดตัวนำที่ใช้ต่อ ผลรวมของค่าความต้านทานอนุกรมทั้งหมด เขียนด้วยอได้เป็น R_s ส่วนค่าความต้านทานขนาน (Parallel resistance หรือ Shunt resistance: R_p) เป็นค่าความต้านทานสมมติที่ขนานกับรอยต่อพี-เอ็น ในรอยต่อพี-เอ็นที่สมบูรณ์ หรือในทางอุดมคติ ค่าของ R_p จะมีค่าเป็นอนันต์ (∞) และค่าของ R_s จะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากผลึกของสารกึ่งตัวนำที่ใช้มีจุดเสีย (defect) เกิดขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อ โดยเฉพาะรอยต่อที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ ย่อมมีส่วนที่ไม่สมบูรณ์ปรากฏอยู่ จึงทำให้รอยต่อพี-เอ็นไม่สมบูรณ์ ดังนั้นค่า R_p จึงไม่สูงเป็นค่าอนันต์ และค่า R_s ก็มีค่าไม่เป็นศูนย์ ผลของค่า R_s และ R_p จะทำให้คุณสมบัติของเซลล์เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงได้ในรูปที่ 2.21 และรูปที่ 2.22

ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์แสงอาทิตย์ (R_s) เกิดขึ้นจากความต้านทานภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำ และความต้านทานที่รอยสัมผัส (Contact) ความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์นี้เป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อพลังงานที่ได้จากเซลล์มาก จากวงจรสมมูล ซึ่งคิดที่ $R_s = 0$ และได้ I_R ออกมาดังนี้

$$I_R = I_p - I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.22)$$

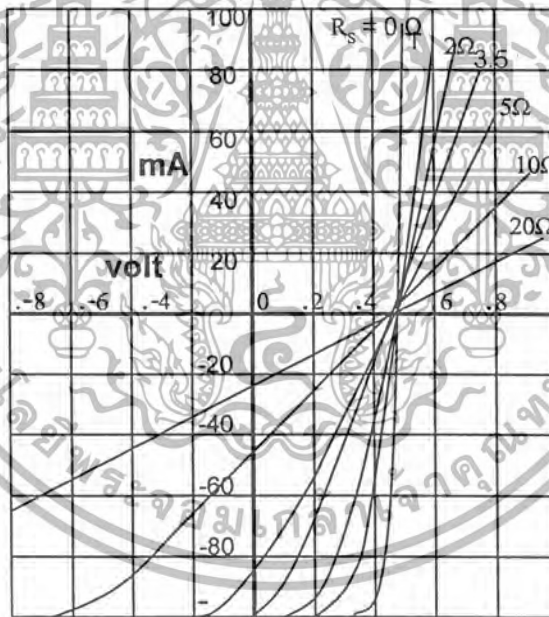
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งถ้า $R_s \neq 0$ แล้ว แรงดัน V_0 ที่วัดได้จะเป็นผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ และแรงดันที่ตกคร่อม R_s ซึ่งเท่ากับ $I_R R_s$ ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อจริงๆ จะมีค่าดังนี้

$$\text{แรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ (V)} = V_0 - I_R R_s$$

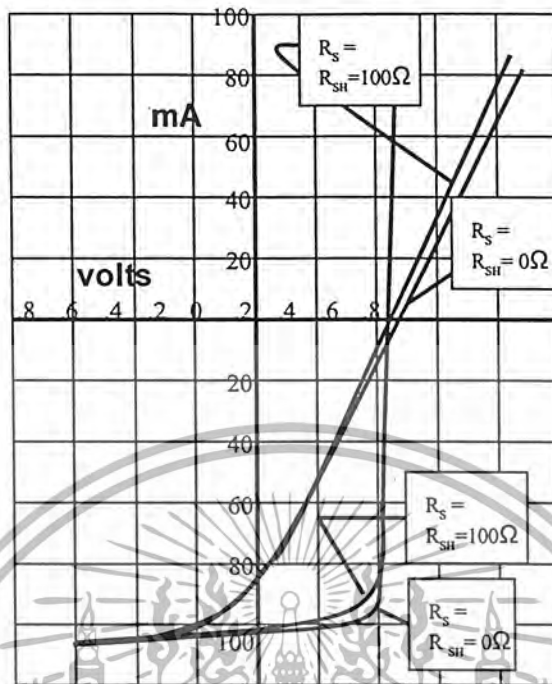
$$I_R = I_L - I_0 \left[e^{\left\{ \frac{q(V_0 + I_R R_s)}{kT} \right\}} - 1 \right] \quad (2.23)$$

จากสมการที่ 2.22 สามารถนำไปเขียนกราฟ เพื่อแสดงผลของ R_s ที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังรูปที่ 2.20 จากรูปจะเห็นได้ว่า เซลล์ที่มีค่า R_s สูงจะให้กระแสลัดวงจรน้อย และความชันของกราฟก็ลดลงด้วย เป็นผลให้พลังงานที่ได้จากเซลล์ลดน้อยลงไปมาก ดังนั้นในการสร้างเซลล์ จึงควรรหาทางลดค่า R_s ให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้



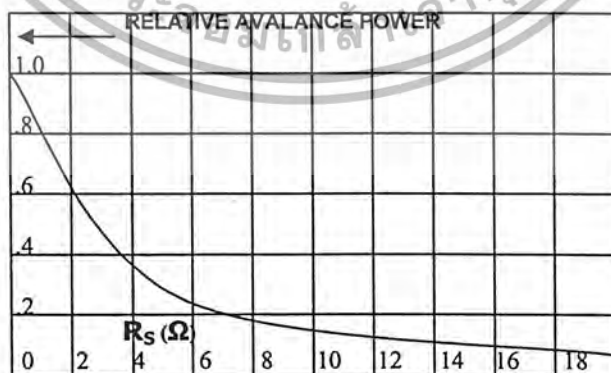
รูปที่ 2.21 ผลของความต้านทานอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 ผลของความต้านทานขนาน

อย่างไรก็ดี โดยทั่วไปแล้วจะพบว่า ในเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งาน ค่าความต้านทานขนาน R_p จะมีค่าสูงพอที่จะไม่พิจารณาผลที่เกิดขึ้น แต่ค่าความต้านทานอนุกรม R_s จะมีผล และบทบาทที่สำคัญยิ่งต่อคุณสมบัติของเซลล์ ในการออกแบบลักษณะโครงสร้าง, การสร้าง จึงต้องพิจารณาผลของค่า R_s อย่างรอบคอบ และพยายามให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ ขณะที่ค่า R_s สูงขึ้น พลังงานสูงสุดซึ่งเซลล์จะสามารถจ่ายได้จะมีค่าลดลงและแสดงได้ดังในรูปที่ 2.23

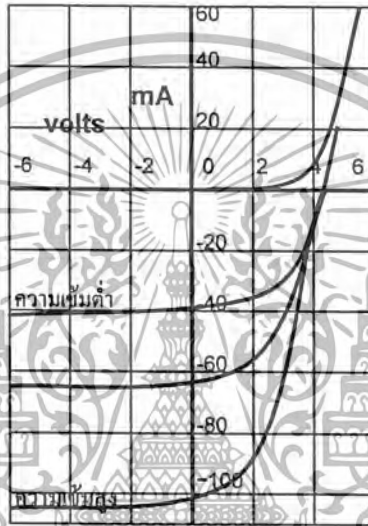


รูปที่ 2.23 การลดลงของพลังงานขณะที่ค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ขณะทำงาน จำเป็นต้องมีแสงมากระตุ้นให้อิเล็กตรอนได้รับพลังงานสูงพอที่จะเป็นอิสระ และทิ้งให้โฮลเกิดขึ้น ดังนั้น ถ้าหากแสงที่มาตกกระทบมีความเข้มสูงมาก หรือก็คือ ปริมาณความหนาแน่นของโฟตอนมีค่าสูง ก็จะทำให้เกิดคู่ประจุพาหะอิเล็กตรอน-โฮลเป็นจำนวนมาก ผลที่ได้จะทำให้ปริมาณกระแสเนื่องจากแสง มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

2.9 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานจริง ๆ นั้น เซลล์จะต้องได้รับความร้อนอันเนื่องมาจากแสงอาทิตย์ด้วย ซึ่งอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากความร้อนนี้ก็มีผลต่อกระแส และแรงดันที่ได้จากเซลล์ด้วย เมื่อพิจารณาสมการของกระแส I_R ที่ไหลผ่านมายังโหลด R_L

$$I_R = I_P - I_j \quad (2.24)$$

จะพบว่า กระแส I_R นี้จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร จะขึ้นอยู่กับกระแสเนื่องจากแสง I_P และกระแส I_j ที่ไหลผ่านรอยต่อ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมาพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_j และ I_P

2.9.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_j

เมื่อพิจารณาค่าของ I_j ในสมการที่ 2.11 ซึ่ง I_j มีค่าดังนี้

$$I_j = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการนี้จะเห็นได้ว่า I_0 จะมีผลต่อกระแส I_p มากที่สุด จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_0 โดยพิจารณาจากสมการของ I_0 ดังนี้

$$I_0 = Aqn_i^2 \left[\frac{1}{N_A} \left(\frac{D_n}{\tau_n} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{N_D} \left(\frac{D_p}{\tau_p} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.25)$$

จากสมการของ I_0 จะพบว่า n_i^2 ของซิลิคอนจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิดังสมการต่อไปนี้

$$n_i^2 = 15 \times 10^{32} T^3 e^{\frac{-1.21}{kT}} \quad (2.26)$$

จากสมการจะเห็นว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น n_i^2 จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยอย่างเอ็กโปเนนเชียล เป็นผลให้ I_0 มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิด้วย จากผลอันนี้แสดงว่า I_p จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

2.9.2 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_p

เมื่อพิจารณาค่าของกระแส I_p ที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากแสงในสมการที่ 2.14

$$I_p = qAg_{op}(L_n + L_p)$$

เนื่องจาก I_p แปรผันตาม g_{op} และ L จึงควรพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อ L และ g_{op}

จากสมการ

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (2.27)$$

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์ในการแพร่ซึมของสาร (Diffusion coefficient หรือ Diffusion constant) สำหรับที่อุณหภูมิค่าๆนั้น จะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ซึมน้อยมาก จากสมการของ L จึงเหลืออยู่แต่ค่าอายุของพาหะ, τ (Carrier lifetime) ที่ต้องพิจารณา ซึ่งก็พบว่าที่อุณหภูมิค่าๆ นั้น จะมีผลต่ออายุของพาหะน้อยมากเช่นกัน

องค์ประกอบอีกตัวหนึ่งที่มีผลต่อ I_p ก็คือ ค่าอัตราการผลิตของกระแส, g_{op} โดยพบว่าค่า g_{op} จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากช่องว่างพลังงานของสารจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้พลังงานโฟตอนจากแสงสามารถไปกระตุ้นให้เกิดพาหะได้มากขึ้นกว่าเดิม แต่ผลอันนี้เมื่อพิจารณาการนำไปใช้งานจริงๆ ที่อุณหภูมิค่าๆ และมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย (ในช่วง 20-70°C) อุณหภูมิจะมีผลต่อค่า g_{op} น้อยมาก จึงสรุปได้ว่า I_p จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นน้อยมากกับอุณหภูมิ

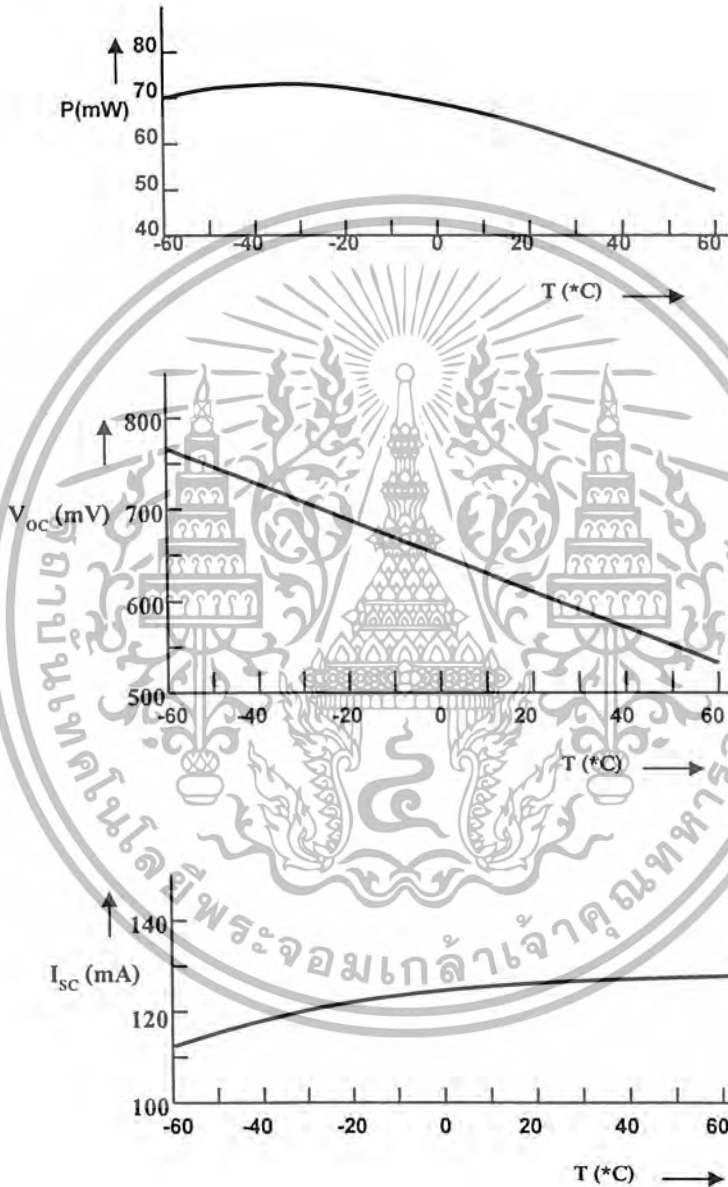
2.9.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ (V_{oc})

สำหรับผลของอุณหภูมิที่มีต่อแรงดันที่ได้จากเซลล์ เพื่อความสะดวกจะพิจารณาค่าแรงดันขณะวงจรมีเปิด (V_{oc}) ตามสมการที่ 2.16

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_p}{I_0} + 1 \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการนี้ค่า $\frac{kT}{q}$ จะมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงของ V_{oc} เนื่องจากค่า $\frac{k}{q}$ มีค่าต่ำมาก, ค่าที่มีผลต่อ V_{oc} ก็คือ I_0 ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เป็นผลให้ V_{oc} มีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_{sc} , V_{oc} , และ P_o ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.25

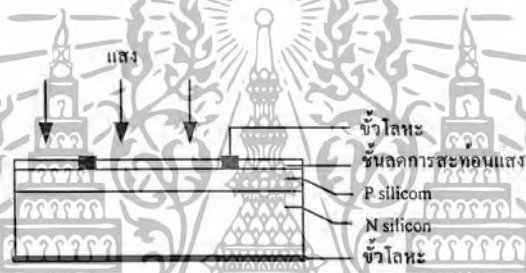


รูปที่ 2.25 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 ผลของชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์

ในการนำเซลล์ไปใช้งานเพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงมาเป็นพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากแสงที่ส่องมากระทบผิวหน้าเซลล์จะมีบางส่วนถูกดูดกลืนเอาไว้เพื่อนำไปเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า และมีส่วนสะท้อนไปจากผิวหน้าของเซลล์ แสงส่วนที่สะท้อนออกไปจากผิวนี้นเองที่สูญเสียไปโดยไม่เกิดประโยชน์ เพื่อที่จะนำแสงส่วนนี้มาใช้ประโยชน์อีก จึงควรมีชั้นลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าของเซลล์ ชั้นนี้จะเป็นชั้นที่ยอมให้แสงผ่านเข้าไปยังผิวหน้าของเซลล์ได้ เมื่อแสงสะท้อนกลับออกจากผิวหน้าของเซลล์ ชั้นลดการสะท้อนแสงจะทำให้แสงบางส่วนสะท้อนกลับลงไปยังผิวหน้าของเซลล์อีก ช่วยให้เซลล์ได้รับความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม จึงทำให้เซลล์สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงขึ้นตามไปด้วย ชั้นลดการสะท้อนแสงจะช่วยให้แสงสะท้อนกลับลงไปยังผิวหน้าของเซลล์ได้มากเพียงใด จะขึ้นอยู่กับดัชนีหักเหและความหนาของสารที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง



รูปที่ 2.26 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสง

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างดัชนีหักเห (n) ของสารที่ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

สาร	ดัชนีหักเห (n)
SiO ₂	1.5
SiO	1.9
SnO ₂	2.1
ZnS	2.3
TiO ₂	2.6

2.11 การสะท้อนของแสงในตัวกลางต่างชนิดกัน

เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลาง 2 ชนิด จะมีแสงส่วนหนึ่งสะท้อนกลับและส่วนหนึ่งหักเหผ่าน

ตัวกลาง สมบัติของการสะท้อนกลับ (Coefficient of reflection: ρ) หาได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (2.23)$$

โดยที่ n_1 และ n_2 เป็นค่าดัชนีหักเหของตัวกลาง 2 ชนิด

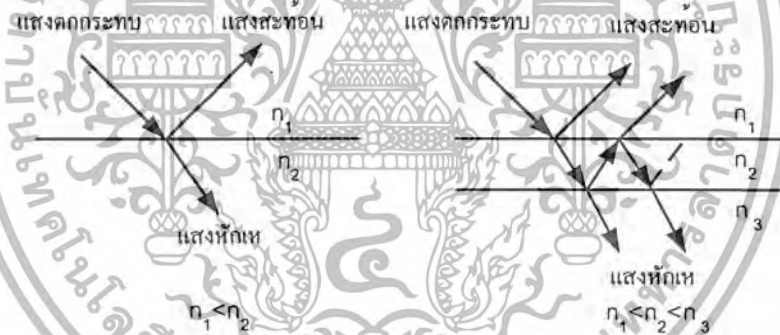
เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหแสง n_1 ไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเหแสง n_2

ถ้า $n_1 < n_2$ แสงส่วนใหญ่จะหักเหเข้าสู่ตัวกลางที่มีดัชนีหักเห n_2 และแสงส่วนน้อยจะสะท้อนออกไป

ในทางตรงกันข้าม ถ้า $n_1 > n_2$ แล้วแสงส่วนใหญ่จะสะท้อนกลับออกไป ดังแสดงในรูปที่ 2.27

ถ้าแสงเดินทางผ่านตัวกลาง 3 ชนิด ที่มีดัชนีหักเหแสงเป็น n_1, n_2 และ n_3 ตามลำดับ

ถ้า $n_1 < n_2 < n_3$ แสงส่วนใหญ่จะหักเหเข้าสู่ตัวกลางที่ 2 และ 3 แสงส่วนที่สะท้อนออกจากผิวหน้าของตัวกลางที่ 3 เมื่อมาถึงผิวหน้าของตัวกลางที่ 2 แสงส่วนใหญ่จะสะท้อนกลับลงมายังผิวหน้าของตัวกลางที่ 3 อีก และแสงส่วนน้อยหักเหเข้าสู่ตัวกลางที่ 1 ดังรูปที่ 2.27 การสะท้อนกลับนี้เอง ที่ทำให้ผิวหน้าของตัวกลางที่ 3 ได้รับความเข้มแสงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.27 การสะท้อนของแสงในตัวกลางแบบ 2 ชนิด และแบบ 3 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

พอร์สซิลิคอน (Porous Silicon)

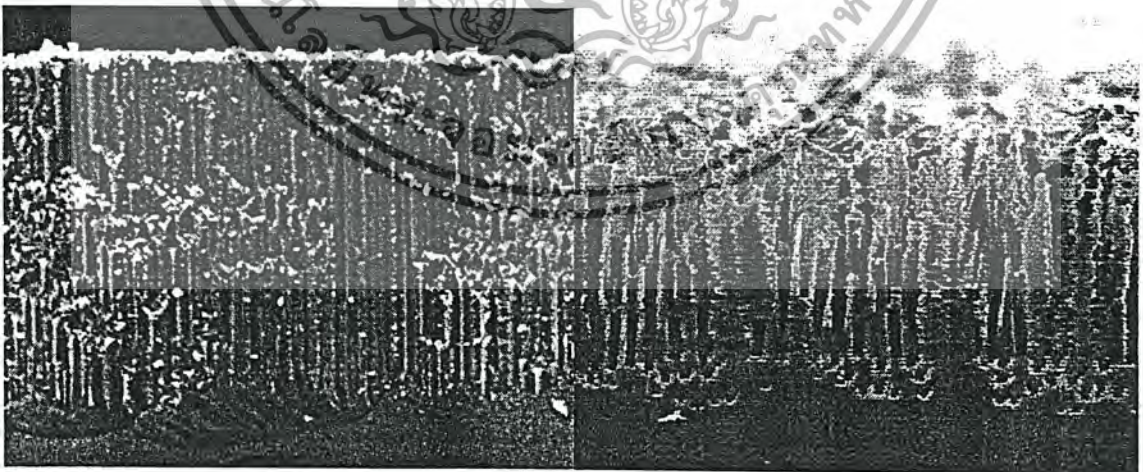
3.1 บทนำ

หลังจากปี 1824 ซิลิคอนได้ถูกแยกออกเป็นธาตุบริสุทธิ์โดยนักเคมีชาวสวีเดน Jöns Jacob Berzelius ในปี 1956 ได้พบว่าสามารถกัดเป็นพอร์สได้โดยวิธีการกัดแบบ Anodization โดย Uhlir ซึ่งทำให้เริ่มมีการศึกษาถึงคุณสมบัติของพอร์สซิลิคอนกันมากขึ้น

และได้มีการค้นพบคุณสมบัติที่สำคัญ ในปี 1990 โดย Leigh Canham ว่า พอร์สซิลิคอนสามารถเรืองแสงได้ ซึ่งทำให้ได้รับความสนใจจากทั่วโลก มีบทความจำนวนมากพยายามอธิบายถึงคุณสมบัติทางด้านเคมี และ ฟิสิกส์ ของพอร์สซิลิคอน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในงานอิเล็กทรอนิกส์, ทางการแพทย์, เครื่องตรวจจับต่างๆ, ฯลฯ

พอร์สซิลิคอนนั้นเป็นวัสดุที่มีความซับซ้อน ซึ่งมีทั้งบริเวณที่เป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบ เชื่อว่าภายในของพอร์สซิลิคอนอะตอมนั้น นอกจากจะมีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบเหมือนกับผลึกเดี่ยวซิลิคอน แต่ก็ยังพบว่ามีจุดบกพร่องของผลึก, ช่องว่าง, ระยะระหว่างช่องว่าง และพันธะ Dangling bond กับอะตอมข้างเคียง ซึ่งโครงสร้างที่เล็กนี้ สามารถพบได้ 2 รูปแบบ คือ จุด และ แท่ง หรือแบบผสม

ผลึกขนาดเล็กในระดับนาโนนี้ มีลักษณะแข็งเปราะ และ มีรูพรุน จึงทำให้ถูกเรียกว่า “พอร์สซิลิคอน (Porous silicon)”

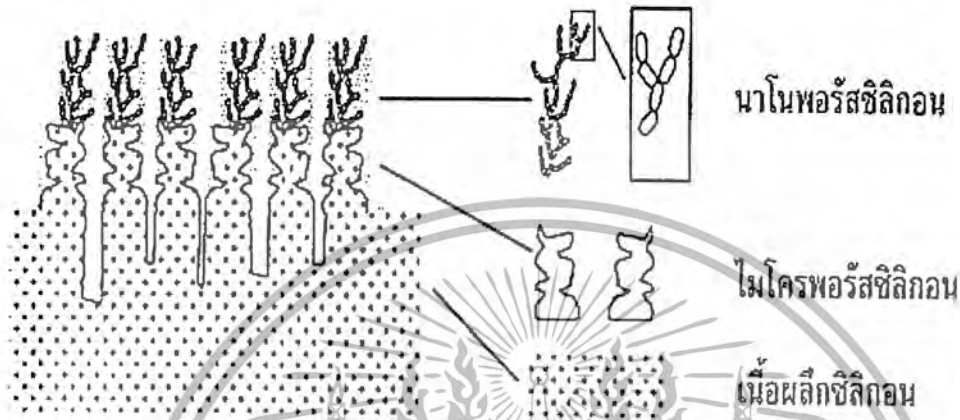


รูปที่ 3.1 ทัศนคติของโครงสร้างนาโนพอร์สซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน

พอร์สซิลิคอน คือ ผลึกซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยในชั้นความพรุนนี้อาจจะประกอบไปด้วยโครงสร้างของผลึกซิลิคอนเล็กๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรจนถึงระดับไมโครเมตร โดยในแต่ละชั้นจะมีขนาดของโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพจำลอง โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอน

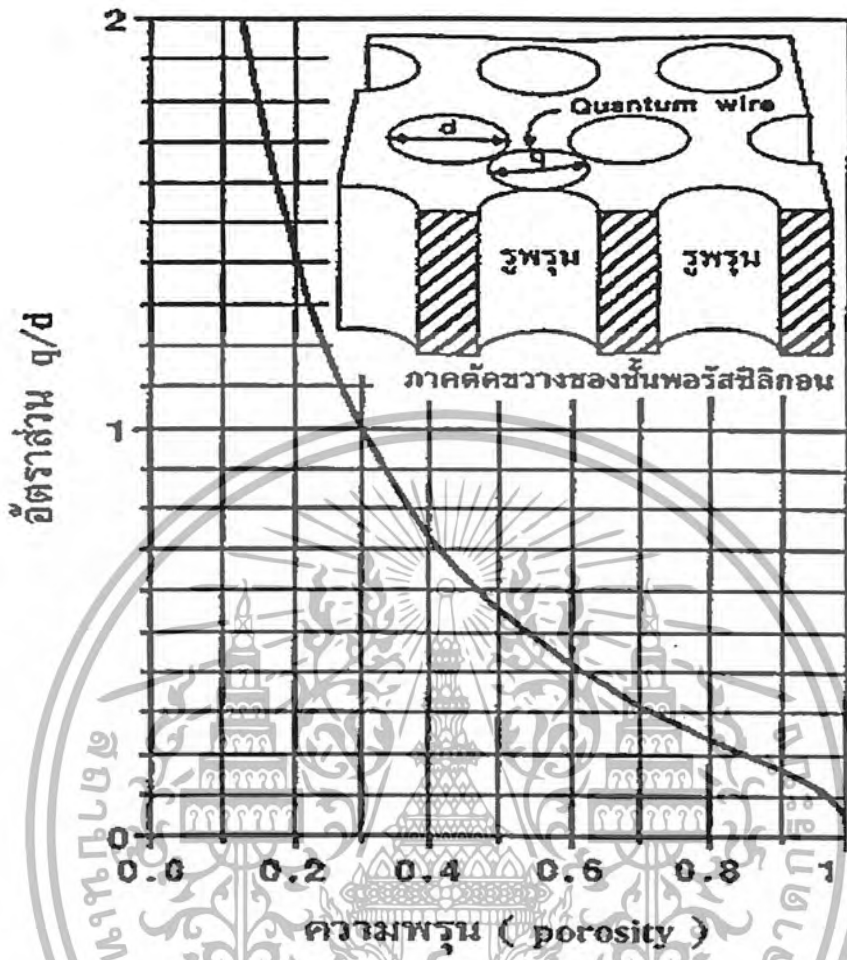
โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนทั้งสองนี้ เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical etching) นอกจากนี้ จากการศึกษาค้นคว้า โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน โดยเฉพาะในส่วนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนยังพบต่อไปอีกว่า ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิคอนนั้นยังประกอบไปด้วยพันธะของซิลิคอนไฮไดรด์ (Si:H) หรือ ซิลิคอนออกซิไฮไดรด์ (Si:O:H) ปกคลุมอยู่ที่ผิวโดยทั่วไป

3.3 ความพรุนของพอร์สซิลิคอน

วัสดุใดๆ ก็ตามที่มีลักษณะ โครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่ภายในเนื้อของวัสดุ ก็จะได้ชื่อว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุที่มีความพรุน โดยค่าความพรุนนี้เป็นปริมาณที่สามารถบ่งบอกได้ถึงลักษณะขนาด โครงสร้างของวัสดุได้อย่างคร่าวๆ ซึ่งสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างมวล หรือปริมาตรของเนื้อวัสดุกับช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุนั้นๆ

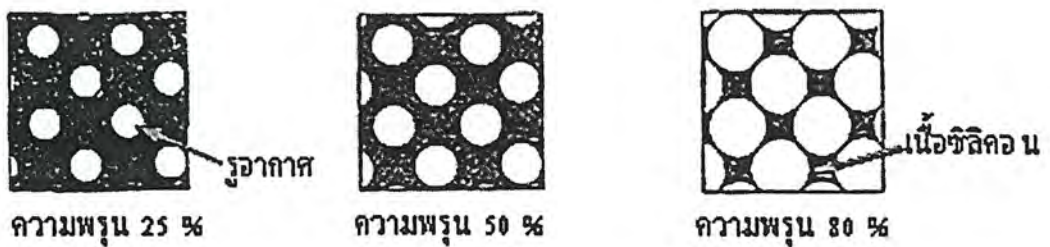
เป็นที่ทราบกันแล้วว่าพอร์สซิลิคอนนั้นก็คือ ผลึกซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยขนาดของเนื้อผลึกซิลิคอนที่เหลือนั้น และขนาดของรูพรุน จะมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร เนื้อของผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรนี้จะแสดงคุณสมบัติทาง Quantum size effect ในลักษณะของ Quantum wire ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อของผลึกในระดับนาโนเมตร กับขนาดของรูพรุน จะมีผลต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนแสดงในรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเนื้อผลึกซิลิกอน (q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์สซิลิกอน

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่า ทั้งขนาดของเนื้อผลึกซิลิกอน (q) และขนาดของรูพรุน (d) มีผลต่อความพรุนของพอร์สซิลิกอน โดยถ้าเนื้อของผลึกซิลิกอนถูกกัดจนมีขนาดเล็กกลงๆ หรือขนาดของรูพรุนมีขนาดกว้างขึ้น จะมีผลทำให้พอร์สซิลิกอนนั้นมีความพรุนมากขึ้นกว่าเดิม ดังแสดงใน รูปที่ 3.4



รูปที่3.4 แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์สซิลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ

3.4 การแบ่งประเภทของพอร์สซิติคอน

3.4.1 แบ่งตามขนาดของแท่งพอร์ส

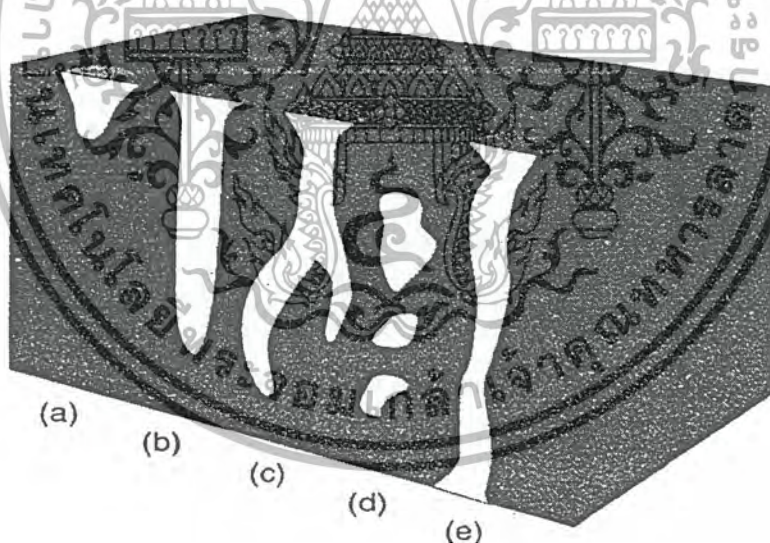
พอร์สซิติคอนสามารถถูกแบ่งได้ตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งของพอร์สได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. ไมโครพอร์ส (Micropore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งพอร์สน้อยกว่า 10 นาโนเมตร
2. เมโซพอร์ส (Mesopore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งพอร์สระหว่าง 10 ถึง 50 นาโนเมตร
3. แมโครพอร์ส (Macropore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งพอร์ส 50 นาโนเมตร

3.4.2 แบ่งตามลักษณะของรูพรุน

ลักษณะของรูพรุนของพอร์สมีหลายลักษณะ แบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลักๆ ได้แก่

1. Saccate หรือ Blind มีลักษณะเป็นรูตันและไม่มีการแยกของรูพรุน
2. Interconnected หรือ Banched มีลักษณะเป็นรูตันและมีการแยกออกหรือเชื่อมต่อของรู
3. Closed หรือ Totally Isolated มีลักษณะเป็นโพรงอากาศผิวปิดทุกด้าน
4. Through มีลักษณะเป็นรูกลางทะลุออกทั้งสองด้าน

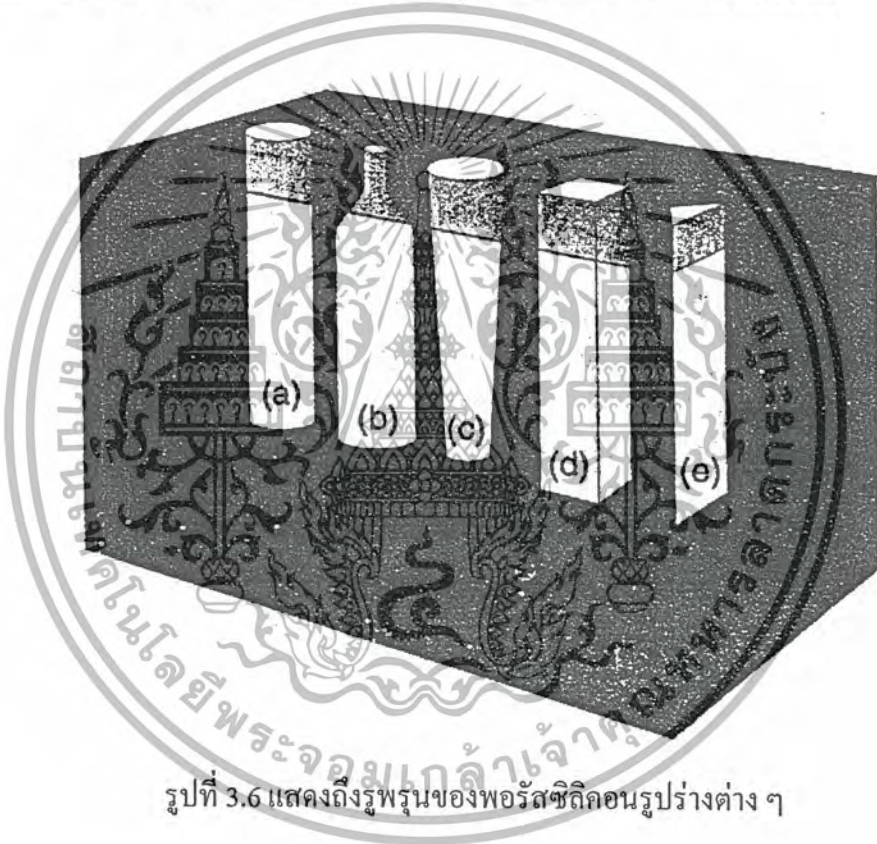


รูปที่ 3.5 แสดงถึงรูพรุนของพอร์สซิติคอนลักษณะต่างๆ ซึ่งลักษณะของแท่งพอร์สที่แตกต่างกันสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกันได้

3.4.3 แบ่งตามรูปร่างของรูพรุน

รูพรุนของพอร์สซีลิกอนนอกจากขนาดและลักษณะที่แตกต่างกันแล้วยังมีรูปร่างได้หลายแบบ โดยรูปร่างของรูพรุนที่พบส่วนใหญ่มีอยู่ 5 แบบ ได้แก่

1. Cylindrical คือรูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก
2. Ing-bottle คือรูพรุนที่มีรูปร่างคล้ายขวดน้ำ
3. Funnel คือรูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกรวย
4. Cuboid หรือ Slit คือรูพรุนที่มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์
5. Triangular หรือ Pyramidal คือรูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงสามเหลี่ยมพีระมิด

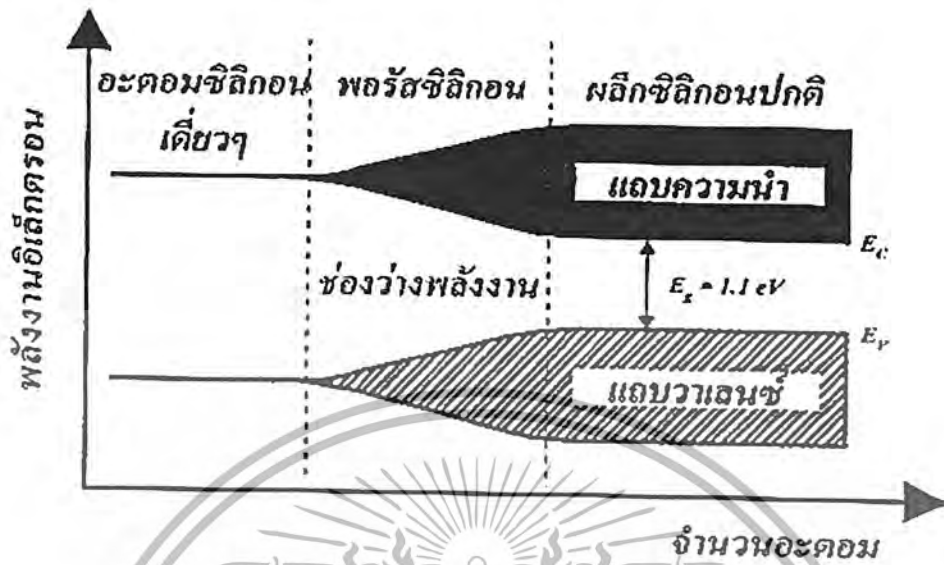


รูปที่ 3.6 แสดงถึงรูพรุนของพอร์สซีลิกอนรูปร่างต่าง ๆ

3.5 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซีลิกอน

เมื่ออะตอมของผลึกซิลิกอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จนเกิดการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงานในอะตอม ทำให้การแตกแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แตกแยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนของอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน จากหลักการนี้เองถ้าเราสามารถทำการลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ ก็จะทำให้ปฏิกริยาระหว่างอะตอมที่มีต่อกันนั้นมีจำนวนลดลงด้วย ซึ่งจะไปมีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนของช่องว่างพลังงาน (Band gap energy) ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิลิกอนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ

จากรูปที่ 3.7 ข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนมีค่าลดลง จะมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนลงนั้น สามารถทำได้โดยการลด หรือบีบขนาดโครงสร้างของผลึกซิลิกอนให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับของนาโนเมตร จนสามารถเกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม อันจะมีผลทำให้ลักษณะ โครงสร้างทางช่องว่างพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกซิลิกอนเดิม เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า Quantum size effect หรือ Quantum confinement effect

พาหะนำกระแสที่อยู่ภายใน โครงสร้างเล็กๆเหล่านี้ จะเสมือนว่า ได้ถูกกักขังให้อยู่ภายในบริเวณที่มีเนื้อที่จำกัด ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างอิสระในแบบ 3 มิติ ได้เหมือนกับอยู่ในเนื้อผลึกซิลิกอนปกติ ทำให้คุณสมบัติทาง ไฟฟ้า และคุณสมบัติทางแสงจะแตกต่างไปจากเนื้อซิลิกอนเดิม ทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมของพาหะนำกระแสจะถูกบีบ หรือบังคับด้วยลักษณะ และขนาดของโครงสร้างผลึก ทำให้ปรากฏการณ์ Quantum size effect หรือ quantum confinement effect สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกันคือ

1. ควอนตัมในเชิง 2 มิติ (Quantum well)
2. ควอนตัมในเชิง 1 มิติ (Quantum wire)
3. ควอนตัมในแบบไม่มีมิติ (Quantum dot)

เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ของชั้นพอร์ซซิลิกอนจะมีลักษณะเป็นเส้น หรือเสาแคบๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นใน โครงสร้างของพอร์ซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิคอน จัดอยู่ในประเภท ควอนตัม 1 มิติ หรือ Quantum wire นั่นเอง ซึ่งความกว้างของช่องพลังงาน (E_{ps}) มีค่าขึ้นอยู่กับโครงสร้าง นาโนเมตรของพอร์ซซิลิคอน

3.6 พหุติกรรมทางแสง

3.6.1 พหุติกรรมทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

วิธีการที่จะศึกษาถึงขนาด หรือลักษณะของช่องว่างพลังงาน ระดับพลังงานของ localized state หรือ surface state ให้ได้ผลดีที่สุด ได้แก่ การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ เพราะว่าการดูดกลืนแสงก็ดี หรือการเปล่งแสงก็ดี เกิดจากการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบพลังงานใดๆ มีการดูดกลืนแสง แล้วคายแสงออกมา เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานซึ่งค่าพลังงานที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะเท่ากับพลังงานโฟตอนที่อิเล็กตรอนดูดกลืนหรือคายออกมานั่นเอง

โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)

การเปล่งแสงในลักษณะโฟโตลูมิเนสเซนซ์ เป็นปรากฏการณ์การเปล่งแสงอันเนื่องมาจากการกระตุ้นพาหะอิเล็กตรอนด้วยวิธีการส่องแสง (Excitation by light) จนพาหะอิเล็กตรอนมีพลังงานมากเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบความนำได้ แต่เนื่องจากพาหะอิเล็กตรอนเหล่านี้มีความไม่เสถียรในสถานะใหม่นี้ ดังนั้นจึงต้องตกกลับมายู่ในสถานะเดิม โดยจะมีการคายพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนหรือแสง ซึ่งค่าพลังงานที่ปล่อยออกมานี้จะมีค่าขึ้นอยู่กับช่วงกว้างของระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนต้องกระโดดมารวมตัวกับโฮล โดยความสัมพันธ์ระหว่างพลังงาน (E) กับความยาวคลื่นของแสง (λ) เป็นดังนี้คือ

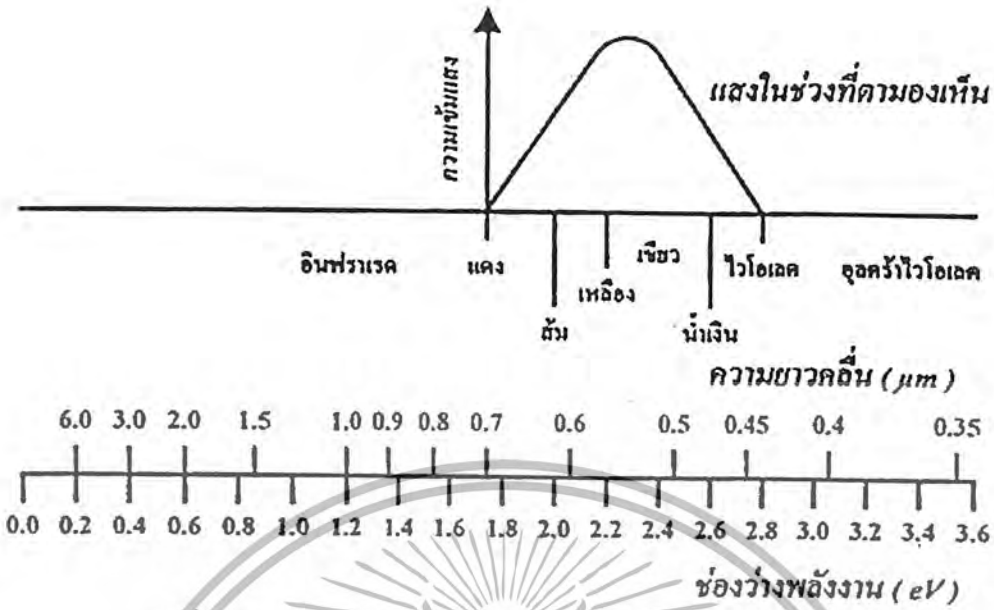
$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.1)$$

โดยที่ h เป็นค่าคงตัวของพลังค์ = 4.14×10^{-15} eV.s

c เป็นความเร็วแสง = 3×10^8 m/s

$$\lambda(nm) = \frac{1240}{E} (eV) \quad (3.2)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่า การที่แสงที่เปล่งออกมามีความยาวยาวคลื่นหรือสีต่างๆ ได้นั้น ขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของอิเล็กตรอนที่คายออกมานั่นเอง โดยสีของของแสงที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ จะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 3.8

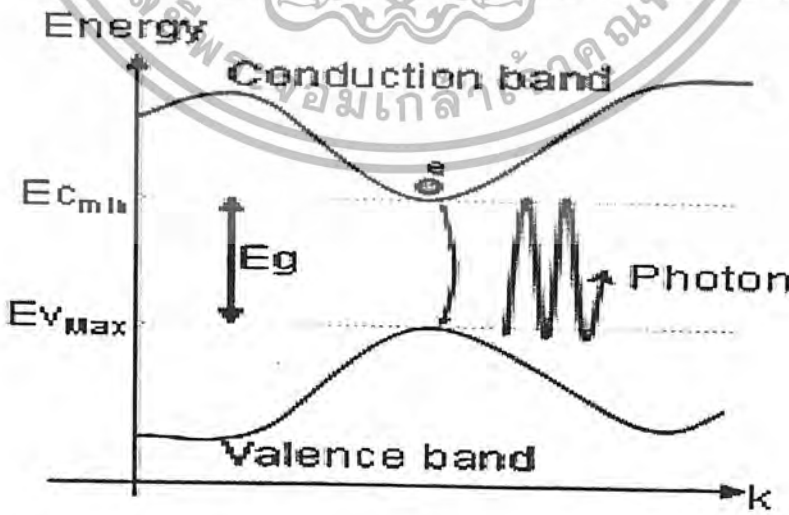


รูปที่ 3.8 แผนภาพสีของแสงที่ความยาวคลื่น และค่าพลังงานต่างๆ

3.6.2 พฤติกรรมทางแสงของผลึกซิลิคอน

ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วว่า การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบพลังงานหนึ่งไปสู่แถบพลังงานหนึ่ง ในลักษณะที่มีค่าพลังงานเพิ่มขึ้นจะก่อให้เกิดการดูดกลืนแสงและค่าความแตกต่างของระดับชั้นพลังงานก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงนั้น จะต้องเท่ากับพลังงานโฟตอนของแสงที่เป็นตัวกระตุ้น ซึ่งกฎนี้จะถูก เรียกว่า กฎการอนุรักษ์พลังงาน นอกจากนี้แล้วยังมีกฎที่อนุรักษ์โมเมนตัมอีกด้วย

โดยในวัสดุที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นแบบ Direct band gap ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงแผนภาพโครงสร้างของแถบพลังงานแบบ direct band gap

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเปลี่ยนสถานะระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบความนำ ค่า wave number (k) ก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะจะไม่มีเปลี่ยนแปลงแต่อย่างไร ทั้งนี้เนื่องจาก ระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ที่กับระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำ อยู่ที่ตำแหน่ง wave number เดียวกัน ดังนั้น จึงทำให้ในกระบวนการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนอันเนื่องมาจากการ ดูดกลืนแสง ค่าโมเมนตัม ($\hbar k$) ของอิเล็กตรอนทั้งก่อนและหลังการเปลี่ยนสถานะมีค่าคงที่เสมอ เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัมและกฎการอนุรักษ์พลังงาน ดังนี้ คือ

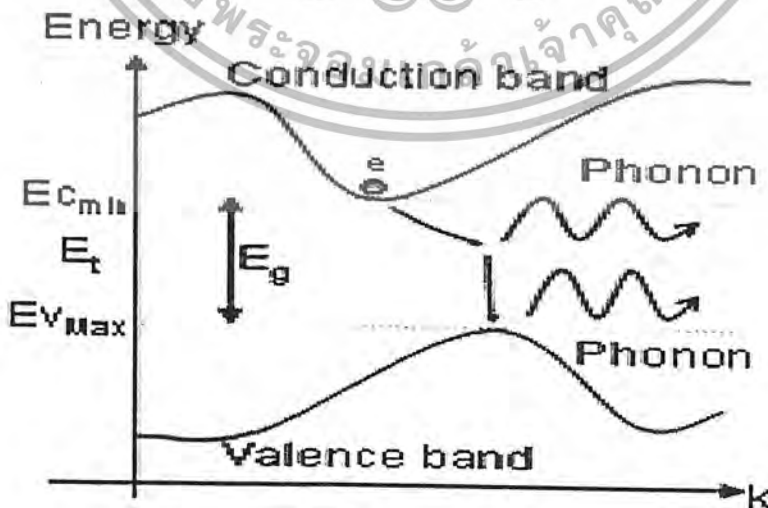
$$k_1 - k_2 = 0 \quad : \quad \text{กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม} \quad (3.3)$$

$$E_f - E_i = h\nu \quad : \quad \text{กฎการอนุรักษ์พลังงาน} \quad (3.4)$$

โดยที่ k_1 = เป็น wave number ของอิเล็กตรอนก่อนเปลี่ยนสถานะ
 k_2 = เป็น wave number ของอิเล็กตรอนหลังเปลี่ยนสถานะ
 E_f = เป็น พลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนก่อนเปลี่ยนสถานะ
 E_i = เป็น พลังงานของอิเล็กตรอนหลังเปลี่ยนสถานะ

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

แต่สำหรับผลึกซิลิคอนแล้ว กลับมีโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นแบบ Indirect and gap ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงแผนภาพโครงสร้างของแถบพลังงานแบบ indirect band gap

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะเห็นได้ว่าระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ กับระดับพลังงานต่ำสุดของแถบความนำไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่ง wave number เดียวกัน ทำให้ในการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบความนำได้นั้น จะต้องอาศัยการรับหรือคายพลังงานโฟนอน (E_p) ให้กับอะตอมในโครงผลึก ซึ่งการรับหรือคายพลังงานของโฟนอนนี้จะช่วยให้เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน และกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม คือ

$$k_2 = k_1 \pm k_p \quad : \text{กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม} \quad (3.5)$$

$$E_f - E_i = h\nu \pm E_p \quad : \text{กฎการอนุรักษ์พลังงาน} \quad (3.6)$$

โดยที่

E_p เป็นพลังงานของโฟนอน

k_p เป็น wave number ของโฟนอน

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

จากที่ได้กล่าวจะเห็นได้ว่าผลึกซิลิคอนหรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีโครงสร้างของแถบพลังงานในลักษณะนี้ เมื่ออิเล็กตรอนมีการดูดหรือคายพลังงาน จะมีการสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งไปเพื่อทำให้เกิดการสั่นของอะตอมในโครงผลึก (โฟนอน) ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้ผลึกซิลิคอนจึงมีคุณสมบัติทางแสงที่ไม่เหมาะสมสำหรับที่จะนำไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์แสง

3.6.3 พฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิลิคอน

กลไกในการเปล่งแสงแบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอน

จากลักษณะโครงสร้าง และส่วนประกอบของพอร์สซิลิคอน หลากๆกลุ่มวิจัยทั่วโลกเชื่อว่าคุณสมบัติของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอนนี้น่าจะเกิดขึ้นมาจากสาเหตุสำคัญ 2 ประการร่วมกัน คือ

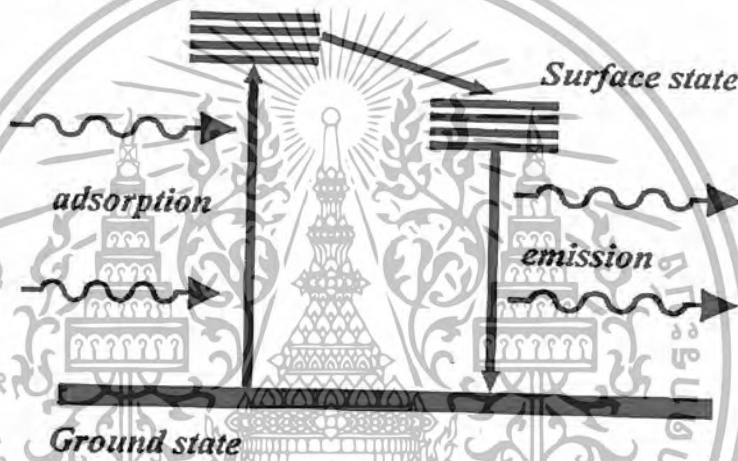
1. การเกิดปรากฏการณ์ quantum size effect หรือ quantum confinement effect ขึ้น ภายในชั้นของนาโนพอร์สซิลิคอน ทำให้ขนาดช่องว่างของแถบพลังงานของนาโนพอร์ส

ซิลิคอนมีความกว้างมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของช่องว่างแถบพลังงานเดิมของผลึกซิลิคอน

2. การเกิดระดับพลังงานที่ผิว (surface state) ของนาโนพอร์สซิลิคอน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีพันธะของไฮโดรเจน และอะตอมของธาตุอื่นๆ ที่อยู่ที่ผิวของนาโนพอร์สซิลิคอนนั่นเอง

จากสาเหตุทั้ง 2 ประการนี้เอง ทำให้เราสามารถทำการอธิบายคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอนได้ โดยอาศัยแบบจำลองสถานะของระดับพลังงาน 3 ระดับ (three level luminescent state model) ดังแสดงในรูปที่ 3.11

Quantum confinement state



รูปที่ 3.11 แบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้ง 3 ระดับภายในพอร์สซิลิคอน

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีสถานะของระดับพลังงานกระตุ้น (excited state) อยู่ถึงสองระดับด้วยกัน โดยสถานะแรกนั้นจะเป็นสถานะของระดับพลังงานภายในนาโนพอร์สซิลิคอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของ quantum confinement effect หรือ quantum effect ส่วนสถานะที่สองจะเป็นสถานะของระดับพลังงานที่ผิวของนาโนพอร์สซิลิคอน จากแบบจำลองนี้เมื่ออิเล็กตรอนภายในนาโนพอร์สซิลิคอน ได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสง จนมีพลังงานเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในสถานะ quantum confinement state ได้ แต่เนื่องจากผลของการที่ช่องว่างพลังงานของระดับพลังงานที่ผิวมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างพลังงานในนาโนพอร์สซิลิคอนนี้เอง จึงทำให้อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียรเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงสถานะย้ายลงมาสู่สถานะของระดับพลังงานที่ผิวก่อนที่จะเกิดการรวมตัวใหม่ (recombination) กับโฮลที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state) โดยในการรวมตัวใหม่นี้เองอิเล็กตรอนจะมีการคายพลังงานออกมา ซึ่งจะอยู่ในรูปของโฟตอนหรือแสงนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 คุณสมบัติของพอร์สซีลิกอนที่เหมาะสมในการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์

พอร์สซีลิกอนมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลากหลายอย่าง ตัวอย่างเช่น

คุณสมบัติทางกายภาพของพอร์สซีลิกอน

พอร์สซีลิกอนมีลักษณะที่แข็ง เปราะ มีรูพรุนมากมาย มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของพอร์สซีลิกอน

พอร์สซีลิกอนมีช่องว่างพลังงานกว้างกว่าซิลิกอนทำให้มีความต้านทานมากกว่าซิลิกอน สามารถสร้างเป็นสารDielectric พอร์สซีลิกอนมีค่าดัชนีการหักเหที่ต่ำกว่าซิลิกอน พอร์สซีลิกอนสามารถเปล่งแสงได้จากการให้พลังงานไฟฟ้า (Electroluminescence) หรือแสง (Photoluminescence)

จุดที่น่าสนใจอย่างมากสำหรับพอร์สซีลิกอนก็คือคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้สามารถควบคุมได้จากลักษณะ โครงสร้างของพอร์สซีลิกอนซึ่งก็ขึ้นอยู่กับกระบวนการสร้างนั่นเอง และเนื่องจากคุณสมบัติที่หลากหลายของพอร์สซีลิกอนนี้เองทำให้พอร์สซีลิกอนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆอย่างแพร่หลาย ดังที่จะกล่าวในบทต่อไป



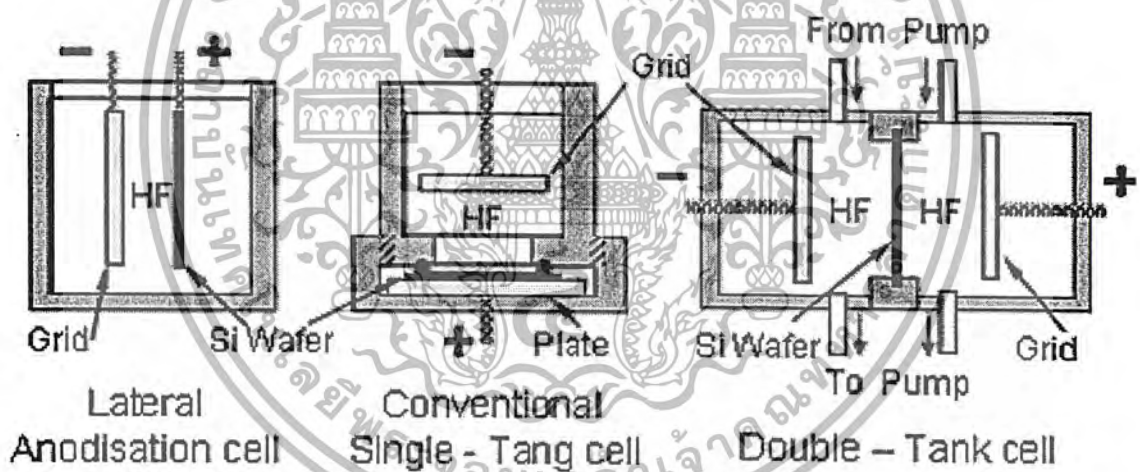
บทที่ 4

กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอน

ในกระบวนการสร้างเพื่อให้ได้มาซึ่งผลึกซิลิคอนที่มีขนาดของโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตร (nanocrystallites) นั้นมีอยู่หลายวิธีการด้วยกัน โดยในหัวข้อนี้จะได้พิจารณาถึงเทคนิคและวิธีการสร้างผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรแบบต่าง ๆ

4.1 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี

พอร์สซิลิคอนนั้นเป็นวัสดุที่สามารถสร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิคอนได้โดยตรง โดยอาศัยกระบวนการกัดทางไฟฟ้าเคมี ที่เรียกว่า Anodisation ซึ่งจะต้องใช้อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงภาคตัดขวางของอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการ Anodisation

อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนนี้ จะประกอบด้วย แผ่นผลึกซิลิคอนอยู่ที่ขั้วคาโทด ส่วนขั้วแอโนดจะใช้ทองเป็นขั้ว โดยวัสดุทั้งสองจะถูกจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งในที่นี้ ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกนั่นเอง

4.1.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

การกักคร่อนของสสารใด ๆ สามารถนิยามได้ว่าเป็นความเสื่อมโทรมของสสาร เนื่องจากการทำปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไปจะเป็นการเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และมักจะเริ่มจากผิวนอกของสสารนั้นเสมอ โดยขบวนการทางไฟฟ้าเคมีเป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่มีการถ่ายเทของอิเล็กตรอนเกิดขึ้นภายในระบบ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) เป็นปฏิกิริยาที่อะตอมของสสารมีการสูญเสียอิเล็กตรอนเกิดขึ้น ดังตัวอย่างเช่น สาร M มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ n คือ มีอิเล็กตรอน n อนุภาคโคจรอยู่ในวงนอกสุดของอะตอม สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดังนี้ คือ



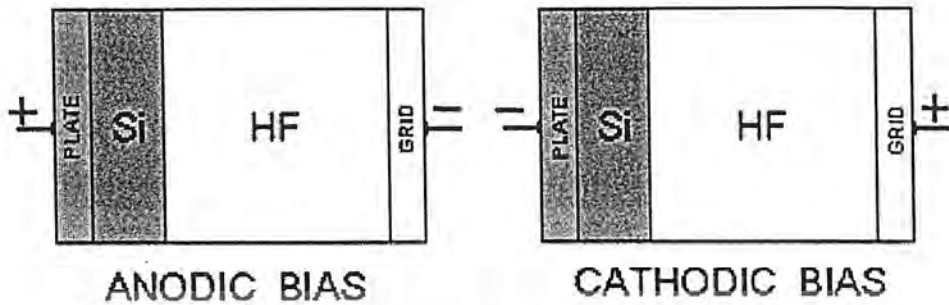
โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แอโนด (anode) ดังนั้น ปฏิกิริยาออกซิเดชันจึงอาจเรียกเป็นปฏิกิริยาแอโนดิก (anodic reaction) ได้

2. ปฏิกิริยารีดักชัน (reduction reaction) เป็นปฏิกิริยาที่อิเล็กตรอนที่เกิดจากแต่ละอะตอมของสารชนิดหนึ่งถูกถ่ายเทและเข้าร่วมเป็นส่วนหนึ่งของสารอีกชนิดหนึ่ง ดังตัวอย่างเช่น ไอออนของโลหะในสารละลายปฏิกิริยารีดักชันสามารถเกิดขึ้นได้ดังนี้ คือ



โดยบริเวณที่ซึ่งปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นจะถูกเรียกว่า แคโทด (cathode) ดังนั้น ปฏิกิริยารีดักชันจึงอาจเรียกเป็นปฏิกิริยาแคโทดิก (cathodic reaction) ได้

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาทั้งระบบแล้ว ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นจะต้องประกอบด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างละหนึ่งปฏิกิริยาเป็นอย่างน้อย ดังเช่นในระบบของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ประกอบด้วยสาร 2 ชนิด ที่ต่อกันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยสารอันหนึ่งจะเป็นแอโนดหรือสารที่ถูกกัด ส่วนสารอีกชนิดหนึ่งจะเป็นแคโทด



รูปที่ 4.2 ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะต่างๆ

พิจารณาเซลล์ไฟฟ้าในรูปที่ 4.2 ทางด้านซ้ายจะเป็นขั้วไฟฟ้าของผลึกซิลิคอน (Si) ซึ่งจะถูกรวมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยในที่นี้ ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ส่วนทางด้านขวาจะเป็นขั้วไฟฟ้าของทอง (Au) ซึ่งเป็นขั้วอิเล็กโทรดที่ถูกรวมอยู่ในสารละลายกรดเช่นกันจากรูปจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมี มีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

1. การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอโนดิก (Anodic bias)

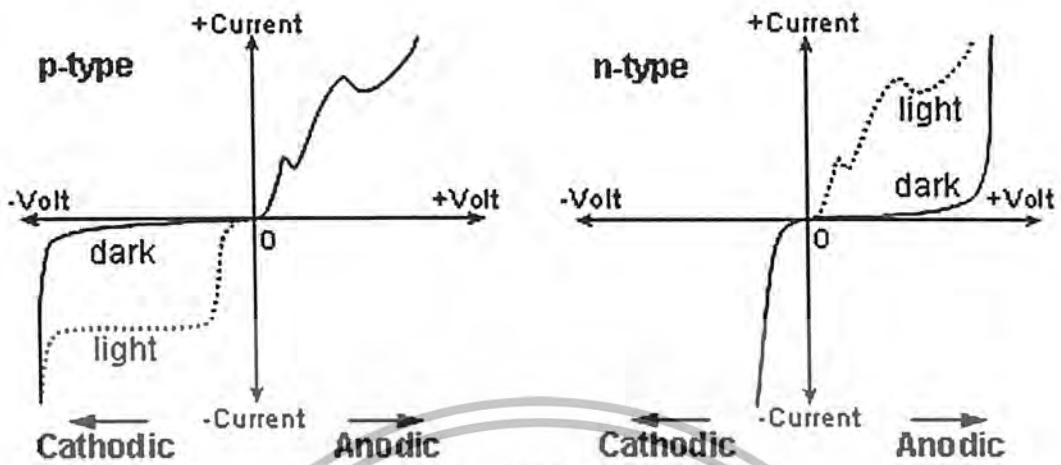
เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของผลึกซิลิคอนจะอยู่ทางขั้วบวก ส่วนขั้วไฟฟ้าของทองจะอยู่ทางขั้วลบ การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ผลึกซิลิคอนจะเป็นขั้วแอโนด มีผลทำให้ผลึกซิลิคอนสามารถถูกกัดได้

2. การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแคโทดิก (Cathodic bias)

เป็นการไบอัสในลักษณะที่ขั้วไฟฟ้าของผลึกซิลิคอนจะอยู่ทางขั้วลบ ส่วนขั้วไฟฟ้าของทองจะอยู่ทางขั้วบวก การไบอัสในลักษณะเช่นนี้ผลึกซิลิคอนจะเป็นขั้วแคโทด ทำให้ไม่เกิดการกัดผลึกซิลิคอนขึ้น

4.1.2 ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้สำหรับสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนมีลักษณะและพฤติกรรมเป็นแบบชอตต์กีไดโอด (Schottky diode) ที่เกิดขึ้นจากการสัมผัส (interface) กันระหว่างวัสดุสองชนิด คือ ผลึกซิลิคอนกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งในที่นี้ ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ระหว่างผลึกซิลิคอนชนิดพีและเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ที่ภายใต้เงื่อนไขในการถูกฉายแสงและไม่ถูกฉายแสง ว่ามีลักษณะความสัมพันธ์แตกต่างกันอย่างไร



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างผลึกซิลิคอน
(ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

จากรูปที่ 4.3 จะแสดงลักษณะกระแสแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีระหว่างผลึกซิลิคอนชนิดพีและเอ็นในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยจะเห็นได้ว่ามีลักษณะในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีอยู่สองลักษณะด้วยกัน คือ การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ Anodic bias และแบบ Cathodic bias สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ Anodic bias ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการไบอัสแบบไปหน้า (forward bias) ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบ Cathodic bias ลักษณะของกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะเหมือนกับการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) โดยจะมีกระแสรั่วซึ่งเกิดขึ้นจากผลของพาหะส่วนน้อยภายในผลึกซิลิคอนชนิดพี และจากผลของการฉายแสง (Photocurrents) เช่นเดียวกันกับไดโอดทั่วไป ส่วนในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับผลึกซิลิคอนชนิดพี โดยการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ Anodic bias สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ Cathodic bias ลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีลักษณะเดียวกันกับการไบอัสแบบไปหน้า (forward bias) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ข)

จากลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแส และแรงดันไฟฟ้าทั้งสองแบบที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้ถูกทำให้การสรุปลักษณะที่สำคัญๆ เอาไว้ในตารางที่ 4.1

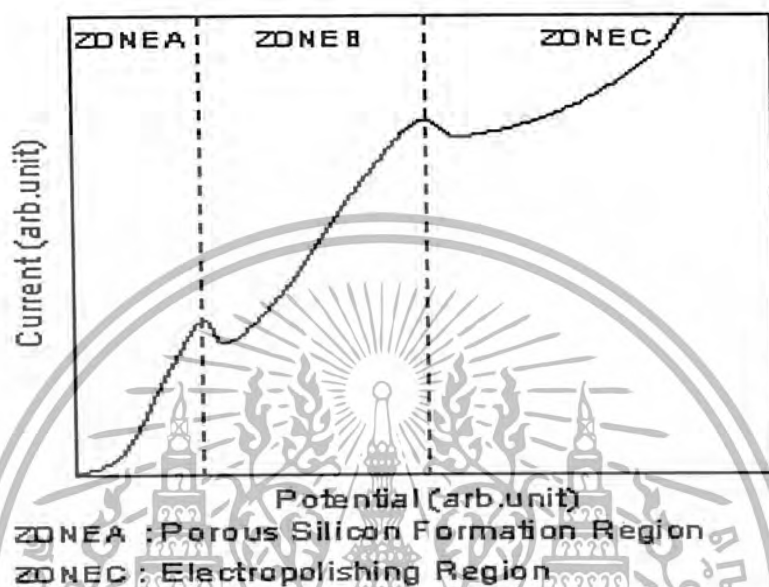
ตารางที่ 4.1 สรุปลักษณะสำคัญๆที่เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะการไบอัส
เซลล์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

ชนิดของผลึก ซิลิคอน	ลักษณะการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมี	
	แบบ Cathodic bias	แบบ Anodic bias
ชนิดพี	<ul style="list-style-type: none"> เนื้อของผลึกซิลิคอนจะไม่ถูกกัด ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Reverse-biased Schottky 	<ul style="list-style-type: none"> เนื้อของผลึกซิลิคอนถูกกัด โดย จะเกิดโครงสร้างของพอร์ตซิลิคอนที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ จะเกิดการขีดผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Forward-biased Schottky
ชนิดเอ็น	<ul style="list-style-type: none"> เนื้อของผลึกซิลิคอนจะไม่ถูกกัด ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Reverse-biased Schottky 	<ul style="list-style-type: none"> เนื้อของผลึกซิลิคอนถูกกัดก็ต่อเมื่อทำการฉายแสง โดย จะเกิดโครงสร้างของพอร์ตซิลิคอนที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำๆ จะเกิดการขีดผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่ศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงๆ ลักษณะการไบอัสเป็นแบบ Reverse-biased Schottky

จะเห็นได้ว่าการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั้งสองลักษณะมีพฤติกรรมเป็น rectifying เหมือนกัน โดยในการเกิดของพอร์ตซิลิคอนจะเกิดขึ้นเฉพาะเงื่อนไขในการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบ anodic bias เท่านั้น ส่วนการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ Cathodic bias จะไม่เกิดพอร์ตซิลิคอนขึ้นไม่ว่าชนิดของผลึกซิลิคอนจะเป็นชนิดพีหรือชนิดเอ็นก็ตาม โดยส่วนของผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ anodic bias นั้นเป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) ดังนั้น ในระหว่างการ anodic bias จึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงลงบนผิวด้านหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นด้วย ทั้งนี้ก็เพื่อทำให้เกิดพาหะส่วนน้อย (โฮล) ขึ้นภายในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น โดยโฮลจะเป็นตัวการที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการพิจารณาลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมีเฉพาะในส่วนที่มีการไบอัสแบบ Anodic bias ของทั้งผลิตภัณฑ์คอนเดนเซอร์ และชนิดอื่น (ที่ได้ทำการฉายแสงขณะไบอัส) พบว่า มีลักษณะความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าเคมี
ในส่วนที่มีการไบอัสแบบ Anodic bias

จากรูปข้างต้นลักษณะความสัมพันธ์ดังกล่าวจะประกอบไปด้วยขดกราฟอยู่ 2 จุดด้วยกัน โดยขดกราฟทั้งสองจุดนี้จะเป็นตัวชี้และแบ่งแยกบริเวณที่มีลักษณะการกัดเนื้อของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณ A B และ C ตามลำดับ โดยในบริเวณ A (Porous Silicon Forming Regions) จะเป็นบริเวณที่เนื้อของผลิตภัณฑ์จะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็ก ๆ ซึ่งจะมีผลทำให้เกิด โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนขึ้นมาที่ต่อเมื่อค่ากระแส (I) ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะต้องมีค่าน้อยกว่าค่าของกระแสสูงสุดที่ขดกราฟแรก (Ips) ส่วนในบริเวณ B (Transition Regions) ที่อยู่ถัดมาจะเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกัดเนื้อของซิลิคอน จากลักษณะการกัดที่ทำให้เกิด โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนไปสู่ลักษณะการกัดแบบขัดผิวหน้า ซึ่งอยู่ในบริเวณ C (Electropolishing Regions) โดยโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เกิดขึ้นในบริเวณ B นี้จะมีลักษณะเป็นรูพรุนเช่นเดียวกับพอร์สซิลิคอนที่เกิดขึ้นในบริเวณแรก แต่จะมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนเช่นเดียวกับพอร์สซิลิคอนที่เกิดขึ้นในบริเวณแรก แต่จะมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนที่ใหญ่กว่าและสามารถเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เมื่อความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนเข้าสู่การกัดในลักษณะแบบขัดผิวหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Electropolishing) ณ ตำแหน่งที่ค่าของกระแสมีค่าสูงสุดที่ขอดกราฟที่สอง และเมื่อพิจารณาจากขอดกราฟทั้งสองจุดในรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มค่าความต่างศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าเคมีให้มีค่ามากขึ้นจนกระแสภายในเซลล์ไฟฟ้ามีค่าสูงสุดแล้ว หลังจากนั้นกระแสก็จะเริ่มมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดปรากฏการณ์ Negative Impedance ขึ้นโดย

ในส่วนของขอดกราฟแรก

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี จะเป็นผลมาจากการเกิดปรากฏการณ์ Quantum Size Effect ขึ้นภายในโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอน มีผลทำให้ช่องว่างพลังงานภายในมีความกว้างมากขึ้นกว่าเดิมได้ จนกระทั่งทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างส่วนนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในของชั้นพอร์ซซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งนำไปสู่การที่กระแสมีค่าลดลง

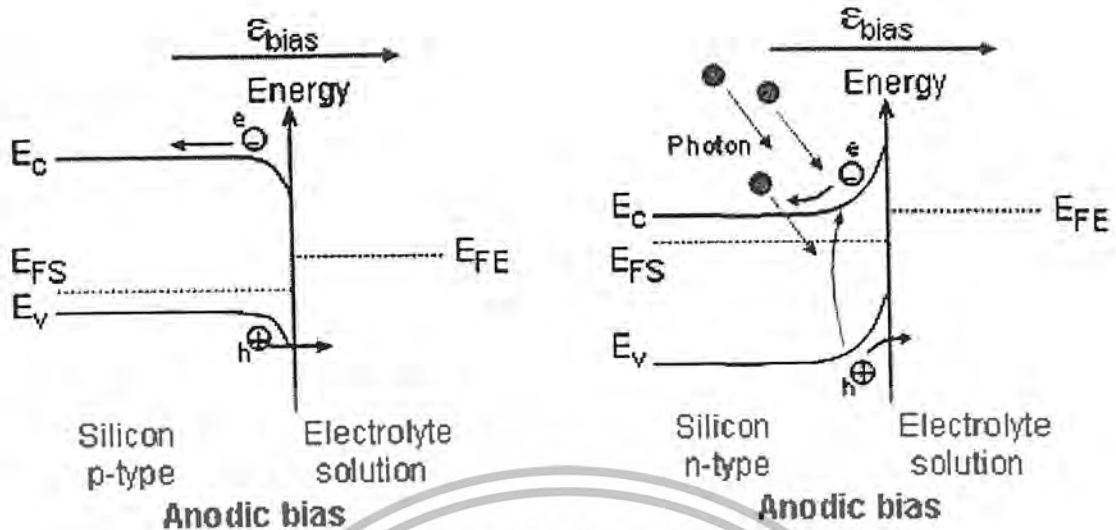
สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น จะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นรอบๆ โครงสร้างของพอร์ซซิลิคอน และเมื่อโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนมีขนาดเล็กลงไปเรื่อย ๆ จนบริเวณปลอดพาหะนำกระแสสามารถครอบคลุมโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนได้ทั้งหมด มีผลทำให้พาหะนำกระแสไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนั้นได้ ทำให้ค่าความต้านทานภายในชั้นพอร์ซซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้น

ในส่วนขอดกราฟที่สอง

ซึ่งอยู่ระหว่างบริเวณ Transition region กับ Electropolishing region การที่กระแสมีค่าลดลง เป็นผลมาจากการเกิดออกไซด์ชั้นที่บริเวณผิวของพอร์ซซิลิคอน ในระหว่างกระบวนการกัดนั่นเอง

4.1.3 ลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนกับสารละลายไฮโดรฟลูออริก

จากที่ได้กล่าวมาในหัวข้อข้างต้น เป็นที่ทราบกันแล้วว่าที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี จะมีลักษณะเป็นแบบ Schottky interface โดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะแถบพลังงานที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอน

(ก) ชนิดพี และ (ข) ชนิดเอ็น กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

จากภาพข้างต้นจะเห็นได้ว่าการโค้งงอของแถบพลังงานเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดย

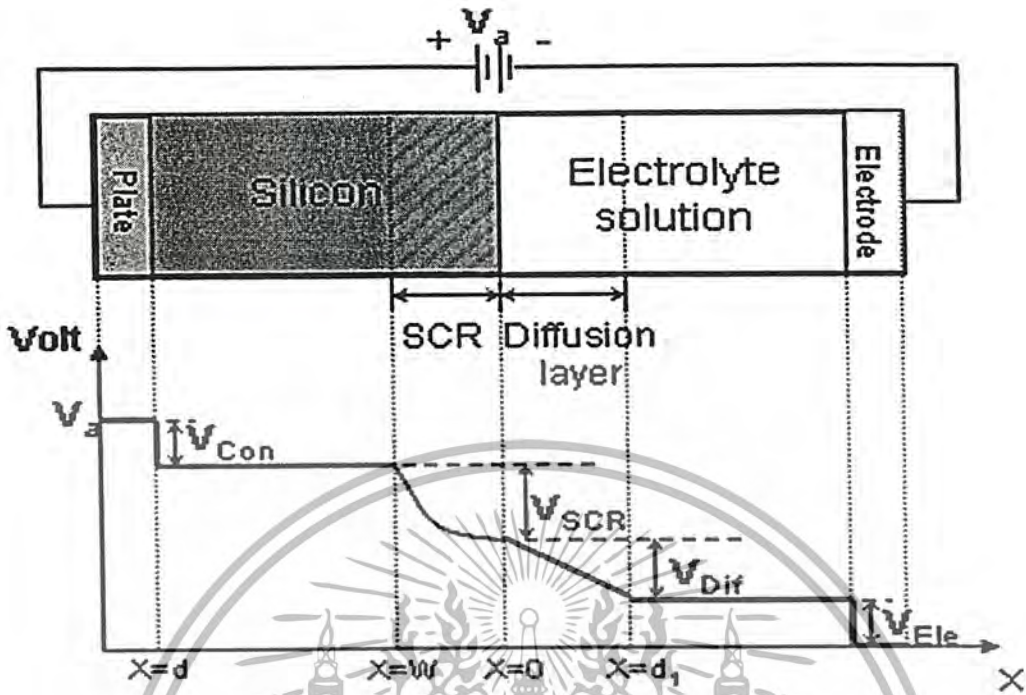
ในสารซิลิคอนชนิดพี การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอลง ซึ่งภายใต้การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ Anodic bias กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านผิวสัมผัสได้ เนื่องจากการไบอัสแบบไปหน้า ทำให้เกิดกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนอย่างต่อเนื่องขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก)

ในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น การโค้งงอของแถบพลังงาน ณ บริเวณผิวสัมผัสจะมีลักษณะโค้งงอขึ้น โดยการโค้งงอจะมีค่ามากขึ้นกว่าเดิมเมื่อผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นอยู่ภายใต้การไบอัสแบบ Anodic bias ทำให้กระแสไฟฟ้าไม่สามารถไหลผ่านกำแพงศักย์ไปที่ผิวสัมผัสได้ ทำให้ไม่เกิดกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ดังนั้นในระหว่างการ Anodisation จึงจำเป็นที่จะต้องทำการฉายแสงให้แก่ผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ทั้งนี้ก็เพื่อเพิ่มจำนวนพาหะนำกระแสขึ้นภายในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น เพื่อให้เกิดกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข)

4.1.4 การกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า เซลล์ไฟฟ้าที่มีใช้ในกระบวนการกัดแบบ porous etching จะประกอบด้วยผลึกซิลิคอน ซึ่งถูกจุ่มอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก โดยมีการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะ anodic bias ซึ่งมีผลทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสต่างๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะมีศักดาไฟฟ้าแตกต่างกัน และมีการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังแสดงในรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงแผนภาพการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณต่าง ๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยที่ d เป็นความหนาของผลึกซิลิคอน, w เป็นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (Space Charge Region: SCR) ส่วน d_1 เป็นความกว้างของบริเวณ diffusion layer ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก

จากภาพจะเห็นได้ว่ามีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณต่าง ๆ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังนี้คือ
 ในเนื้อของผลึกซิลิคอน จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

1. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วโลหะกับผลึกซิลิคอน (V_{Con})
2. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (V_{SCR})

ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีศักดาไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณดังต่อไปนี้ คือ

3. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณขั้วสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโตรดกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (V_{Ele})
4. ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ Diffusion layer (V_{Dif})

ถ้าให้ V_a เป็นศักดาไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมี เราสามารถเขียนสมการศักดาไฟฟ้ารวมของระบบได้ดังนี้ คือ

$$V_a = V_d + V_{SCR} + V_{Con} + V_{Ele} \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักดาไฟฟ้า V_{con} กับ V_{clcc} ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีเงื่อนไขในการสร้างชั้นของพอร์สซิลิคอนแบบเดียวกันจะมีค่าคงที่เสมอ ดังนั้น จึงทำให้สมการที่ (2.5) สามารถเขียนได้เป็น

$$V_a = V_d + V_{SCR} + \text{Constant} \quad (4.4)$$

จากสมการที่ (4.4) จะเห็นได้ว่าศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ Diffusion layer (V_{Dif}) กับ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ Space Charge Region (V_{SCR}) จะเป็นตัวแปรที่สำคัญภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมพาหะและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดย

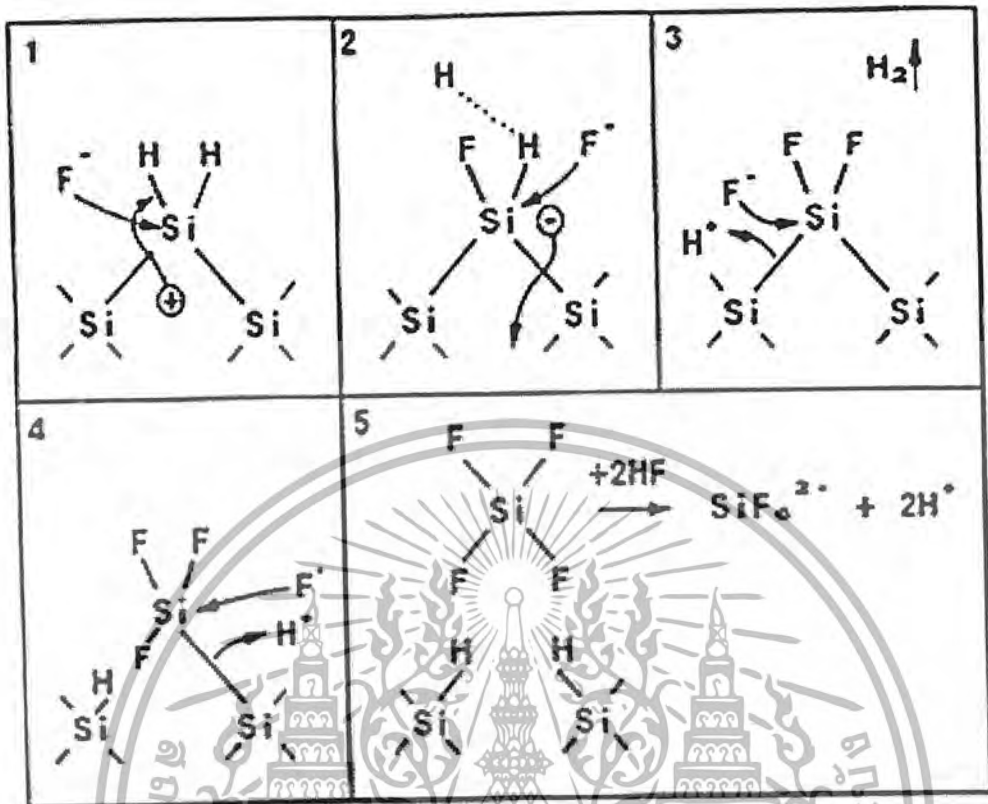
ในผลึกซิลิคอนชนิดพี เนื่องจากการไบอัสแบบไปหน้า (forward bias) ทำให้ไม่เกิดบริเวณ Space Charge Region ขึ้นในผลึกซิลิคอน ดังนั้น ศักดาไฟฟ้าหลักที่ตกคร่อมอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมี ก็คือ ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณ Diffusion layer (V_{Dif}) นั่นเอง โดย V_{Dif} นี้จะควบคุมอัตราของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกตรงบริเวณ diffusion layer

ในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น เนื่องจากการไบอัสแบบย้อนกลับ (reverse bias) ทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นเกิดบริเวณ Space charge region (SCR) ขึ้น และเกิดศักดาไฟฟ้า (V_{SCR}) ตกคร่อมบริเวณนี้ โดย Space Charge Region นี้จะเป็นตัวควบคุมพาหะนำกระแสภายในผลึกซิลิคอน ซึ่งจะมีผลต่อปฏิกิริยาเคมีในการกัดและโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้น

4.1.5 กลไกการเกิดพอร์สซิลิคอน

ก. ปฏิกิริยาเคมีในการกัดที่ผิวของผลึกซิลิคอน

ในสภาวะปกติ เมื่อทำการจุ่มผลึกซิลิคอนลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนจะไม่ถูกสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกกัด แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ผลึกซิลิคอนถูกนำมาอยู่ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีการไบอัสแบบ Anodic bias ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะถูกกัดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ เกิดเป็นชั้นของพอร์สซิลิคอนขึ้นมา โดยปฏิกิริยาเคมี และขั้นตอนในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 4.7

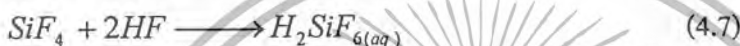
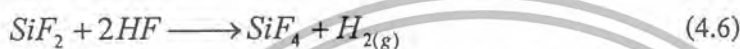
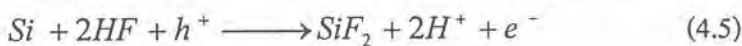


รูปที่ 4.7 ขั้นตอน และกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน

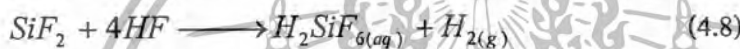
เริ่มต้นจากขั้นตอนแรกเมื่อยังไม่มีกระแสไบอัสแบบ anodic bias ซึ่งเป็นกระบวนการในการป้อนศักย์ไฟฟ้าชั่วคราวให้กับซิลิคอน (Si) ที่บริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิคอนจะมีอะตอมของไฮโดรเจนปกคลุมอยู่เต็ม มีผลทำให้ไอออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไม่สามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมได้ (Si - H) แต่เมื่อให้กระแสตามที่มีการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าแบบ anodic bias โดยมีการป้อนศักย์ไฟฟ้าชั่วคราวให้แก่ซิลิคอน (Si) จนพาหะโฮลสามารถเคลื่อนที่มาถึงบริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก จะมีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่ผิวสามารถถูกทำลายได้ โคนไอออนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดเกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีน (Si - F) ขึ้นมาแทนดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 1 และเนื่องจากอิทธิพลในการ polarizing ของพันธะฟลูออรีนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรก ส่งผลทำให้ไอออนของฟลูออรีน (F⁻) อีกตัวที่อยู่ในสารละลายกรดสามารถที่จะเข้าทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอม (Si - H) ที่ยังคงเหลืออยู่อีกข้างหนึ่งได้ พร้อมกับเกิดโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน (H₂) และมีการปล่อยพาหะอิเล็กตรอน 1 ตัวไปยังซิลิคอน ดังแสดงในขั้นตอนที่ 2 และ 3 ต่อจากนั้นก็เกิดการเหนี่ยวนำวาเลนซ์อิเล็กตรอน (polarization induced) โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลุ่มของพันธะเคมีซิลิคอนกับฟลูออรีน (Si - F groups) ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 และ 3 มีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับซิลิคอนที่อยู่ถัดเข้ามา มีความแข็งแรงลดลง ทำให้พันธะเคมีดังกล่าวสามารถที่จะถูกทำลายได้โดยอิออนของฟลูออรีน เกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีนขึ้นมาแทน ดังแสดงในขั้นตอนที่ 3 และ 4 จากขั้นตอนนี้เองจะเห็นได้ว่าอะตอมของซิลิคอนจะถูกดึงให้หลุดออกมาจากผิวหน้าของผลึกซิลิคอน พร้อมกับการเกิดพันธะเคมีระหว่างไฮโดรเจนกับซิลิคอน อะตอมที่อยู่ถัดเข้ามา ดังแสดงเอาไว้ในขั้นตอนที่ 5

ส่วนปฏิกิริยาเคมีในการกัดที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้คือ



จากสมการที่ 5.6 และสมการที่ 5.7 สามารถเขียนสมการปฏิกิริยาเคมีรวมใหม่ได้เป็น



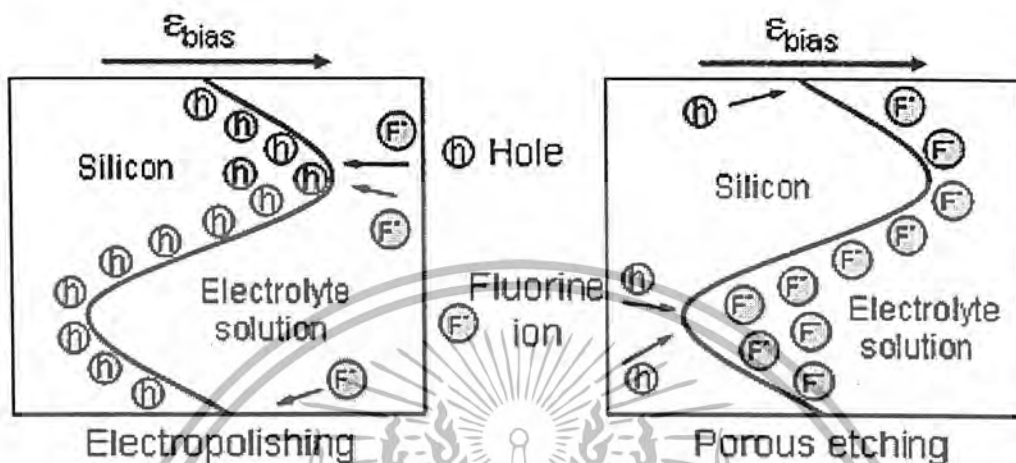
จากสมการปฏิกิริยาเคมีที่แสดงข้างต้น เริ่มต้นจากปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 4.5 ที่มีผลึกซิลิคอน (Si) เป็นสารเริ่มต้น อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดยในปฏิกิริยาเคมีนี้จำเป็นที่จะต้องอาศัยโฮลในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งจะทำให้เกิด SiF_2 ขึ้นที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอน ต่อจากนั้นก็เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง SiF_2 กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกดังแสดงในสมการที่ 4.6 ได้ผลิตภัณฑ์เป็น SiF_4 หลุดออกมาจากผิวของผลึกซิลิคอน ในระหว่างกระบวนการกัดขั้นนี้เอง สังเกตได้ว่าจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ขึ้นที่ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่ถูกกัด ท้ายสุดก็จะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง SiF_4 กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย คือ สารละลาย H_2SiF_6 อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกนั่นเอง ดังแสดงในสมการที่ 4.7

ข. การเกิดรูพรุนของพอร์ซิลิคอน

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ผลึกซิลิคอนเมื่ออยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) จะไม่ถูกสารละลายกรดกัดแต่อย่างใด แต่เมื่อไหร่ก็ตามที่ทำการป้อนกระแสไฟฟ้าในลักษณะแบบ anodic bias แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมี ให้กระแสไหลผ่านรอยสัมผัสระหว่างผลึกซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกจะมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดทางไฟฟ้าเคมีเกิดขึ้น โดยลักษณะการกัดทางไฟฟ้าเคมีจะมีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

- แบบ Elctroplishing
- แบบ Porous etching

ทั้งสองแบบมีลักษณะการกัดที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในระหว่างการ Anodization โดยประจุพาหะชนิดบวก (โฮล) จะมีตัวที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อกระบวนการการกัดทั้งสองลักษณะ



รูปที่ 4.8 แสดงแบบจำลองการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนทั้งสองลักษณะ โดยที่

- (ก) ลักษณะการกัดแบบ Electropolishing
(ข) ลักษณะการกัดแบบ Porous etching

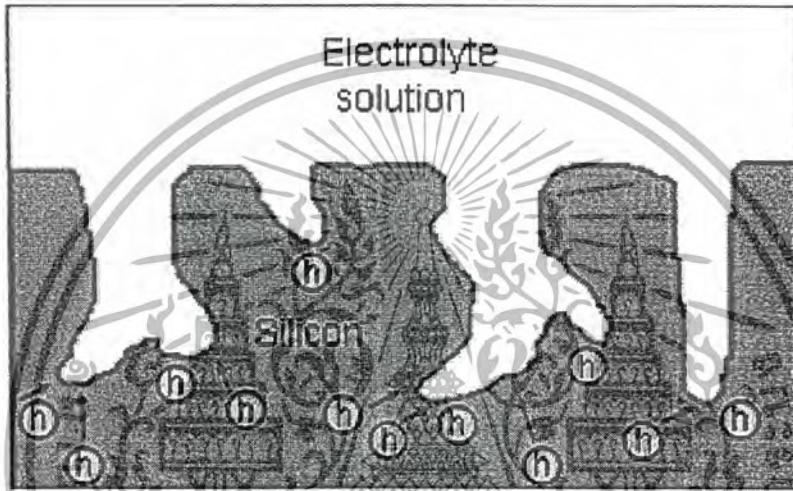
การกัดแบบ Electropolishing

การกัดในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำการป้อนความหนาแน่นกระแสให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมีในปริมาณสูง ๆ ซึ่งจะทำให้ที่บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอนมีปริมาณของพาหะโฮลสะสมอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้การกัดที่เกิดขึ้นจะถูกจำกัดโดยอ็อนของฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรด โดยอ็อนฟลูออรีนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า ดังนั้น ถ้าผิวของผลึกซิลิคอนมีส่วนที่ยื่นออกมา ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก) จะมีผลทำให้ที่บริเวณปลายสุดของส่วนที่ยื่นออกมามีปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งจะดึงเอาอ็อนของฟลูออรีนเข้ามาทำปฏิกิริยาเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนที่บริเวณปลายสุดที่ยื่นออกมาเป็นส่วนมาก มีผลทำให้ส่วนที่ยื่นออกมาถูกกัดจนเรียบ ดังนั้น จึงเรียกการกัดในลักษณะเช่นนี้ว่า การขัดผิวหน้าด้วยไฟฟ้า (Electropolishing) นั่นเอง

การกัดแบบ Porous etching

ส่วนลักษณะการกัดแบบ Porous etching จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อทำการป้อนความหนาแน่นกระแสในปริมาณต่ำ ๆ ซึ่งจะทำให้ปริมาณอ็อนของฟลูออรีนในสารละลายกรดมีจำนวนที่มากกว่า

จำนวนโฮล ที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน ทำให้การกักในลักษณะนี้จะถูกจำกัดโดยจำนวนโฮล ดังนั้น ถ้าผิวของผลึกซิลิคอนมีลักษณะเป็นหลุมหรือรอยซึ่งเกิดจากความไม่เรียบของพื้นผิวหรือจุดบกพร่องต่าง ๆ ในผลึกซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ข) เมื่อทำการไบอัสแบบ Anodic bias ให้แก่เซลล์ไฟฟ้าเคมีจะมีผลทำให้ที่บริเวณก้นหลุมหรือจุดบกพร่องเหล่านี้มีปริมาณความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าสูงกว่าที่บริเวณอื่น ๆ ซึ่งจะดึงเอาพาหะโฮลเข้ามายังจุด ๆ นี้กันมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในการกักเนื้อของผลึกซิลิคอนที่บริเวณก้นหลุมจนเกิดเป็นรูพรุนลึกลงไปเนื้อของผลึกซิลิคอน



รูปที่ 4.9 แสดงการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลที่ถูกดึงมารวมกันที่บริเวณก้นหลุม เนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้า

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น เป็นกลไกในการเกิดรูพรุนภายในผลึกซิลิคอนทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นอย่างง่าย ๆ ซึ่งถ้าจะพิจารณาโดยละเอียดแล้ว พบว่า ผลึกซิลิคอนทั้งสองชนิดจะมีกลไกในการเกิดโครงสร้างของพอร์ซิลิคอนที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะ Anodic bias

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี จะเป็นการไบอัสแบบไปหน้า (forward bias) ซึ่งการไบอัสในลักษณะเช่นนี้จะไปลดสนามไฟฟ้าภายในบริเวณที่ เรียกว่า Space Charge Region (SCR) ลง โดยบริเวณ Space Charge Region นี้เป็นบริเวณที่ปลอดภัยจากหาหะนำกระแส (โฮล) เกิดขึ้นตามผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน อันเป็นผลมาจากการสัมผัสกันระหว่างผิวหน้าของผลึกซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก มีผลทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านรอยสัมผัสระหว่างผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิคอนกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกได้ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอน เกิดเป็นรูพรุนได้อย่างต่อเนื่องตามที่ได้อธิบายมาข้างต้น

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะ Anodic bias จะเป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ (revers bias) ซึ่งจะมีผลทำให้บริเวณ Space Charge Region มีความกว้างเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิมในขณะที่ยังไม่ทำการไบอัส ดังนั้น ถ้าบริเวณผิวของผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นมีลักษณะเป็นหลุมซึ่งเกิดจากความไม่เรียบของพื้นผิว จะมีผลทำให้บริเวณผนังรอบ ๆ หลุมเหล่านั้นเกิดบริเวณ Space Charge Region ขึ้นรอบ ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6.10



รูปที่ 4.10 แสดงบริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ผนังของรูหรือหลุมที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอน

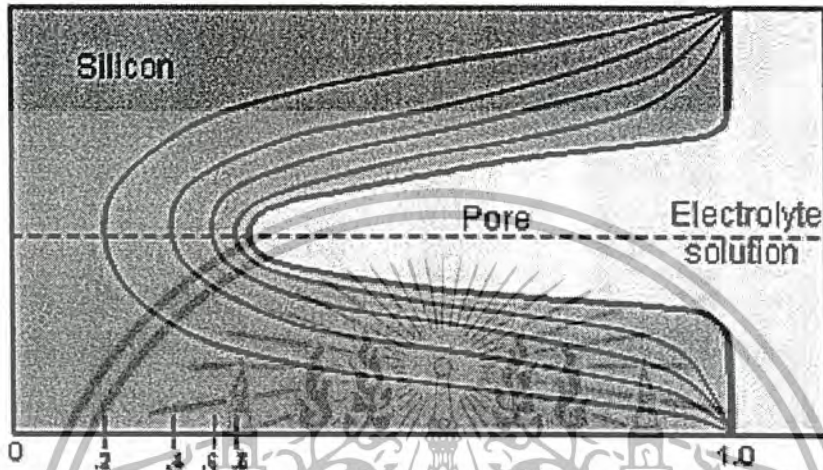
โดยความกว้างของบริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ

$$W = (2\epsilon_s \epsilon_0 V_{SCR} / qN_D)^{1/2} \quad (4.9)$$

โดยที่	W	=	ความกว้างของบริเวณ Space Charge Region
	ϵ_s	=	Permittivity ของผลึกซิลิคอน
	ϵ_0	=	Permittivity ของสุญญากาศ
	V_{SCR}	=	ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบริเวณ SCR
	q	=	ประจุของอิเล็กตรอน
	N_D	=	จำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าความกว้างของบริเวณ Space Charge Region จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ที่ตกคร่อมบริเวณ Space Charge Region (V_{SCR}) และจำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้ (N_D) ในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น



รูปที่ 4.11 แสดงการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้ารอบ ๆ ผนังของรูพรุน

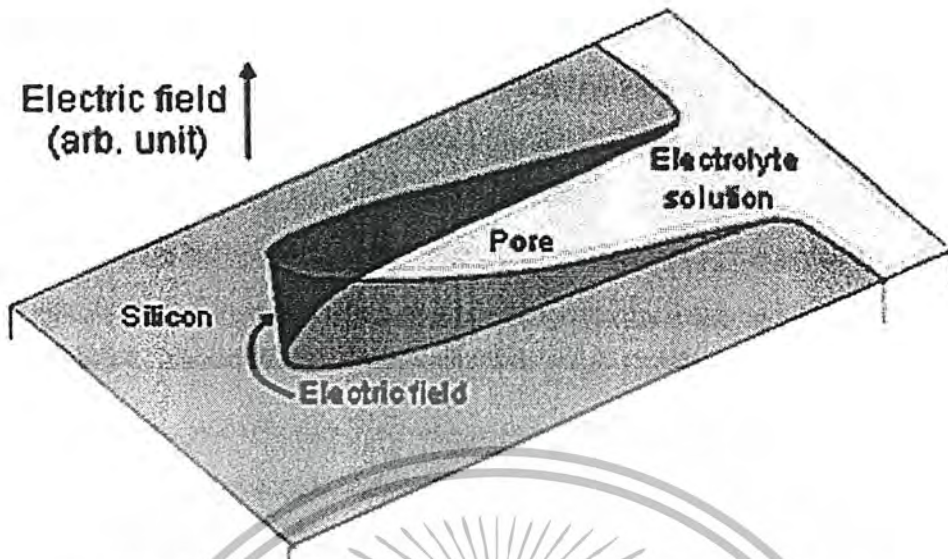
ซึ่งบริเวณ Space Charge Region ที่เกิดขึ้นรอบ ๆ รูพรุน จะมีการกระจายตัวของศักดาไฟฟ้าเป็นไปตามรูปที่ 5.11 โดยมีปริมาณของสนามไฟฟ้ารอบ ๆ ผนังของรูพรุน (E_s) มีค่าเท่ากับ

$$E_s = 2V_{SCR} / W \quad (4.10)$$

ส่วนสนามไฟฟ้าที่เกิดรอบ ๆ ก้นหลุมของรูพรุน (E'_s) จะมีค่า

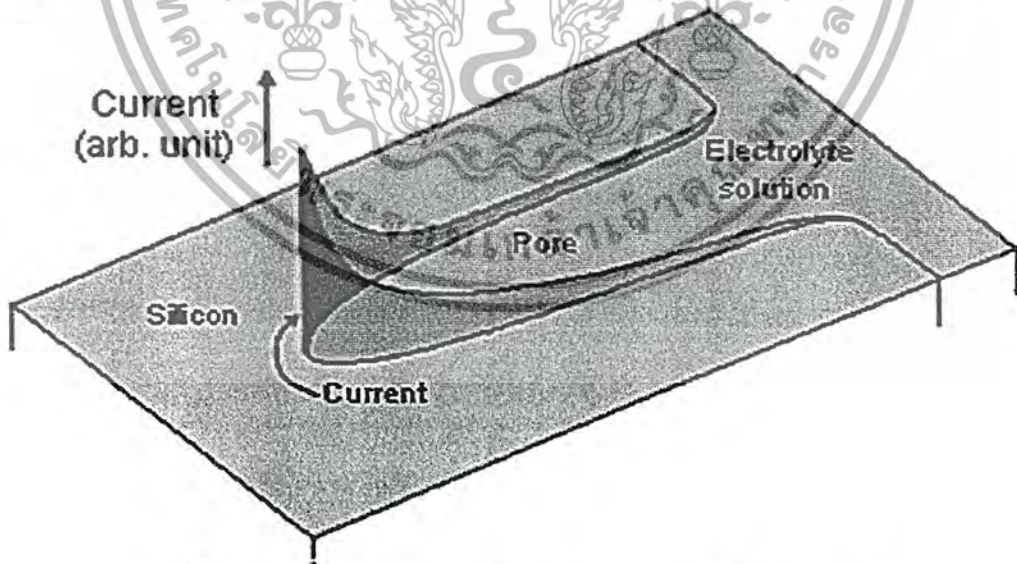
$$E'_s = V_{SCR} / r \quad (4.11)$$

โดยที่ r = รัศมีของก้นหลุมของรูพรุน



รูปที่ 4.12 แสดงการกระจายตัวของสนามไฟฟ้ารอบ ๆ ผนังของรูพรุน

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าขนาดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ผนังของรูพรุนจะมีขนาดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ผนังบริเวณก้นหลุมของรูพรุนจะมีปริมาณของสนามไฟฟ้าที่สูงกว่าบริเวณผนังรอบ ๆ ของรูพรุนอยู่ถึงประมาณ 2 – 3 เท่า ส่วนผนังบริเวณปากรูจะมีค่าต่ำสุดจนเกือบมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ซึ่งจากการที่ก้นหลุมของรูพรุนมีขนาดของสนามไฟฟ้าในปริมาณสูงนั้น มีผลทำให้สามารถดึงพาหะนำกระแส (โฮล) มาที่บริเวณนี้กัน ได้มาก ส่งผลทำให้ที่บริเวณก้นหลุมจะมีปริมาณกระแสที่สูงกว่าบริเวณอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงการกระจายตัวของกระแสรอบ ๆ ผนังของรูพรุน

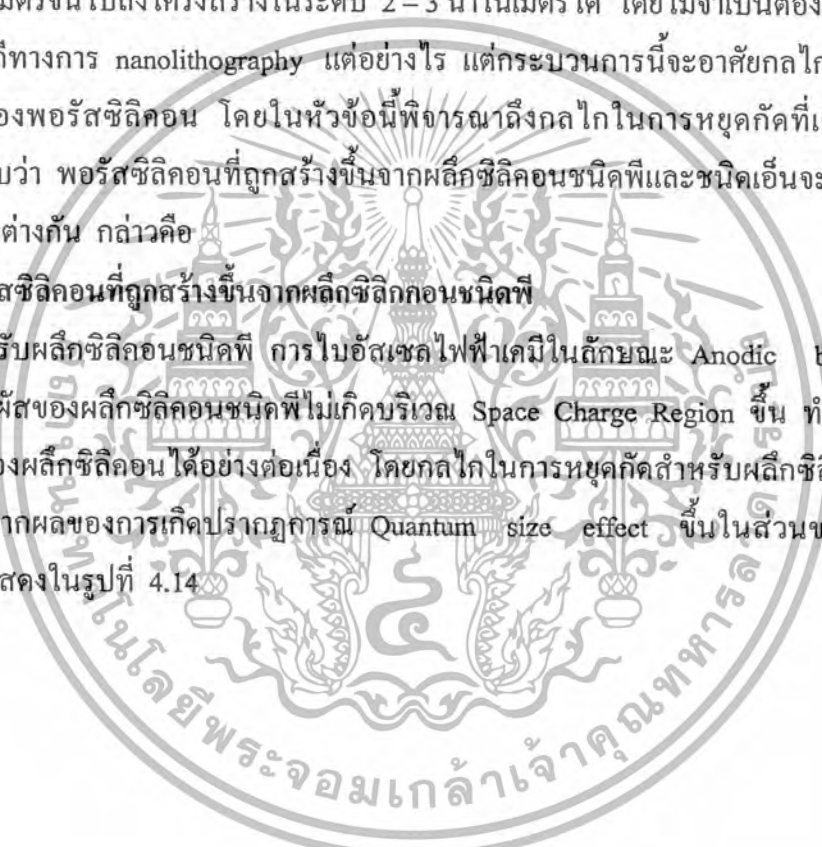
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

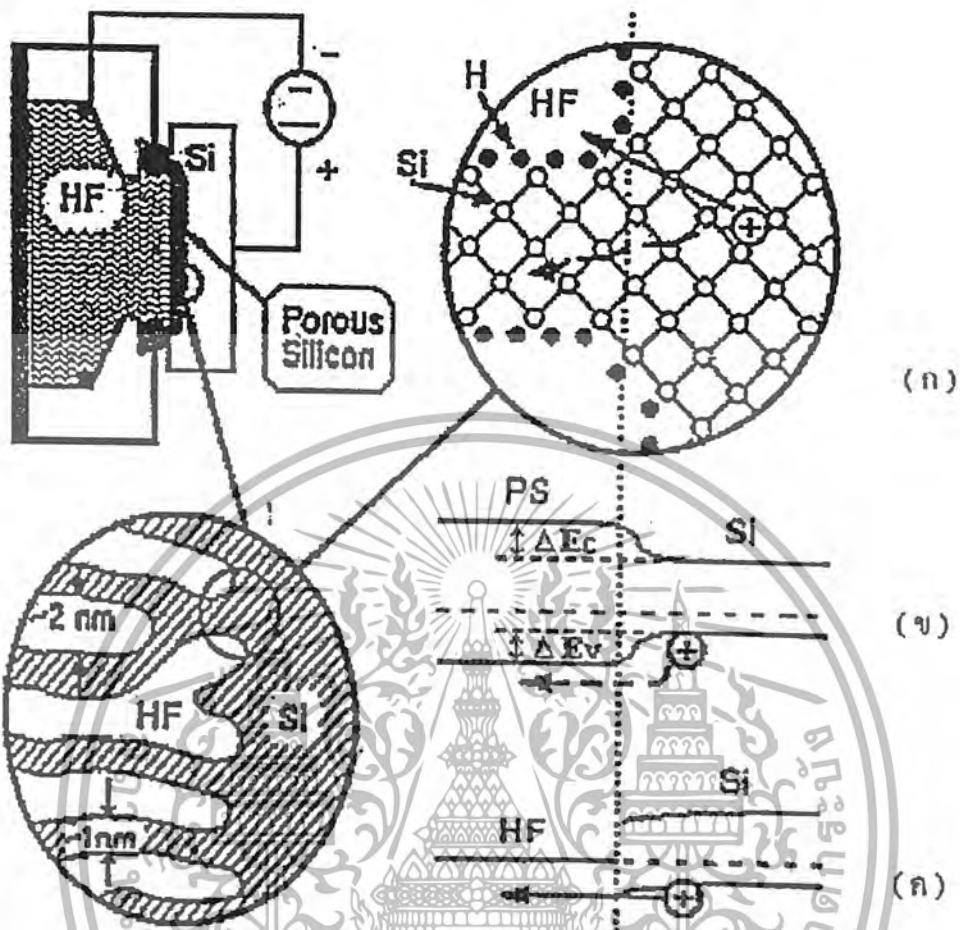
4.1.6 กลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้เราทราบถึงกลไกในการเกิดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนขึ้นมา โดยพาหะนำกระแสชนิดบวกหรือโฮลในผลึกซิลิคอนจะเป็นตัวการที่มีบทบาทและความสำคัญต่อกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนในแบบ porous etching หรือ anodic etching ด้วยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งเป็นกระบวนการกัดที่สามารถลดขนาดของโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนให้มีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนสามารถเข้าสู่ในระดับนาโนเมตรได้ด้วยกระบวนการ ที่เรียกว่า Self aligned process ซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถทำให้โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนมีขนาดตั้งแต่ในระดับไมโครเมตรจนถึงโครงสร้างในระดับ 2-3 นาโนเมตรได้ โดยไม่จำเป็นต้องอาศัย masking layer หรือวิธีทางการ nanolithography แต่อย่างไร แต่กระบวนการนี้จะอาศัยกลไกในการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน โดยในหัวข้อนี้พิจารณาถึงกลไกในการหยุดกัดที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการศึกษา พบว่า พอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอนชนิดพีและชนิดเอ็นจะมีกลไกในการหยุดกัดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ

พอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอนชนิดพี

สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพี การไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะ Anodic bias จะทำให้บริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอนชนิดพีไม่เกิดบริเวณ Space Charge Region ขึ้น ทำให้สามารถทำการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนได้อย่างต่อเนื่อง โดยกลไกในการหยุดกัดสำหรับผลึกซิลิคอนชนิดพีจะเกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเกิดปรากฏการณ์ Quantum size effect ขึ้นในส่วนของนาโนพอร์สซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 4.14





รูปที่ 4.14 แสดงกลไกในการหยุดกัด โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนชนิดพี โดยที่
 (ก) แสดงโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนและทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะโฮล
 (ข) แสดงลักษณะแถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลจากผลึกซิลิคอน
 ก่อนผ่านเข้าไปในโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน
 (ค) แสดงลักษณะแถบพลังงานและการเคลื่อนที่ของพาหะโฮลจากผลึกซิลิคอน
 ผ่านไปยังสารละลายกรด HF ที่บริเวณผิวสัมผัสที่ก้นหลุมของรูพรุน

จากรูปจะเห็นได้ว่า เนื้อของผลึกซิลิคอนชนิดพีจะถูกกัดจนเกิดเป็นโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนขึ้นมา และเมื่อทำการกัดอย่างต่อเนื่องจะทำให้โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนมีขนาดเล็กลงไปเรื่อยๆ จนมีขนาดเข้าสู่ในระดับนาโนเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ก) มีผลทำให้ช่องว่างพลังงานภายในพอร์สซิลิคอน (E_p) มีความกว้างมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลึกซิลิคอนเดิม ทั้งนี้เป็นผลมาจากปรากฏการณ์ quantum size effect นั่นเอง ทำให้เกิดความแตกต่างของระดับพลังงาน

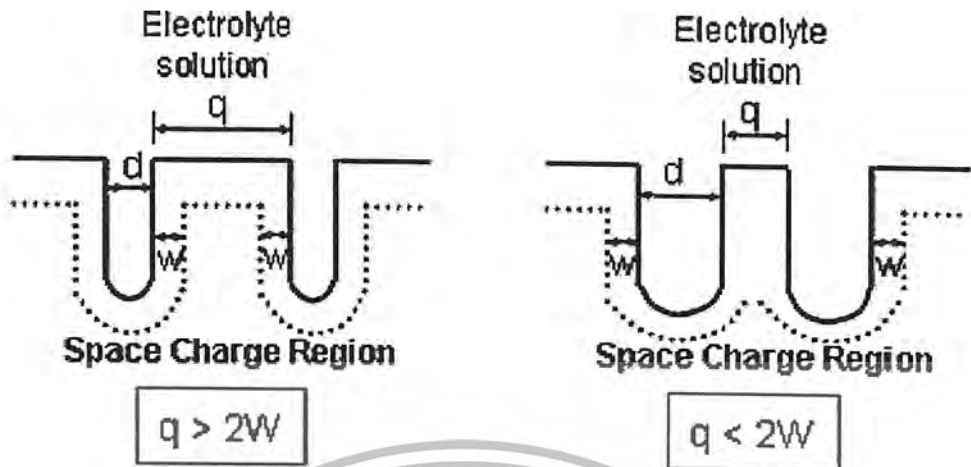
สูงสุดของแถบวาเลนที่ระหว่างพอร์สซิลิคอนกับผลึกซิลิคอนขึ้น โดยค่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นกำแพงศักย์ซึ่งมีค่าเท่ากับ ΔE_v สำหรับโฮล และเท่ากับ ΔE_c สำหรับอิเล็กตรอน ดังนั้น การที่พาหะโฮลในผลึกซิลิคอนชนิดพีจะสามารถผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการกัดโครงสร้างในส่วนนี้ต่อไปได้นั้น พาหะโฮลจำเป็นที่จะต้องได้รับพลังงานที่มีค่ามากกว่า ΔE_v ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ข) แต่ถ้าเมื่อไหร่ก็ตามที่กำแพงศักย์ ΔE_v มีค่ามากกว่าพลังงานภายนอกที่ให้กับโฮล จะมีผลทำให้พาหะโฮลในผลึกซิลิคอนไม่สามารถผ่านเข้าไปในส่วนของนาโนพอร์สซิลิคอนได้ ผลที่ตามมา ก็คือ เกิดการหยุดกัดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนในส่วนนี้ขึ้นทันที จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ΔE_v นั้น จะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของนาโนพอร์สซิลิคอน โดย ΔE_v จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของนาโนพอร์สซิลิคอนมีค่าลดลง อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าจะเกิดการหยุดกัดในส่วนของนาโนพอร์สซิลิคอน เนื่องจากพาหะโฮลไม่สามารถผ่านเข้าไปในบริเวณนาโนพอร์สซิลิคอนนี้ได้ แต่ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนยังคงดำเนินต่อไป โดยบริเวณที่จะถูกกัดอย่างต่อเนื่องจะเป็นบริเวณก้นหลุมของรูพรุน ทั้งนี้เนื่องจากพาหะโฮลในผลึกซิลิคอนชนิดพีสามารถผ่านผิวสัมผัสเข้าไปในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกที่บริเวณก้นหลุมของรูพรุนได้สะดวกกว่าที่จะผ่านเข้าไปในโครงสร้างของนาโนพอร์สซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ค) ดังนั้น จึงทำให้ที่บริเวณก้นหลุมของพอร์สซิลิคอนจะถูกกัดลึกเข้าไปในเนื้อของผลึกซิลิคอนอย่างต่อเนื่องได้

พอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น

เนื่องจากการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีในลักษณะ Anodic bias สำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นจะเป็นการไบอัสแบบย้อนกลับ มีผลทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นตามบริเวณผิวสัมผัสของผลึกซิลิคอน โดยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนำกระแสจะมีค่าเท่ากับ W ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้น ดังนั้น กลไกในการหยุดกัดของพอร์สซิลิคอนสำหรับผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นแล้ว จะเป็นผลมาจากการเกิดบริเวณปลอดพาหะนำกระแสขึ้นภายในโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงแผนภาพบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (SCR) ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของ พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น โดยที่
 (ก) โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดมากกว่า $2W$
 (ข) โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่มีขนาดน้อยกว่า $2W$

จากรูปที่ 4.15 (ก) จะเห็นได้ว่าพอร์สซิลิคอนที่สร้างขึ้นมาจากผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นเมื่อถูก ทำการกัดจะทำให้ขนาดของโครงสร้างพอร์สซิลิคอน (q) มีขนาดลดลงอย่างต่อเนื่อง เกิดเป็นรูพรุน ภายในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นขึ้น โดยมีบริเวณปลอดพาหะนำกระแส (SCR) ปกคลุมอยู่รอบ ๆ รูพรุน แต่ละรู ในกรณีนี้ขนาดของโครงสร้างพอร์สซิลิคอนยังมีขนาดที่มากกว่าสองเท่าของความกว้าง บริเวณปลอดพาหะนำกระแส ($q > 2W$) ดังนั้น จึงยังสามารถทำการกัดเพื่อลดขนาดของโครงสร้าง พอร์สซิลิคอนในส่วนนี้ต่อไปได้อีก จนเมื่อไหร่ก็ตามที่ขนาดของโครงสร้างพอร์สซิลิคอนมีขนาดที่ น้อยกว่าสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะนำกระแส ($q < 2W$) ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ข) ถูกครอบคลุมโดยบริเวณปลอดพาหะนำกระแสทั้งหมด ส่งผลทำให้เกิดการหยุดกัดของพอร์ส ซิลิคอนถูกครอบคลุมโดยบริเวณปลอดพาหะนำกระแสทั้งหมด ส่งผลทำให้เกิดการหยุดกัดของ พอร์สซิลิคอนในส่วนนี้ขึ้น

4.1.7 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของพอร์สที่สร้างด้วยวิธี Anodication

กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอนจากวิธีการกัดด้วยไฟฟ้าเคมีนั้นมีปัจจัยหลายประการที่มีผล ต่อโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน ซึ่งพอร์สซิลิคอนที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกันย่อมมีคุณสมบัติที่แตก ต่างกันด้วย อาทิ พอร์สซิลิคอนที่มีค่าความพรุนมาก ๆ จะมีขนาดโครงสร้างแท่งซิลิคอนที่เล็กลงเป็น ผลให้ช่องว่างพลังงานที่บริเวณชั้นพอร์สซิลิคอนกว้างมากขึ้น เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

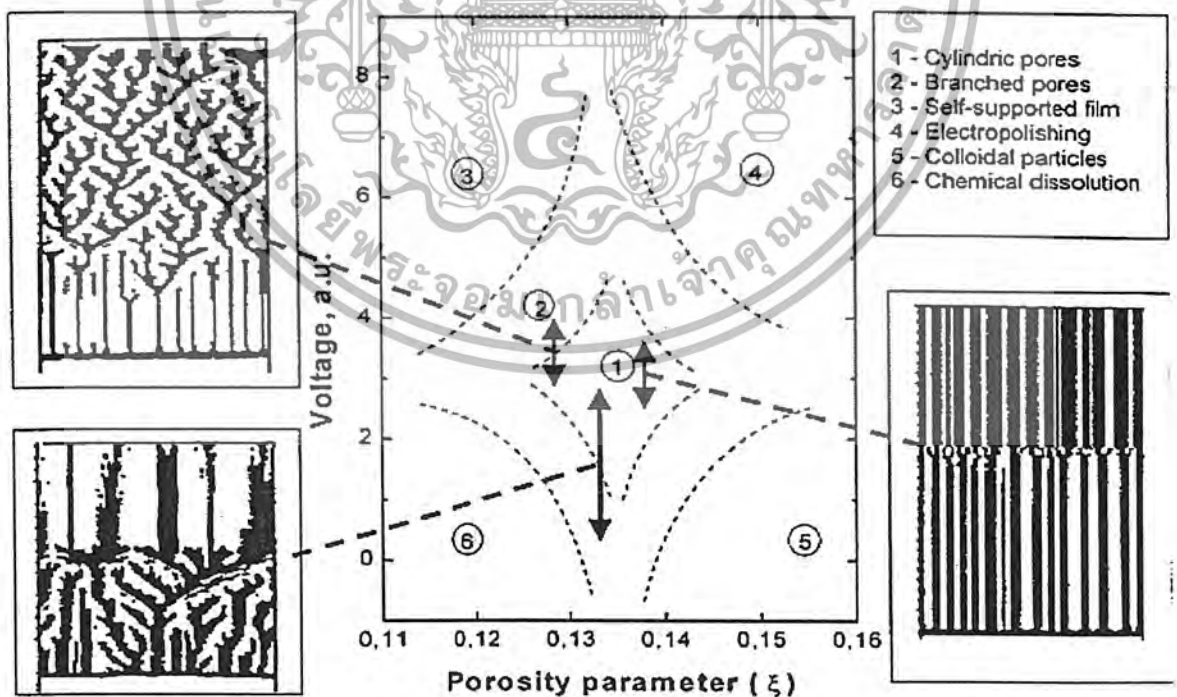
ปัจจัยหลักๆที่มีผลต่อโครงสร้างของพอร์สซิติคอนที่สร้างด้วยวิธีการกัดด้วยไฟฟ้าเคมี มีดังนี้

1. สภาพความต้านทานของผลึกซิติคอน
2. ชนิดของสารเจือในเนื้อผลึกซิติคอน
3. ความหนาแน่นกระแสที่ไบอัสเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา
4. ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก
5. เวลาที่ใช้ในกระบวนการ

จากการศึกษาพบว่าโครงสร้างของพอร์สซิติคอนจะมีค่าความพรุนสูงขึ้นและมีความหนาของชั้นพอร์สซิติคอนมากขึ้นถ้า

1. เพิ่มสภาพความต้านทานของผลึกซิติคอนในผลึกซิติคอนชนิด พี
2. ลดสภาพความต้านทานของผลึกซิติคอน ในผลึกซิติคอนชนิด เอ็น
3. เพิ่มความหนาแน่นกระแสที่ไบอัสเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา
4. ลดความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก
5. เพิ่มเวลาที่ใช้ในกระบวนการ

โครงสร้างของพอร์สซิติคอนจะมีค่าความพรุนน้อยลงและมีความหนาของชั้นพอร์สซิติคอนน้อยลงถ้าหากปรับปัจจัยดังกล่าวไปในทางตรงกันข้ามกับการเพิ่มค่าความพรุน

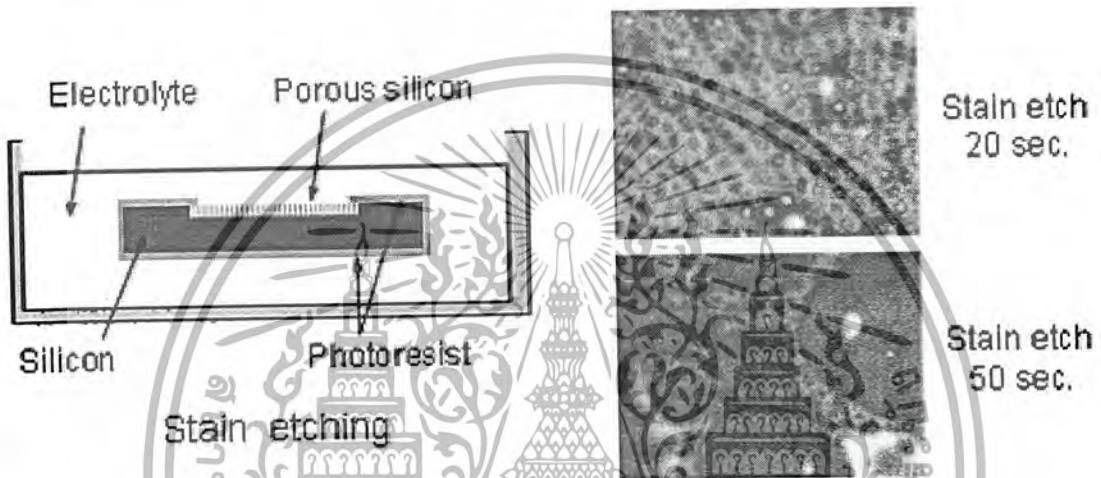


รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดัน ไบอัสในปฏิกิริยาการกัดและค่าตัวแปรต่าง ๆ ในพอร์สซิติคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching

การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching หรือ การกัดแบบข้อมลี เริ่มมีการนำมาใช้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 เทคนิคที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือการจุ่มแผ่นผลึกซิลิคอนลงในสารประกอบของไฮโดรฟลูออริก ซึ่งมักจะประกอบด้วย สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก(HF), กรดไนตริก(Nitric) และน้ำ เป็นส่วนประกอบหลัก นอกจากนี้ยังอาจมีการใช้การกระตุ้นด้วยแสงสว่างในขณะที่ทำการกัดด้วยปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวช่วยการทำปฏิกิริยาด้วย



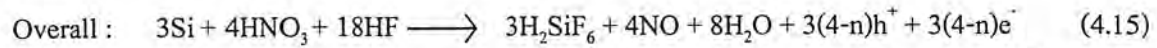
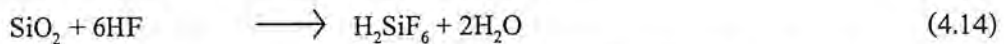
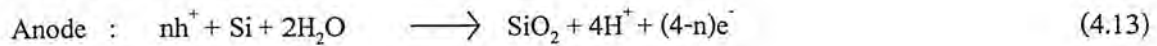
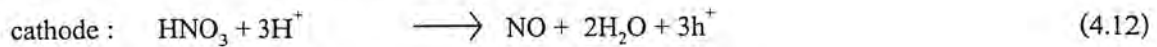
รูปที่ 4.17 การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching และ ตัวอย่างของพอร์ซซิลิคอนที่ได้จากการกัดแบบข้อมลี

4.2.1 กลไกการทำปฏิกิริยาเคมี

จุดสำคัญของการกัดแบบข้อมลี(Stain etching) ก็คือ การทำให้เกิดประจุโฮลเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดเนื้อซิลิคอน ซึ่งส่วนมากจะนิยมใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก(HF)ทำปฏิกิริยากับ กรดไนตริก(Nitric : HNO_3)เพื่อทำให้เกิดประจุโฮล ดังสมการที่ 4.12 หลังจากนั้นประจุโฮลที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนและน้ำ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน(Oxidation reaction) ได้ซิลิคอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 4.13 ขณะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้เองสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกก็จะกัดเนื้อซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนออก ดังสมการที่ 4.14 ซึ่งการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์และการถูกกัดออกของซิลิคอนไดออกไซด์จะเป็นแบบสุ่ม เนื่องจากไม่มีกลไกในการควบคุมทิศทางการทำปฏิกิริยาเหมือนอย่างกรณีการกัดด้วยไฟฟ้าเคมี(Anodication) ดังนั้นลักษณะโครงสร้างที่ได้จึงมักจะไม่มีรูปแบบ(Non-uniform)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดแบบข้อมล



ในระหว่างกระบวนการกัดจะสังเกตเห็นว่าบริเวณที่กำลังทำปฏิกิริยามีสีส้มเปลี่ยนไปในรูปแบบที่คล้ายกับวงเวียนสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง เช่น มีการเปลี่ยนแปลงของสีส้มจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวและสีทองตามลำดับ ก็จะได้ความหนาของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.1 ไมครอน ถึงประมาณ 1.5 ไมครอน เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีการค้นพบว่าในกระบวนการกัดแบบข้อมล มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการบ่มสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกร่วมกับกรดไนตริกสักครู่ก่อนที่จะนำไปทำปฏิกิริยากัดในขั้นตอนต่อไป ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการเพาะพักตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะใช้ในกระบวนการกัดนั่นเอง เรียกว่า "การบ่มสารละลาย (Incubation)"

4.2.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนที่สร้างจากวิธี Stain etching

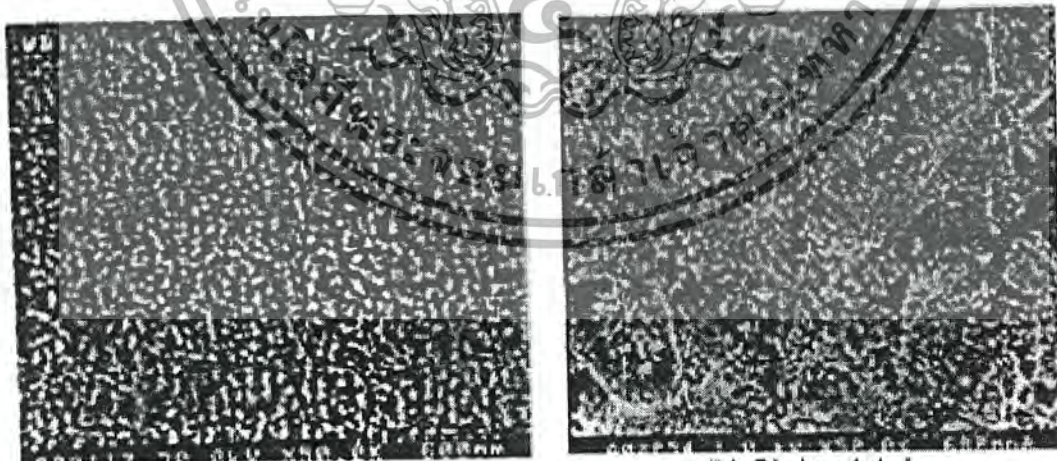
1. อัตราส่วนของสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นของกรดไนตริกต่อปริมาณสารละลายที่ใช้ โดยที่อัตราการเกิดชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของกรดไนตริกต่อปริมาณสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา อัตราส่วนของสารละลายที่นิยมใช้ได้แก่ HF:HNO₃:H₂O ในอัตราส่วน 1:3:5 เป็นต้น

2. ชนิดของสารเจือและค่าสภาพความต้านทานของแผ่นผลึกซิลิคอนที่นำมากัดพอร์ซ มีผลอย่างมากต่ออัตราการเกิดของชั้นพอร์ซซิลิคอนซึ่งทำให้มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการทำ "Incubation" โดยตรง โดยที่ผลึกซิลิคอนชนิดพี จะต้องใช้เวลาในการบ่มสารละลายเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกับค่าสภาพความต้านทานของผลึกซิลิคอนที่เพิ่มขึ้น เช่น การบ่มสารละลายใช้เวลา 30 วินาที สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพีที่มีค่าสภาพความต้านทาน 0.004 โอห์ม-เซนติเมตร ก็อาจจะต้องปรับเป็นใช้เวลาในการบ่มสารละลาย 9 นาที สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพีที่มีค่าสภาพความต้านทาน 50 โอห์ม-เซนติเมตร เป็นต้น ในทางตรงกันข้าม ถ้าเป็นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น จะต้องใช้เวลาในการบ่มสารละลายน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญกับค่าสภาพความต้านทานของผลึกซิลิคอนที่เพิ่มขึ้น เช่น การบ่มสารละลายใช้เวลา 10 นาที สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพีที่มีค่าสภาพความต้านทาน 0.15 โอห์ม-เซนติเมตร ก็อาจจะต้องปรับเป็นใช้เวลาในการบ่มสารละลาย 8 นาที สำหรับแผ่นซิลิคอนชนิดพีที่มีค่าสภาพความต้านทาน 20 โอห์ม-เซนติเมตร เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สภาพของผลึกซิลิคอนมีผลต่อการเกิดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน มีการทดลองกับแผ่นซิลิคอนแบบผลึกรูปเดี่ยว (Single crystalline), แผ่นซิลิคอนแบบผลึกหลายรูป (poly crystalline), แผ่นซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส (Amorphous) และชั้นอัลลอยของซิลิคอนกับเจอร์เมเนียม ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$) ที่สร้างจากกระบวนการEpitaxi เมื่อนำมาสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสีกายได้ปีจัยภายนอกเดียวกัน พบว่า จากการกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต(UV) พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนแบบผลึกรูปเดี่ยวแผ่นซิลิคอนแบบผลึกหลายรูปสามารถแสดงคุณสมบัติPhotoluminescence(PL) แต่พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่มีโครงสร้างผลึกแบบAmorphousกลับไม่แสดงคุณสมบัติPhotoluminescence(PL) ส่วนกรณีชั้นอัลลอยของซิลิคอนกับเจอร์เมเนียม ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$) ที่สร้างจากกระบวนการEpitaxi พบว่าการเพิ่มค่าความหนาแน่นของเจอร์เมเนียม(Ge_x)จะทำให้ความเข้มของแสงจากการเกิดPhotoluminescence(PL)ลดลงในขณะที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ปล่อยออกมายังคงมีค่าเท่าเดิม

4. การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารละลายที่ใช้กัดและการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ของกระบวนการทำปฏิกิริยาดันมีผลกระทบต่อโครงสร้างและลักษณะของพอร์สซิลิคอนที่จะเกิดขึ้น เช่น การใช้คลื่นเสียงในระหว่างกระบวนการกัดจะช่วยให้การทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลาย เกิดการทำปฏิกิริยาอย่างมีระเบียบมากขึ้น และทำให้ได้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่หนาขึ้น แต่ขณะเดียวกันก็จะได้โครงสร้างพอร์สซิลิคอนที่หยาบกว่าการสร้างชั้นพอร์สโดยไม่ใช้คลื่นเสียงร่วมด้วย ดังรูปที่ 4.19



(a) Stain etch in the absence of sonication

(b) Stain etch in the presence of sonication

รูปที่ 4.18 ภาพเปรียบเทียบของการใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้างด้วยวิธี Stain etching

รูป (a) พอร์สซิลิคอนที่ได้จากการไม่ใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้าง

รูป (b) พอร์สซิลิคอนที่ได้จากการใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการสร้าง

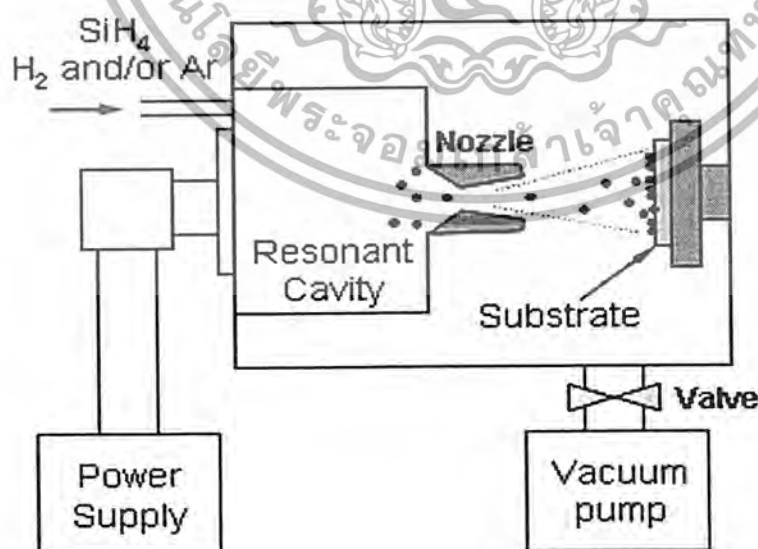
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธี Microwave plasma decomposition ของก๊าซไซเรน (SiH_4)

ผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร (nanocrystallites Si) ซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติในการเปล่งแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ ณ ที่อุณหภูมิห้องนั้น สามารถทำการสร้างขึ้นมาได้ด้วยวิธีการ Microwave plasma decomposition ก๊าซไซเรน (SiH_4) โดยวิธีการสร้างแบบนี้ได้ถูกรายงานเป็นครั้งแรก โดย Takagi et al. มีหลักการดังต่อไปนี้ คือ ผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรจะถูกสร้างขึ้นมาด้วยวิธีการ Microwave plasma decomposition ก๊าซไซเรน (SiH_4) กับก๊าซไฮโดรเจน (H_2) หรือก๊าซผสมของอาร์กอน (Ar) ในช่อง resonant cavity โดยมีการใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีกำลัง 150 W ที่ความถี่ 2.45 GHz เพื่อทำให้เกิด plasma ขึ้นภายใน ซึ่งลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างจะถูกแสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.20

ขนาดของผลึกซิลิคอนที่เกิดขึ้นจะมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 2.5 จนไปถึง 2 นาโนเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของก๊าซ กับกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ ต่อจากนั้นผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรนี้จะถูกปล่อยผ่านท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 4.5 มิลลิเมตร ไปยังภาชนะระบบปิด (chamber) ที่ภายในมีความดันอยู่ในระดับ 10^{-6} Torr โดยผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรที่เกิดขึ้นนี้จะถูกปล่อยให้ไปตกเคลือบอยู่บนฐานรองที่เป็น คิวทซ์ ณ ที่อุณหภูมิห้อง

SiH_4 Microwave plasma Decomposition



รูปที่ 4.19 แสดงอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการ

Microwave plasma decomposition ก๊าซไซเรน (SiH_4)

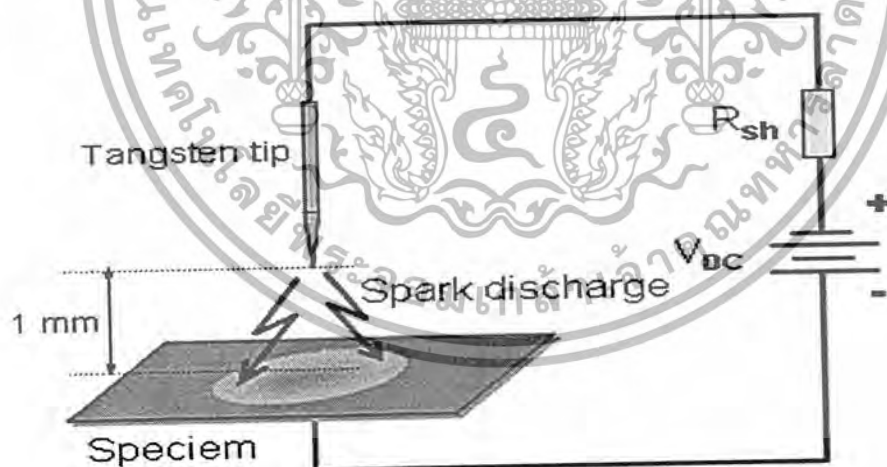
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Laser breakdown ก๊าซไซเรน (SiH_4)

ผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรยังสามารถสร้างขึ้นได้จากวิธีการ laser breakdown ของก๊าซไซเรน (SiH_4) โดยมีรายละเอียดวิธีการสร้างดังต่อไปนี้ คือ เริ่มต้นจากการที่ก๊าซไซเรนบริสุทธิ์ (Pure SiH_4) ที่มีความดันเท่ากับ 10, 15 หรือ 20 Torr จะถูกปล่อยเข้าไปยังในภาชนะระบบปิด (chamber) ซึ่งภายในมีความดัน (background pressure) ที่ต่ำกว่า 10^{-6} Torr ความดันก๊าซไซเรนต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดของผลึกซิลิคอนที่เกิดขึ้น ในส่วนของเลเซอร์ที่ใช้ นั้นมีแหล่งกำเนิดมาจากระบบ Nd^{3+} : YAG laser system โดยแสงเลเซอร์ที่ได้ออกมาจะถูกโฟกัสให้ผ่านเข้าไปยังภาชนะระบบปิด เพื่อทำให้เกิดการ Spark ขึ้นภายในผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรที่เกิดขึ้นจะถูก deposit ลงบนฐานรองที่เป็นควอตซ์หรือแผ่นเยอรมันเนียม

4.5 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี High frequency discharge

เทคนิคในการสร้างผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการ spark discharge ที่ความถี่สูงได้ถูกรายงานเป็นครั้งแรกโดยนาย Hummel และทีมงาน โดยการ spark discharge ที่เกิดขึ้นจะใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงความต่างศักย์สูง ขนาด 15 กิโลโวลต์ ซึ่งในการ spark แต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 20 ns และเกิดขึ้นทุก ๆ 60 μs ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.20 แสดงการ Spark ที่เกิดขึ้นระหว่างปลายลวดทังสเตนกับแผ่นผลึกซิลิคอน

จากรูปจะเห็นได้ว่าการ spark discharge จะเกิดขึ้นระหว่างปลายสุดของลวดทังสเตน ซึ่งอยู่ที่ขั้วแอโนด กับแผ่นผลึกซิลิคอนซึ่งอยู่ที่ขั้วแคโทด โดยการ Spark นั้นจะทำให้บริเวณซึ่งเกิดโครงสร้างของผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรมีลักษณะเป็นบริเวณวงกลมที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำออกจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ส่วนใหญ่จะเป็นเทคนิคการปลูกผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรขึ้นมาโดยตรง โดยเทคนิคต่างๆ เหล่านี้อาจจะต้องอาศัยเทคนิคการสร้าง และอุปกรณ์เครื่องมือที่มีความแม่นยำสูง ในการปลูกผลึกให้มีโครงสร้างอยู่ในระดับชั้นของโมเลกุลได้ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะมีราคาที่สูงมาก แต่ในการทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนนี้ได้ทำการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนที่มีโครงสร้างอยู่ในระดับนาโนเมตรเช่นกัน ด้วยวิธีการกัดข้อมี (Stain Etching) เนื่องจากมีกระบวนการสร้างที่ค่อนข้างง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และมีความเหมาะสมอย่างยิ่งกับการนำไปใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ อาทิ การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ซึ่งพอร์สซิลิคอนที่ใช้งานในลักษณะนี้จะต้องไม่หนามากนัก และไม่จำเป็นต้องควบคุมค่าความพรุนอย่างละเอียดมากนัก อีกทั้งกระบวนการสร้างต้องไม่ยุ่งยาก และใช้ต้นทุนต่ำ ดังนั้นการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมี (Stain etching) จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

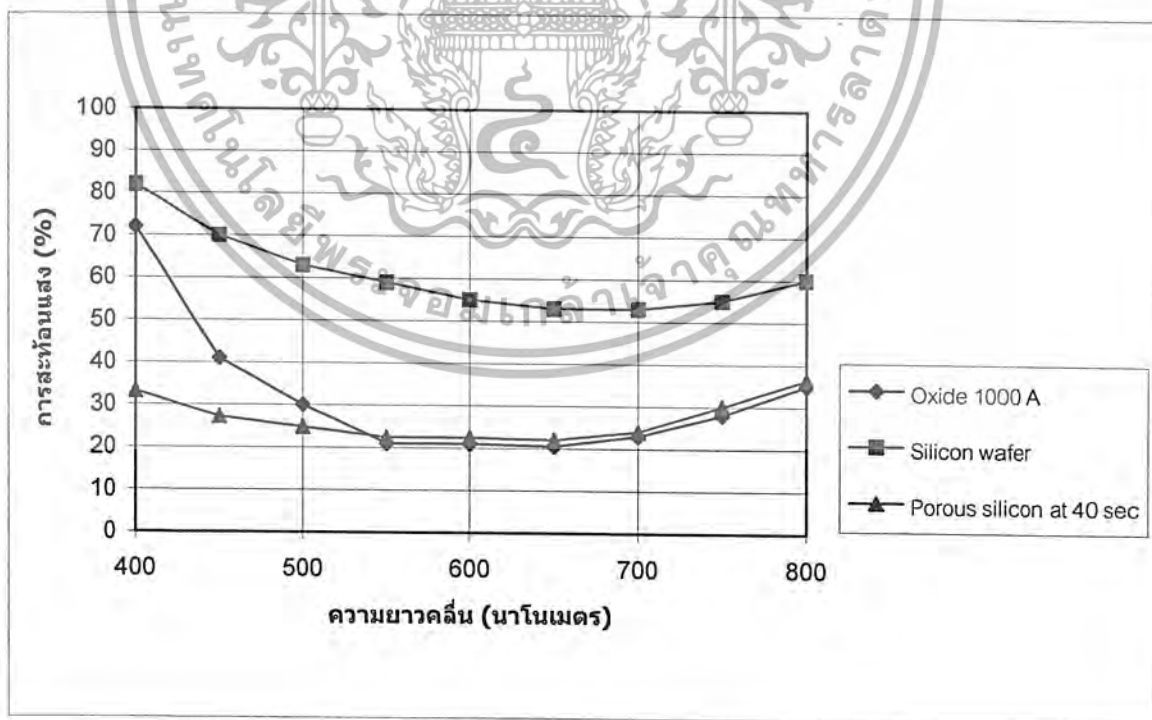
บทที่ 5

การทดลอง

ในการทดลองนี้จะเน้นขบวนการสร้างพอร์สซิลิคอนที่เหมาะสมกับการสร้างพอร์สซิลิคอนให้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งควรจะเป็นขบวนการสร้างพอร์สที่ใช้เวลาในการสร้างน้อยที่สุด มีความง่ายและถูกที่สุด สามารถเลือกพื้นที่ๆจะให้เกิดพอร์สหรือไม่ให้เกิดพอร์สก็ได้

การเพื่อให้ได้ลักษณะของพอร์สซิลิคอนที่เหมาะสมจะนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นพอร์สที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงในย่านความยาวคลื่น 400 นาโนเมตรถึง 800 นาโนเมตร ต่ำและมีลักษณะที่เป็นเอกรูปเดียวกัน(Uniformity) มากที่สุด

เซลล์แสงอาทิตย์จะมีโครงสร้างที่เป็นชั้นรอยต่อ P-N และมีชั้นลดการสะท้อนแสงด้านบนเพื่อช่วยให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น จากแนวคิดคุณสมบัติของพอร์สซิลิคอนที่มีการสะท้อนแสงใกล้เคียงกับชั้นลดการสะท้อนที่เป็นชั้นออกไซด์ แต่พอร์สซิลิคอนนั้นสามารถสร้างได้ง่ายและถูกกว่า จึงเหมาะที่จะนำมาใช้สร้างเป็น เซลล์แสงอาทิตย์ราคาถูก และอาจสร้างให้เป็น one mask solar cells ได้



รูปที่ 5.1 กราฟเปรียบเทียบการสะท้อนแสงของ ออกไซด์, แผ่นซิลิคอน และพอร์สซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 การทดลองสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมล

5.1.1 การทดลองสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมล

5.1.1.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและสังเกตกระบวนการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมล
2. เพื่อศึกษาและสังเกตกลไกการเกิดพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมล

5.1.1.2 การทดลอง

เริ่มด้วยการเตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

ในช่วงนี้ก็ด้วยการตัดแผ่นซิลิคอนที่ทำการสร้างรอยต่อ P-N แล้วขนาดประมาณ 1 ตารางเซนติเมตร แล้วทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐาน จากนั้นลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกให้หมด หลังจากผสมสารละลายได้ประมาณ 30 นาทีแล้วก็นำแผ่นซิลิคอนที่เตรียมไว้จุ่มลงในสารละลายเป็นเวลา 1 นาที, ล้างน้ำ DI และทำไปทดสอบการเรืองแสงด้วยหลอด UV แล้วสังเกตผล .

5.1.1.3 ผลการทดลอง

เมื่อจุ่มแผ่นซิลิคอนลงในสารละลาย หลังจากนั้นประมาณ 7 วินาทีจะปรากฏเกิดฟองก๊าซขนาดเล็กมากจากผิวแผ่นซิลิคอน ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีมากขึ้นพร้อมกับการเปลี่ยนสีของแผ่นซิลิคอน ฟองก๊าซบางส่วนที่เกาะที่ผิวของแผ่นซิลิคอนจะรวมตัวกันใหญ่ขึ้นเมื่อนำแผ่นซิลิคอนไปล้างในน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้ง จะเห็นอย่างชัดเจนว่าสีของแผ่นผลึกเปลี่ยนไป การเกิดของสีและลวดลายบนแผ่นผลึกเป็นไปอย่างไม่เป็นระเบียบลักษณะเป็นจุดกลมและมีหลากหลายสี ชั้นของพอร์สซิลิคอนมีความโปร่งแสงและมีฟองอากาศเม็ดเล็กๆกระจายอยู่ภายในคล้ายกับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ โดยจากการทดสอบการเรืองแสงจะได้ว่าแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการสร้างชั้นพอร์สแล้วเมื่ออยู่ใต้แสง UV จะมีการเรืองแสงออกมาเป็นสีส้มแดง แสดงว่าแผ่นซิลิคอนนี้มีชั้นพอร์สซิลิคอนเกิดขึ้นจริง



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.2 (ก)พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากกระบวนการการกัดข้อมล

(ข)การเรืองแสงของพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากกระบวนการการกัดข้อมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 การศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการสร้างพอร์สซิลิคอนโดยมีการส่องแสงกระตุ้น

5.1.2.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและสังเกตผลของเวลาในการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดด้วยสีย้อมสีโดยมีการส่องแสงช่วยกระตุ้น
2. เพื่อศึกษาและสังเกตการสะท้อนแสงของพอร์สซิลิคอนที่สร้างขึ้นจากปัจจัยทางเวลาที่ต่างกันโดยมีการส่องแสงช่วยกระตุ้น

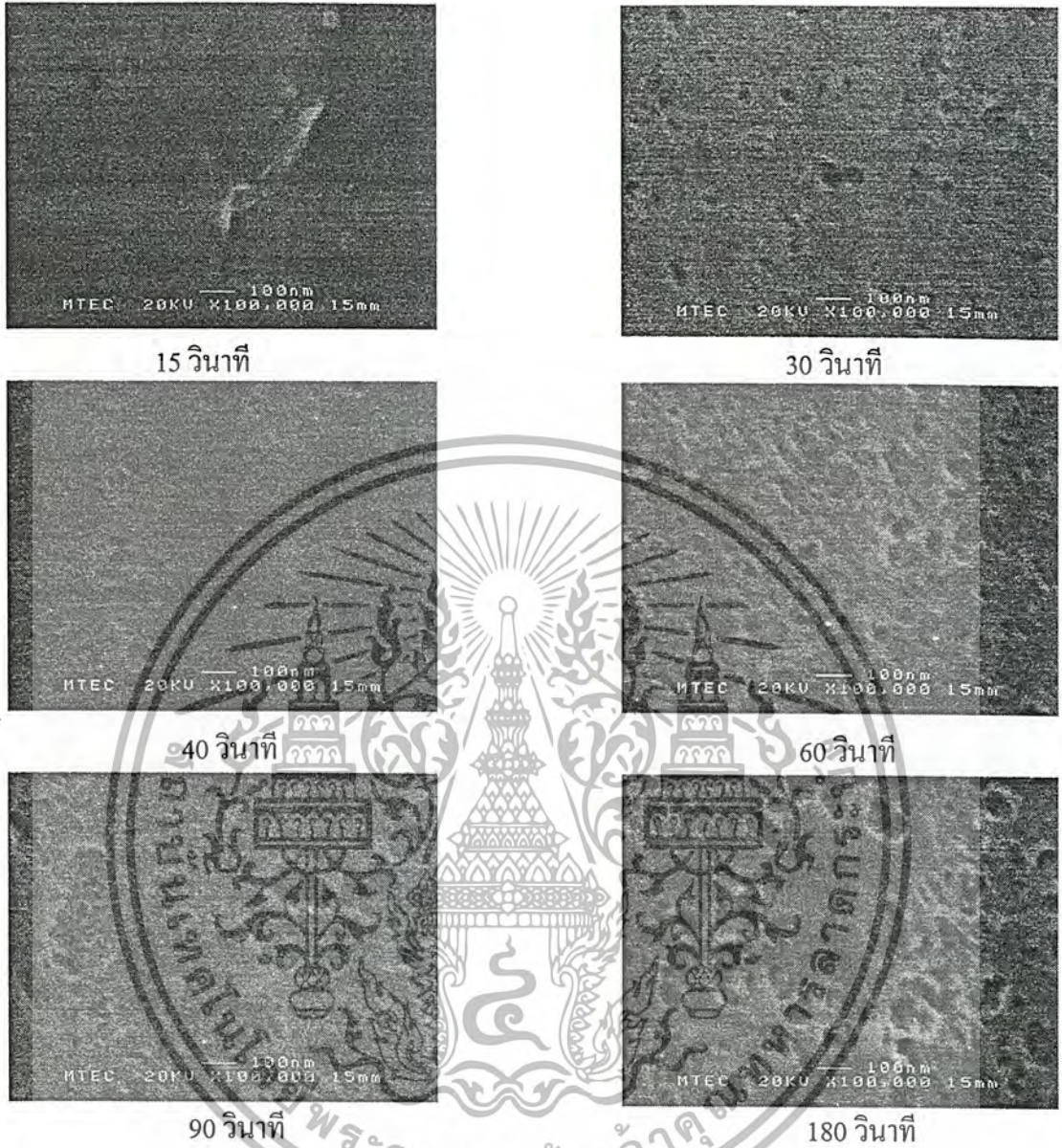
5.1.2.2 การทดลอง

เริ่มด้วยการเตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

นำแผ่นซิลิคอนที่ทำการสร้างรอยต่อ P-N แล้วมาทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐานและลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกหมดแล้วจุ่มลงในสารละลายด้วยเวลาต่างกัน คือ 20 วินาที, 40 วินาที, 1.10 นาที, 1.30 นาที, 2 นาที, 2.30 นาที โดยในขณะที่ทำการสร้างพอร์สซิลิคอนนั้นได้ทำการฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนด์ขนาด 60 วัตต์ที่ความเข้มแสง 30,000 lux แล้วสังเกตผลและนำแผ่นซิลิคอนที่ทำการสร้างมาทำการวัดการเรืองแสงและวัดเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง

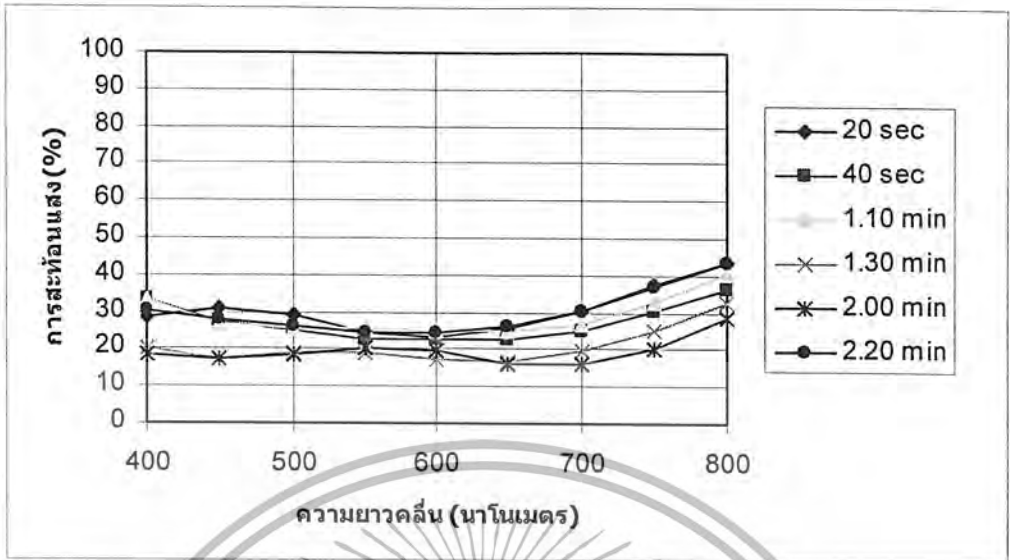
5.1.2.3 ผลการทดลอง

ในการทดลองมีการสังเกตว่าในช่วงเวลาเริ่มเกิดพอร์สซิลิคอนจะเร็วกว่าในกรณีที่ไม่มีการใช้แสงกระตุ้น โดยจะเริ่มมีการเกิดฟองขึ้นที่เวลา 5 วินาที หลังจากการทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนที่เวลาต่าง ๆ โดยมีการส่องแสงกระตุ้นแล้วนำแผ่นซิลิคอนที่สร้างชั้นพอร์สแล้วมาทดลองวัดการเรืองแสงและวัดเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง โดยทำการวัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั่วแผ่นแผ่นละ 5 จุด นำค่าที่ได้มาเฉลี่ยและนำมาเขียนบนกราฟเดียวกัน ดังรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาในการสร้างพอร์สซิลิคอนเพิ่มขึ้นจะทำให้กราฟเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ได้มีค่าต่ำลง โดยช่วงเวลาหลังจาก 40 วินาทีไปแล้วจะมีค่าใกล้เคียงกันจนถึงช่วงเวลา 2.20 นาทีกราฟจะมีค่าสูงขึ้นซึ่งอาจเป็นเพราะเมื่อทำการสร้างชั้นพอร์สนานขึ้นทำให้แท่งพอร์สที่เกิดขึ้นก่อนโดนกัดออกไปบ้างทำให้กราฟมีค่าสูงขึ้น โดยแผ่นซิลิคอนทุกแผ่นจะมีการเรืองแสงเป็นสีส้มแดง



รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอลิเมอร์ที่ได้จากการกักข้อมสีที่เวลาต่างๆ ด้วยเครื่อง SEM ที่เวลาต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบวัดเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่เวลาต่าง ๆ

5.1.3 การศึกษาผลของปัจจัยภายนอกในการสร้างพอร์สซิลิโคน

5.1.3.1 วัสดุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและสังเกตผลของคลื่นในระหว่างการกักพอร์สซิลิโคน
2. เพื่อศึกษาและสังเกตผลของอัตราส่วนสารละลาย

5.1.3.2 การทดลอง

5.1.3.2.1 การทดลองผลของคลื่นในระหว่างการกักพอร์สซิลิโคน

เริ่มด้วยการเตรียมสารละลายที่จะใช้กัก โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

ทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิโคนโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วมเป็นเวลา 40 วินาที โดยในขณะที่ทำการสร้างพอร์สซิลิโคนนั้น ได้ทำการฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนขนาด 60 วัตต์ที่ความเข้มแสง 30,000 lux ด้วยแล้วสังเกตผลที่เกิดขึ้น จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำ DI นำมาวัดการเรืองแสงและทำการเปรียบเทียบชั้นพอร์สที่ได้ระหว่างการกักพอร์สซิลิโคนด้วยสารละลายที่ไม่มีการใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วมและการกักพอร์สซิลิโคนด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิคเข้าร่วม

5.1.3.2.2 การทดลองผลของอัตราส่วนสารละลาย

เริ่มด้วยการเตรียมสารละลายที่จะใช้กัก โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที ทำการหยดเอทานอลแอลกอฮอล์ จำนวน 5, 10, 20 หยดต่อสารละลาย 90 ลูกบาศก์เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำแผ่นซิลิคอนที่ทำการสร้างชั้นรอยต่อ P-N แล้วมาทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐานและลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกหมดแล้วจุ่มลงในสารละลายเป็นเวลา 40 วินาที โดยในขณะที่ทำการสร้างพอร์ซิลิคอนนั้นได้ทำการฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนขนาด 60 วัตต์ที่ความเข้มแสง 30,000 lux ด้วยแล้วสังเกตผล จากนั้นนำไปทดสอบการเรืองแสงและทำการเปรียบเทียบชั้นพอร์ซิลิคอนที่ได้ระหว่างการสร้างพอร์ซิลิคอนโดยมีการผสมเอทานอลแอลกอฮอล์ในสารละลาย และการสร้างพอร์ซิลิคอนโดยไม่มีการผสมเอทานอลแอลกอฮอล์ในสารละลาย

5.1.3.3 ผลการทดลอง

5.1.3.3.1 ผลการทดลองผลของคลื่นในระหว่างการกัดพอร์ซิลิคอน

จากการสังเกตการณ์สร้างพอร์ซิลิคอนจะได้ว่าในขณะที่สร้างพอร์ซิลิคอนด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วม เวลาในการเริ่มเกิดฟองจะช้ากว่าการสร้างพอร์ซิลิคอนด้วยสารละลายที่ไม่มีคลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วม คือจะเริ่มเกิดฟองที่เวลา 12 วินาที แต่ขนาดของฟองจะมีขนาดเล็กกว่าและน้อยกว่า เมื่อทำการสร้างเสร็จนำมาล้างด้วยน้ำ DI แล้วสังเกตได้ว่าชั้นพอร์ซิลิคอนที่เกิดขึ้นมีการเรียงตัวเป็นอนุกรมดีกว่าการสร้างด้วยสารละลายที่ไม่มีคลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วม โดยผลของการเรืองแสงเห็นได้ว่าการเรืองแสงที่สม่ำเสมอมากกว่าการสร้างโดยไม่ใช้อัลตราโซนิกเข้าร่วม



(ก)

(ข)

รูปที่ 5.5 (ก) ชั้นพอร์ซิลิคอนที่สร้างด้วยสารละลายที่ไม่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วม

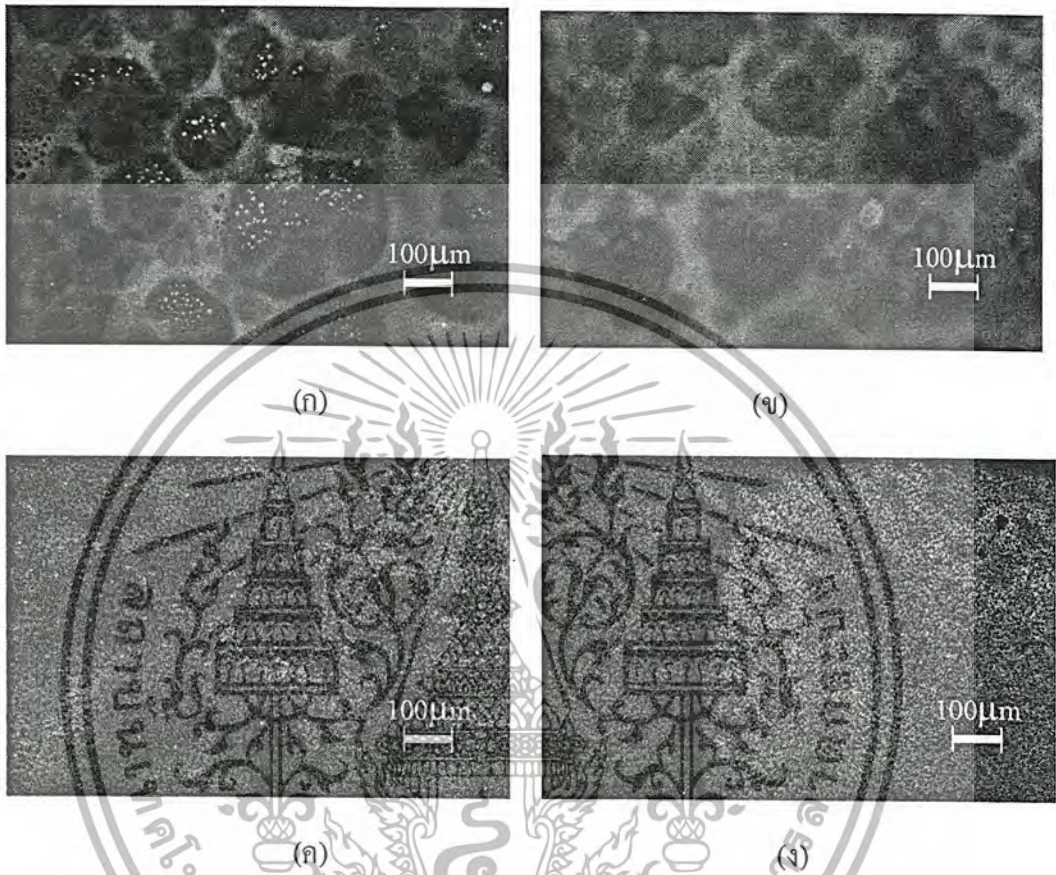
(ข) ชั้นพอร์ซิลิคอนที่สร้างด้วยสารละลายที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกเข้าร่วม

5.1.3.3.2 ผลการทดลองผลของอัตราส่วนสารละลาย

จากการสังเกตการณ์สร้างพอร์ซิลิคอนจะได้ว่าในขณะที่สร้างพอร์ซิลิคอนด้วยสารละลายที่มีการผสมเอทานอลแอลกอฮอล์ เวลาในการเริ่มเกิดฟองจะเร็วกว่าการสร้างพอร์ซิลิคอนด้วยสารละลายที่ไม่มีการผสมเอทานอลแอลกอฮอล์ คือจะเริ่มเกิดฟองที่เวลา 5 วินาทีสำหรับการผสมเอทานอลแอลกอฮอล์ 0.125 cc ต่อสารละลาย 90 cc , 3 วินาทีสำหรับการผสมเอทานอลแอลกอฮอล์ 0.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cc ต่อสารละลาย 90 cc และเกือบทันทีสำหรับการผสมเอทานอลแอลกอฮอล์ 0.5 cc ต่อสารละลาย 90 cc และขนาดของฟองจะมีขนาดเล็กกว่า เมื่อทำการสร้างเสร็จจะสังเกตเห็นว่าการเรียงตัวเป็นเอกรูปดีกว่าสารละลายที่ไม่มีการผสมเอทานอลแอลกอฮอล์และมีการเรียงแสงที่สม่ำเสมอมากกว่า



รูปที่ 5.6 (ก) ชั้นพอร์ซซิลิคอนที่สร้างด้วยสารละลายที่ไม่ผสมกับเอทานอลแอลกอฮอล์
 (ข) ชั้นพอร์ซซิลิคอนที่สร้างด้วยสารละลายผสมกับเอทานอลแอลกอฮอล์ 0.125 cc
 (ค) ชั้นพอร์ซซิลิคอนที่สร้างด้วยสารละลายผสมกับเอทานอลแอลกอฮอล์ 0.25 cc
 (ง) ชั้นพอร์ซซิลิคอนที่สร้างด้วยสารละลายผสมกับเอทานอลแอลกอฮอล์ 0.5 cc

วิธีการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน	เวลาที่เริ่มเกิดฟอง	ความสม่ำเสมอ
สารละลายไม่มีการส่องแสง	7 วินาที	ไม่ดี
สารละลายมีการส่องแสง	5 วินาที	ไม่ดี
สารละลายมีการส่องแสงและอัลตราโซนิก	12 วินาที	ดี
สารละลายมีการส่องแสงและผสมแอลกอฮอล์ 5 หยด	5 วินาที	ดี
สารละลายมีการส่องแสงและผสมแอลกอฮอล์ 10 หยด	3 วินาที	ดี
สารละลายมีการส่องแสงและผสมแอลกอฮอล์ 20 หยด	เกือบทันที	ดี

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบเวลาในการเกิดในปัจจัยในการสร้างที่ต่างกัน

5.2 การศึกษาการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอน (Selection Area)

5.2.1 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอน (Selection Area)

5.2.2 การทดลอง

5.2.2.1 การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนด้วยชั้นป้องกันการเกิด

พอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350

เตรียมแผ่นซิลิคอนที่ทำการสร้างชั้นรอยต่อ P-N แล้วทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐาน ลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกให้หมด สร้างชั้นฟิล์มจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 ด้วยความเร็วรอบในการสปินต่างๆ คือ 2,000 รอบต่อนาที, 3,000 รอบต่อนาที, 4,000 รอบต่อนาที และ 5,000 รอบต่อนาที ในบริเวณที่ไม่ต้องการกัดพอร์สด้วยกระบวนการโฟโวลติกกราฟี ในการทดลองนี้จะใช้ Mask ที่มีลวดลายขนาดต่าง ๆ กัน

เตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

ทดลองจุ่มแผ่นซิลิคอนที่เตรียมไว้ลงในสารละลายเป็นเวลา 40 วินาทีโดยในขณะที่ทำการสร้างพอร์สซิลิคอนนั้นได้ทำการฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนขนาด 60 วัตต์ที่ความเข้มแสง 30,000 lux ด้วย แล้วสังเกตผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2.2 การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไอแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 และทำการลอกชั้นอลูมิเนียมด้วยกรดกัดอลูมิเนียมก่อนทำการสร้างพอร์สซิลิคอน

เตรียมแผ่นซิลิคอนที่ทำการสร้างชั้นรอยต่อ P-N แล้วและได้ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้วยวิธีการ Vacuum Evaporation โดยแผ่นที่นำไปการเคลือบชั้นอลูมิเนียมแผ่นหนึ่งจะทำการ Sintering ที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส อีกแผ่นไม่ต้องทำการ Sintering สร้างชั้นฟิล์มจากน้ำยาไอแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 ด้วยความเร็วรอบในการสปินต่างๆ คือ 2,000 รอบต่อนาที, 3,000 รอบต่อนาที, 4,000 รอบต่อนาที และ 5,000 รอบต่อนาทีในบริเวณที่ไม่ต้องการกัดพอร์สด้วยกระบวนการ โฟโวลติโคราฟี ในการทดลองนี้จะใช้ Mask ที่มีลวดลายขนาดต่าง ๆ กัน

จุ่มแผ่นซิลิคอนที่เตรียมไว้ลงในกรดกัดอลูมิเนียม เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้หน้าชั้นอลูมิเนียมในส่วนที่ไม่ต้องการออกไป

เตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

ทดลองจุ่มแผ่นซิลิคอนที่เตรียมไว้ลงในสารละลายโดยในขณะที่ทำการสร้างพอร์สซิลิคอนนั้นได้ทำการฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนขนาด 60 วัตต์ที่ความเข้มแสง 30,000 lux ด้วย แล้วสังเกตผล

5.2.2.3 การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไอแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350

เตรียมแผ่นซิลิคอนที่ทำการสร้างชั้นรอยต่อ P-N แล้วและได้ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้วยวิธีการ Vacuum Evaporation โดยแผ่นที่นำไปการเคลือบชั้นอลูมิเนียมแผ่นหนึ่งจะทำการ Sintering ที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส อีกแผ่นไม่ต้องทำการ Sintering สร้างชั้นฟิล์มจากน้ำยาไอแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 ด้วยความเร็วรอบในการสปินต่างๆ คือ 2,000 รอบต่อนาที, 3,000 รอบต่อนาที, 4,000 รอบต่อนาที และ 5,000 รอบต่อนาทีในบริเวณที่ไม่ต้องการกัดพอร์สด้วยกระบวนการ โฟโวลติโคราฟี ในการทดลองนี้จะใช้ Mask ที่มีลวดลายขนาดต่าง ๆ กัน

เตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

ทดลองจุ่มแผ่นซิลิคอนที่เตรียมไว้ลงในสารละลายโดยในขณะที่ทำการสร้างพอร์สซิลิคอนนั้นได้ทำการฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนขนาด 60 วัตต์ที่ความเข้มแสง 30,000 lux ด้วย แล้วสังเกตผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2.4 การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไอแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818

เตรียมแผ่นซิลิคอนที่ทำการสร้างชั้นรอยต่อ P-N แล้วทำความสะอาดแผ่นตามกระบวนการมาตรฐาน ลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกให้หมด สร้างชั้นฟิล์มจากน้ำยาไอแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 ด้วยความเร็วรอบในการสปินต่างๆ คือ 3,000 รอบต่อนาที, 4,000 รอบต่อนาที และ 5,000 รอบต่อนาที ในบริเวณที่ไม่ต้องการกัดพอร์สด้วยกระบวนการโฟโวลติโกราฟี ในการทดลองนี้จะใช้ Mask ที่มีลวดลายขนาดต่าง ๆ กัน

เตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

ทดลองจุ่มแผ่นซิลิคอนที่เตรียมไว้ลงในสารละลายเป็นเวลา 40 วินาทีโดยในขณะที่ทำการสร้างพอร์สซิลิคอนนั้นได้ทำการฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนขนาด 60 วัตต์ที่ความเข้มแสง 30,000 lux ด้วย แล้วสังเกตผล

5.2.2.5 การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไอแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 และทำการลอกชั้นอลูมิเนียมด้วยกรดกัดอลูมิเนียมก่อนทำการสร้างพอร์สซิลิคอน

เตรียมแผ่นซิลิคอนที่ทำการสร้างชั้นรอยต่อ P-N แล้วและได้ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้วยวิธีการ Vacuum Evaporation โดยแผ่นที่นำไปการเคลือบชั้นอลูมิเนียมแผ่นหนึ่งจะทำการ Sintering ที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส อีกแผ่นไม่ต้องทำการ Sintering สร้างชั้นฟิล์มจากน้ำยาไอแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 ด้วยความเร็วรอบในการสปินต่างๆ คือ 3,000 รอบต่อนาที, 4,000 รอบต่อนาที และ 5,000 รอบต่อนาที ในบริเวณที่ไม่ต้องการกัดพอร์สด้วยกระบวนการโฟโวลติโกราฟี ในการทดลองนี้จะใช้ Mask ที่มีลวดลายขนาดต่าง ๆ กัน

จุ่มแผ่นซิลิคอนที่เตรียมไว้ลงในกรดกัดอลูมิเนียม เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อให้หน้าชั้นอลูมิเนียมในส่วนที่ไม่ต้องการออกไป

เตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

ทดลองจุ่มแผ่นซิลิคอนที่เตรียมไว้ลงในสารละลายโดยในขณะที่ทำการสร้างพอร์สซิลิคอนนั้นได้ทำการฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนขนาด 60 วัตต์ที่ความเข้มแสง 30,000 lux ด้วย แล้วสังเกตผล

5.2.2.6 การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไอแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818

เตรียมแผ่นซิลิคอนที่ทำการสร้างชั้นรอยต่อ P-N แล้วและได้ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้วยวิธีการ Vacuum Evaporation โดยแผ่นที่นำไปเคลือบชั้นอลูมิเนียมแผ่นหนึ่งจะทำการ Sintering ที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส อีกแผ่นไม่ต้องทำการ Sintering สร้างชั้นฟิล์มจากน้ำยาไอแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 ด้วยความเร็วรอบในการสปินต่างๆ คือ 3,000 รอบต่อนาที, 4,000 รอบต่อนาที และ 5,000 รอบต่อนาทีในบริเวณที่ไม่ต้องการกัดพอร์สด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ในการทดลองนี้จะใช้ Mask ที่มีลวดลายขนาดต่างๆ กัน

เตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

ทดลองจุ่มแผ่นซิลิคอนที่เตรียมไว้ลงในสารละลายโดยในขณะที่ทำการสร้างพอร์สซิลิคอนนั้นได้ทำการฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนขนาด 60 วัตต์ที่ความเข้มแสง 30,000 lux ด้วย แล้วสังเกตผล

5.2.2.7 การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไอแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 โดยทำการเคลือบน้ำยาไอแสงหลายชั้น

เตรียมแผ่นซิลิคอนที่ทำการสร้างชั้นรอยต่อ P-N แล้วและได้ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้วยวิธีการ Vacuum Evaporation โดยแผ่นที่นำไปเคลือบชั้นอลูมิเนียมแผ่นหนึ่งจะทำการ Sintering ที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส อีกแผ่นไม่ต้องทำการ Sintering สร้างชั้นฟิล์มจากน้ำยาไอแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 ด้วยความเร็วรอบในการสปินต่างๆ คือ 3,000/3,000 รอบต่อนาที, 3,000/2,000 รอบต่อนาที 2,000/2,000 รอบต่อนาที และ 3,000/3,000/3,000 รอบต่อนาทีในบริเวณที่ไม่ต้องการกัดพอร์สด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ในการทดลองนี้จะใช้ Mask ที่มีลวดลายขนาดต่างๆ กัน

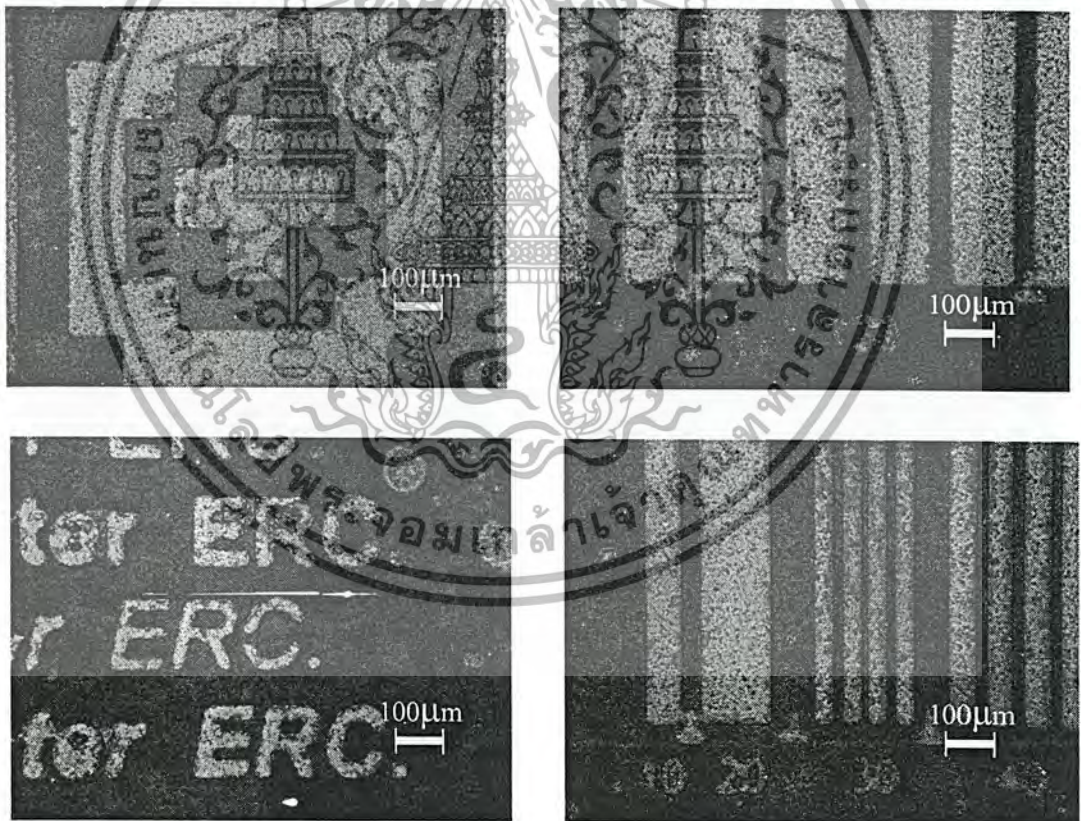
เตรียมสารละลายที่จะใช้กัด โดยจะใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ คนให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที

ทดลองจุ่มแผ่นซิลิคอนที่เตรียมไว้ลงในสารละลายโดยในขณะที่ทำการสร้างพอร์สซิลิคอนนั้นได้ทำการฉายแสงด้วยหลอดทั้งสแตนขนาด 60 วัตต์ที่ความเข้มแสง 30,000 lux ด้วย แล้วสังเกตผล

5.2.3 ผลการทดลอง

5.2.3.1 ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์ซเซิลิคอนด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350

จากการทดลองจะเห็นว่าในบริเวณที่มีน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 เคลือบอยู่ที่ความเร็วรอบต่างๆ จะไม่มีการเกิดชั้นพอร์ซเซิลิคอนเกิดขึ้น แต่จะมีการกัดเซาะขอบของชั้นป้องกันไปบ้าง โดยในบริเวณลวดลายของน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 ที่มีขนาดเล็กๆ ขนาด 10 และ 20 ไมครอน ลวดลายที่เกิดขึ้นจะไม่แยกจากกันตั้งแต่ชั้นตอนการกัดลวดลาย แต่ถ้าชั้นน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 มีขนาดใหญ่กว่า 30 ไมครอน ลวดลายจะแยกออกจากกันชัดเจนและสามารถทนต่อการถูกกัดกร่อนจากสารละลายได้ โดยในการทดลองที่ทำการสปินน้ำยาดังกล่าวด้วยความเร็วรอบสูงอาจมีการหลุดร่อนของน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 บ้างเล็กน้อย เพราะน้ำยาไวแสงจะบางกว่ากรณีที่ทดลองสปินที่ความเร็วรอบต่ำกว่า



รูปที่ 5.7 พอร์ซเซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่มีชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350

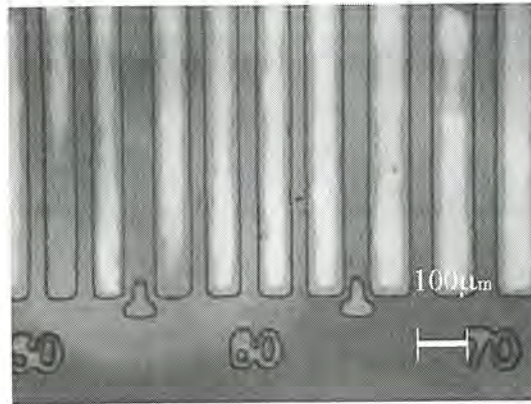
5.2.3.2 ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 และทำการลอกชั้นอลูมิเนียมด้วยกรดกัดอลูมิเนียมก่อนทำการสร้างพอร์สซิติคอน

จากการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 หลังจากทำการจุ่มแผ่นซิติคอนลงในกรดกัดอลูมิเนียมเป็นเวลา 30 วินาทีแล้ว จะเห็นว่าอลูมิเนียมในบริเวณที่ไม่มีการเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 จะถูกกัดออกไปจนมองเห็นชั้นของซิติคอน

จากนั้นเมื่อทำการจุ่มแผ่นซิติคอนลงในสารละลาย สังเกตเห็นว่ามีเกิดการเกิดขึ้นพอร์สซิติคอนในบริเวณที่ไม่มีการเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 โดยในการทดลองสปีนที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที และ 3,000 รอบต่อนาที เมื่อทำการสร้างชั้นพอร์สซิติคอนเป็นเวลา 40 วินาทีแล้วลวดลายที่สร้างขึ้นด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงจะยังคงอยู่ แต่ที่ทำการทดลองสปีนที่ความเร็วรอบ 4,000 รอบต่อนาที และ 5,000 รอบต่อนาที เมื่อทำการสร้างชั้นพอร์สซิติคอนเป็นเวลา 40 วินาทีแล้วลวดลายที่สร้างขึ้นด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงจะหลุดออกไป

ความเร็วรอบในการสปีน (รอบ/นาที)	ความหนาของน้ำยาไวแสง		ความสามารถการสร้างลวดลายโดยการกัดพอร์ส ที่เวลา 40 วินาที	
	Data sheet	ERC	Al/Si	Al _{sintering} /Si
2,000	7,000	-	Yes	Yes
3,000	5,700	-	Yes	Yes
4,000	5,000	-	No	No
5,000	4,500	-	No	No

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 และทำการลอกชั้นอลูมิเนียมด้วยกรดกัดอลูมิเนียมก่อนทำการสร้างพอร์สซิติคอน



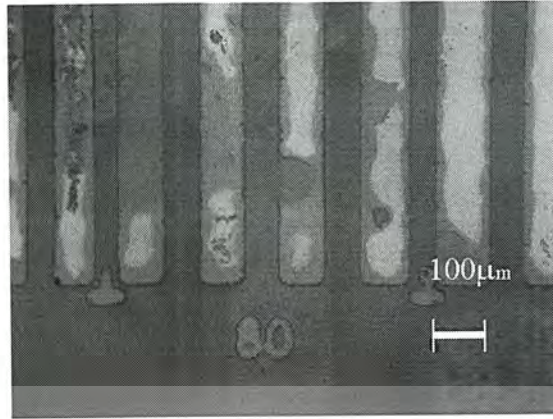
รูปที่ 5.8 พอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบ อลูมิเนียมที่มีชั้นป้องกันการเกิดพอร์ส ที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที

5.2.3.3 ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350

จากการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบ อลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 หลังจากทำการจุ่มแผ่นซิลิคอนลงในสารละลาย เมื่อทำการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นเวลา 40 วินาทีแล้ว ลวดลายที่สร้างขึ้นด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงจะหลุดออกไป

ความเร็วรอบในการ สปิน (รอบ/นาที)	ความหนาของน้ำยาไวแสง		ความสามารถการสร้างลวดลายโดยการกัด พอร์ส ที่เวลา 40 วินาที	
	Data sheet	ERC	Al/Si	Al _{sintering} /Si
2,000	7,000	-	No	No
3,000	5,700	-	No	No
4,000	5,000	-	No	No
5,000	4,500	-	No	No

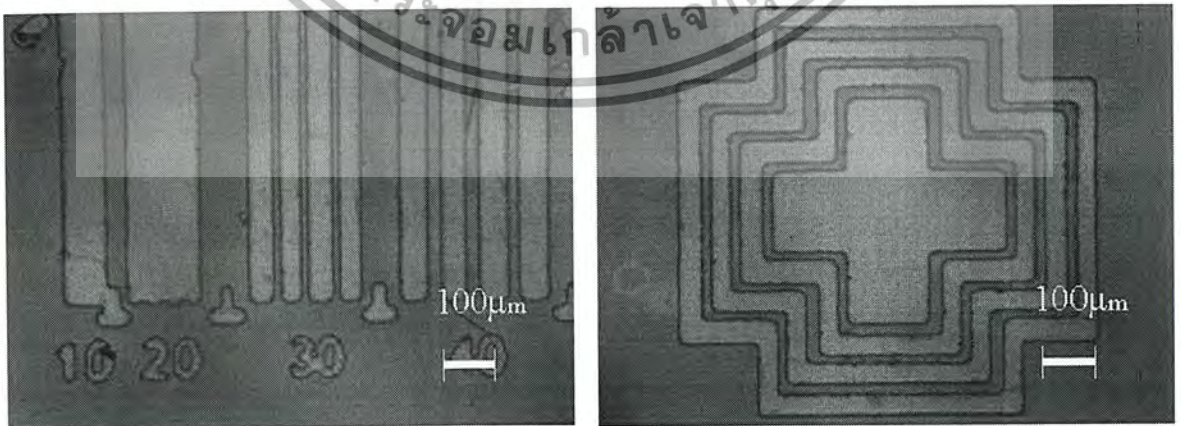
ตารางที่ 5.3 ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบ อลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350



รูปที่ 5.9 การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350

5.2.3.4 ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818

จากการทดลองจะเห็นว่าในบริเวณที่มีน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 เคลือบอยู่ที่ความเร็วรอบต่างๆ จะไม่มีการเกิดชั้นพอร์สซิลิคอนเกิดขึ้น แต่จะมีการกัดเซาะขอบของชั้นป้องกันไปบ้าง โดยในบริเวณลวดลายของน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 ที่มีขนาดเล็กๆ ขนาด 10 และ 20 ไมครอน ลวดลายที่เกิดขึ้นจะไม่แยกจากกันตั้งแต่ขั้นตอนการกัดลวดลาย แต่ถ้าใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 มีขนาดใหญ่กว่า 30 ไมครอน ลวดลายจะแยกออกจากกันชัดเจนและสามารถทนต่อการถูกกัดกร่อนจากสารละลายได้



รูปที่ 5.10 การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

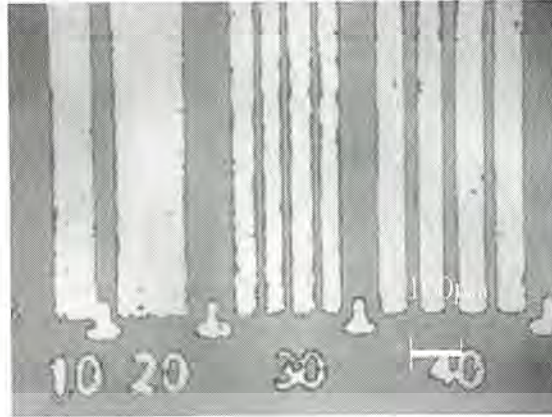
5.2.3.5 ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 และทำการลอกชั้นอลูมิเนียมด้วยกรดกัดอลูมิเนียมก่อนทำการสร้างพอร์สซิติคอน

จากการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 หลังจากทำการจุ่มแผ่นซิติคอนลงในกรดกัดอลูมิเนียมเป็นเวลา 30 วินาทีแล้ว จะเห็นว่าอลูมิเนียมในบริเวณที่ไม่มีการเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 จะถูกกัดออกไปจนมองเห็นชั้นของซิติคอน

จากนั้นเมื่อทำการจุ่มแผ่นซิติคอนลงในสารละลาย สังเกตเห็นว่ามีเกิดการเกิดขึ้นพอร์สซิติคอนในบริเวณที่ไม่มีการเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 โดยในการทดลองสปินที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที , 4,000 รอบต่อนาที และ 3,000 รอบต่อนาที เมื่อทำการทดลองสร้างชั้นพอร์สซิติคอนเป็นเวลา 40 วินาทีแล้วลวดลายที่สร้างขึ้นด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงจะยังคงอยู่

ความเร็วรอบในการสปิน (รอบ/นาที)	ความหนาของน้ำยาไวแสง		ความสามารถการสร้างลวดลายโดยการกัดพอร์ส ที่เวลา 40 วินาที	
	Data sheet	ERC	Al/Si	Al _{sintering} /Si
3,000	21,000	16,500	Yes	Yes
4,000	19,000	14,500	Yes	Yes
5,000	17,000	13,000	Yes	Yes

ตารางที่ 5.4 ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818



รูปที่ 5.11 รูปการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 และทำการลอกชั้นอลูมิเนียมด้วยกรดกัดอลูมิเนียมก่อน

5.2.3.6 ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818

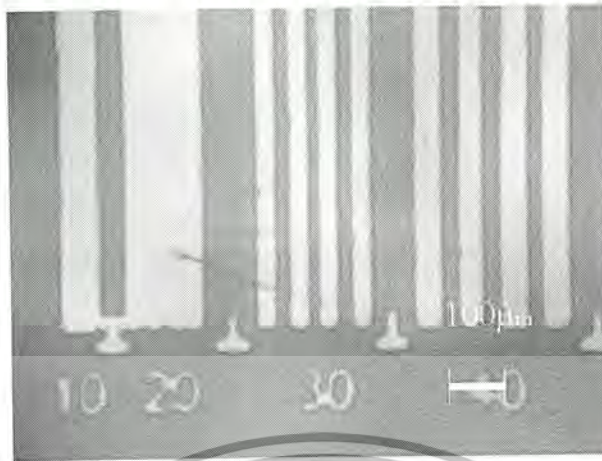
จากการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 เมื่อทำการจุ่มแผ่นซิติคอนลงในสารละลาย สังเกตเห็นว่ามีการกัดชั้นอลูมิเนียมจนหมด และมีการเกิดชั้นพอร์สซิติคอนในบริเวณที่ไม่มีการเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818 โดยในการทดลองสปินที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที, 4,000 รอบต่อนาที และ 5,000 รอบต่อนาที เมื่อทำการสร้างชั้นพอร์สซิติคอนเป็นเวลา 40 วินาทีแล้วลวดลายที่สร้างขึ้นด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงจะยังคงอยู่

ความเร็วรอบในการสปิน (รอบ/นาที)	ความหนาของน้ำยาไวแสง		ความสามารถการสร้างลวดลายโดยการกัดพอร์ส ที่เวลา 40 วินาที	
	Data sheet	ERC	Al/Si	Al _{sintering} /Si
3,000	21,000	16,500	Yes	Yes
4,000	19,000	14,500	Yes	Yes
5,000	17,000	13,000	Yes	Yes

ตารางที่ 5.5 ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิติคอนบนแผ่นซิติคอนด้วยชั้นป้องกัน

การเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 รูปการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1818

5.2.3.7 ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 โดยทำการเคลือบน้ำยาไวแสงหลายชั้น

จากการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350 โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงหลายชั้น เมื่อทำการจุ่มแผ่นซิลิคอนลงในสารละลาย สังเกตเห็นว่ามี การกักชั้นอลูมิเนียมจนหมด และมีการเกิดชั้นพอร์สซิลิคอนในบริเวณที่ไม่มีการเคลือบด้วยน้ำยาไวแสง โดยในการทดลองสปีดที่ความเร็วรอบ 3,000/3,000 รอบต่อนาที, 3,000/2,000 รอบต่อนาที, 2,000/2,000 รอบต่อนาที และ 3,000/3,000/2,000รอบต่อนาที เมื่อทำการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นเวลา 40 วินาที แล้วลวดลายที่สร้างขึ้นด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงจะยังคงอยู่

นอกจากนี้ยังพบว่า การเกิดพอร์สซิลิคอนจะเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่เคลือบอลูมิเนียม โดยสังเกตว่าความพรุนของพอร์สซิลิคอนที่เวลาการสร้างเท่ากัน การสร้างบนแผ่นซิลิคอนที่เคลือบอลูมิเนียมจะมีความพรุนมากกว่า

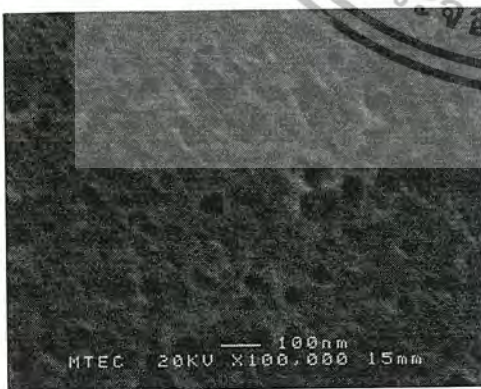
ความเร็วรอบในการสปิน (รอบ/นาที)			ความหนาของ น้ำยาไวแสง (Å)	การสร้างลวดลายที่เวลา 40 วินาที	
ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3		Al/Si	Alsintering/Si
3,000	3,000	-	> 5,700	No	No
3,000	2,000	-	> 5,700	Yes (40 µm)	Yes (40 µm)
2,000	2,000	-	> 7,000	Yes (40 µm)	Yes (40 µm)
3,000	3,000	2,000	> 5,700	Yes (40 µm)	Yes (40 µm)

ตารางที่ 5.6 ผลการทดลองการเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบ
อลูมิเนียม ด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az เบอร์ 1350
โดยทำการคลื่อน้ำยาไวแสงหลายชั้น

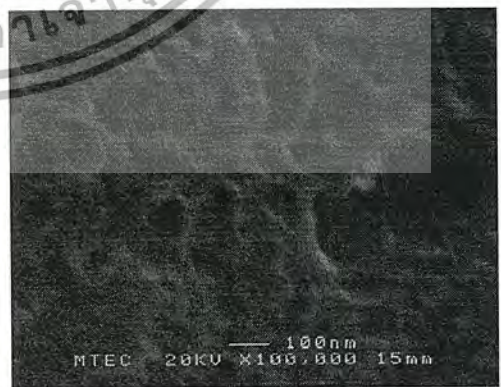


สร้างบนแผ่นซิลิคอนที่เวลา 40 วินาที

สร้างบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบ
อลูมิเนียมที่เวลา 40 วินาที



สร้างบนแผ่นซิลิคอนที่เวลา 60 วินาที



สร้างบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบ
อลูมิเนียมที่เวลา 60 วินาที

รูปที่ 5.13 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ได้จากการกัดข้อมสึด้วยเครื่อง SEM-
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 การทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อน

5.3.1 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อน เพื่อศึกษาผลที่ได้จากการใช้พอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนบนเซลล์แสงอาทิตย์

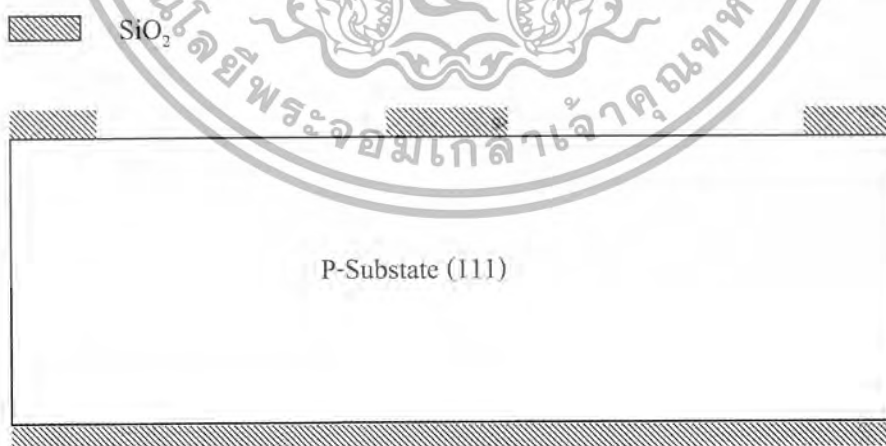
5.3.2 การทดลอง

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จะทำการสร้างเซลล์แบบที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนและเซลล์ที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนในครั้งเดียวกัน

- นำแผ่นซิลิคอนชนิด P ระบาย (111) ความต้านทาน 3-5 Ω -cm และ 6-12 Ω -cm มาทำความสะอาดด้วยกระบวนการมาตรฐาน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเป็นฝุ่นละออง เศษโลหะ หรือคราบไขมันต่างๆ ที่ผิวของแผ่นผลึก

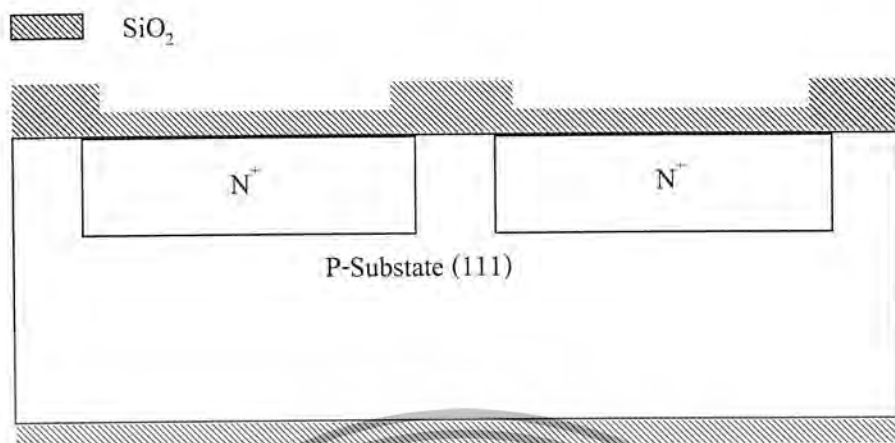
- ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ชั้นที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยกระบวนการออกซิเดชันแบบ Dry - Wet - Dry เพื่อใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือ (Diffusion mask of impurity atoms) ในขั้นตอนของการสร้างรอยต่อพี-เอ็นในส่วนพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ใช้อุณหภูมิเตา 1,050°C, อุณหภูมิน้ำ 90°C ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 5,500 Å

- ทำการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 1 เพื่อเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ในบริเวณที่จะสร้างเป็นรอยต่อพี-เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์ จากนั้นทำการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออก และทำการลอกน้ำยาไวแสงออก

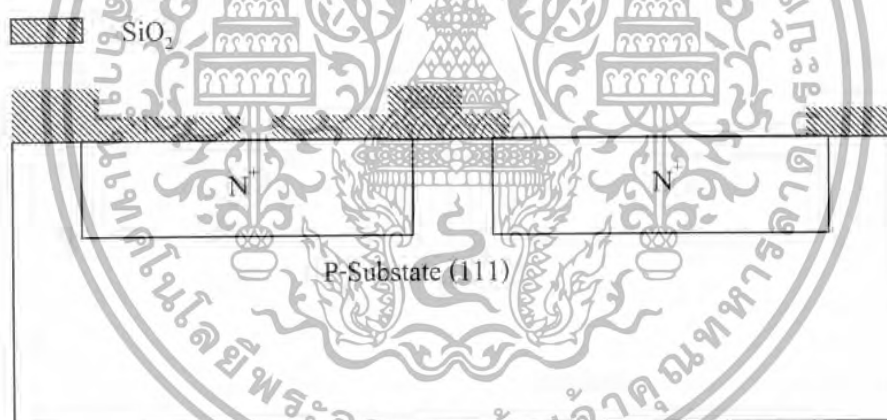


- ทำการสร้างรอยต่อพี-เอ็นส่วนที่เป็นพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่เข้มข้น (N^+) โดยเทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือของฟอสฟอรัสเข้าไปในสารกึ่งตัวนำฐานรองชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

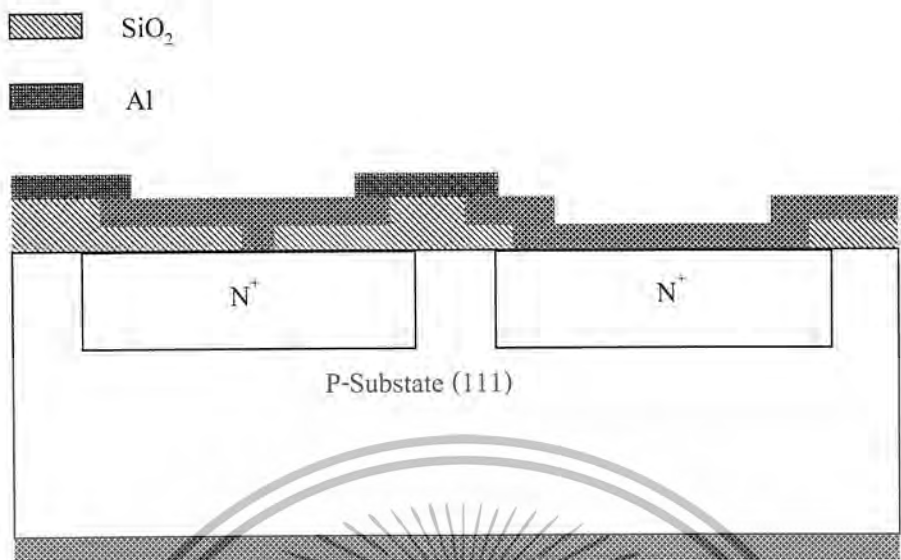


- ทำการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 2 เพื่อเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ในบริเวณที่จะสร้างขั้วต่อโลหะ โดยในผังที่จะสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นสกรูวสะท้อนจะทำการลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกทั้งหมด

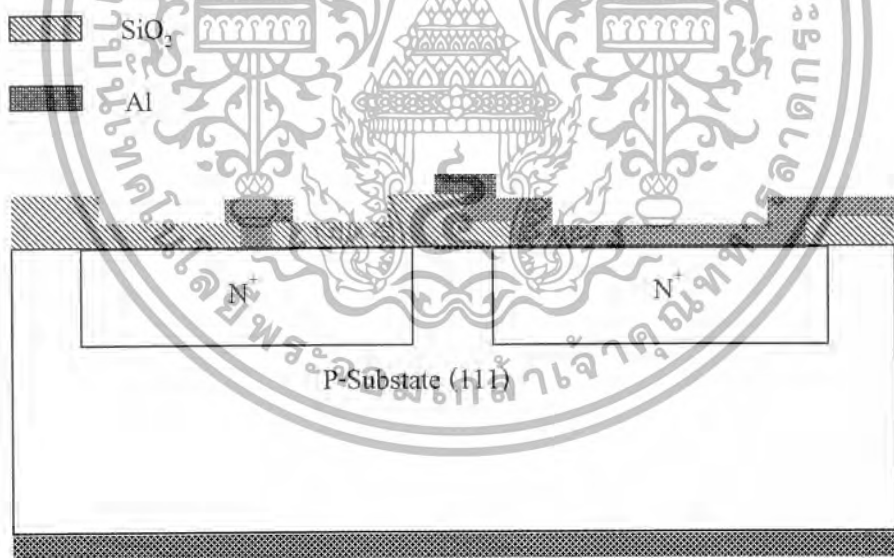


- ทำการเคลือบอลูมิเนียมด้วยกระบวนการ Evaporation โดยจะได้ชั้นอลูมิเนียมมีความหนา 1 μm ทั้งด้านหน้าและด้านหลัง

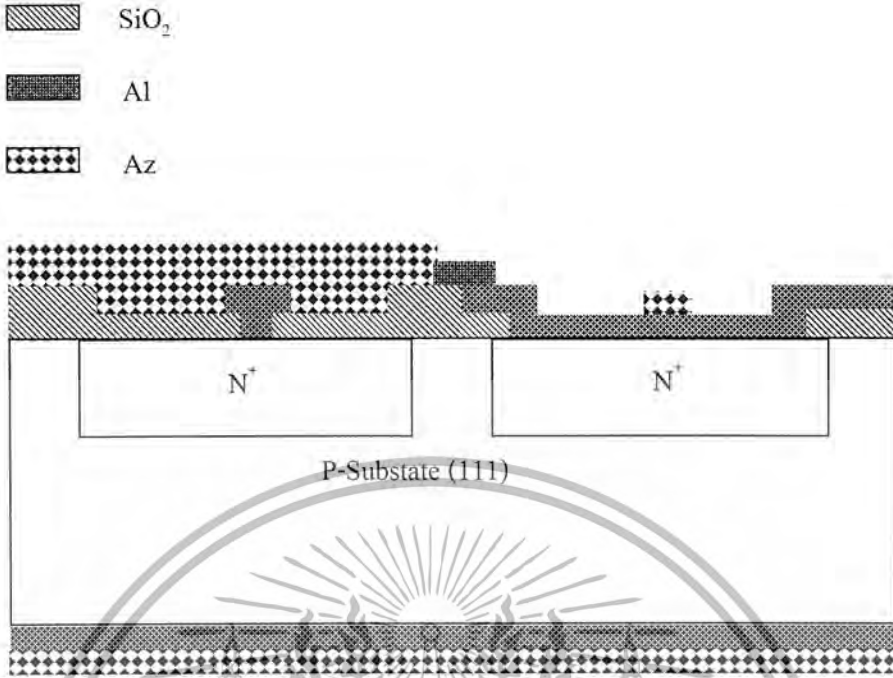
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



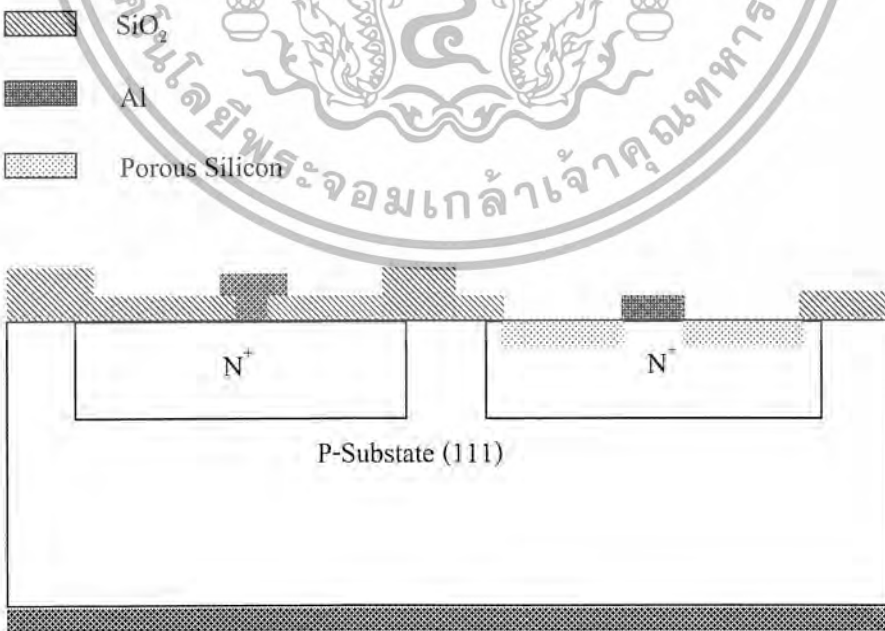
- ทำการเปิดชั้นของอลูมิเนียมด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 3 เพื่อลอกชั้นอลูมิเนียมที่ไม่ต้องการออก ให้เหลือแต่บริเวณหัวต่ออลูมิเนียม และอลูมิเนียมในส่วนของเซลล์ที่จะสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นขั้นตอนการสะท้อน



- ทำการสร้างชั้นป้องกันด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az 1818 เพื่อทำการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนในบริเวณที่ต้องการ โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 4 โดยในส่วนของเซลล์ที่มีซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนจะทำการสร้างชั้นป้องกันปิดไว้ทั้งหมด



- ทำการสร้างพอร์สซิลิคอนในบริเวณที่ต้องการ โดยสารละลายจะทำกรกัดทะลุชั้น อลูมิเนียมไปถึงชั้นของซิลิคอนจนเป็นพอร์สซิลิคอน ก็จะได้เซลล์แสงอาทิตย์แบบที่มีชั้นซิลิคอนได ออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อน และแบบที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนอยู่บนฐานรอง เดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 ผลการทดลอง

- นำเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างได้มาทดลองการเรืองแสงภายใต้แสง Black Light จะพบว่า มีเฉพาะเซลล์ส่วนที่ทำการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงเท่านั้นที่สามารถเรืองแสงได้ โดยจะมีการเรืองแสงเห็นเป็นสีส้มออกมาซึ่งแสดงให้เห็นว่าบริเวณนั้นได้เกิดพอร์สซิลิคอนจริง

รูปที่ 5.14 แสดงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอนและซิลิคอน ไดออกไซด์ เป็นชั้นลดการสะท้อน สร้างบนฐานรองเดียวกัน



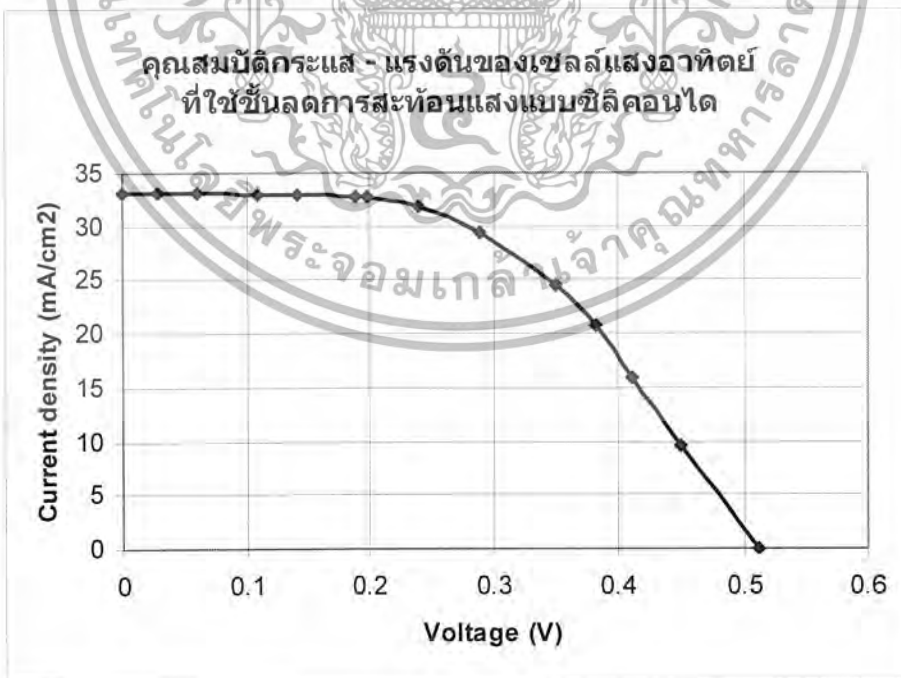
รูปที่ 5.15 การเรืองแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อน

นำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ไปวัดคุณสมบัติต่าง ๆ และทำการเปรียบเทียบได้ดังนี้
**คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ ที่สร้างจากแผ่น
 ฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω-cm**

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะเปิดวงจร (I_{sc})	=	16.6 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.512 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	=	8.5 mW
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	33.2 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	12.3 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.35 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	4.31 mW
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.)	=	0.51
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	10.36 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.5 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c

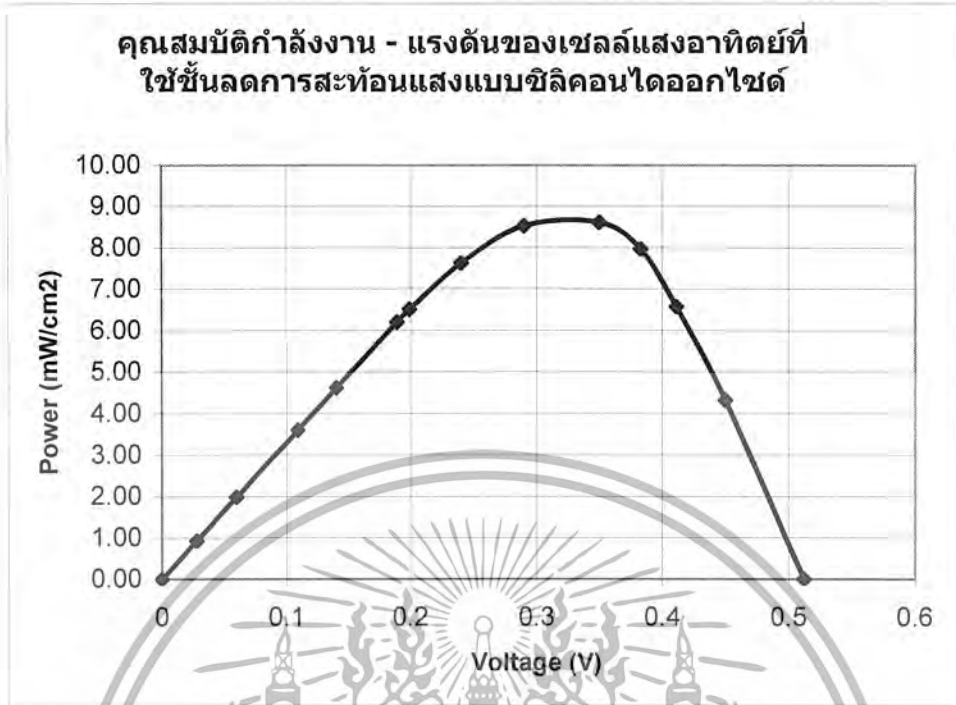
ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอน ไดออกไซด์หนาประมาณ 1000 อังสตรอม

คุณสมบัติกระแส - แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์
 ที่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนได



รูปที่ 5.16 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

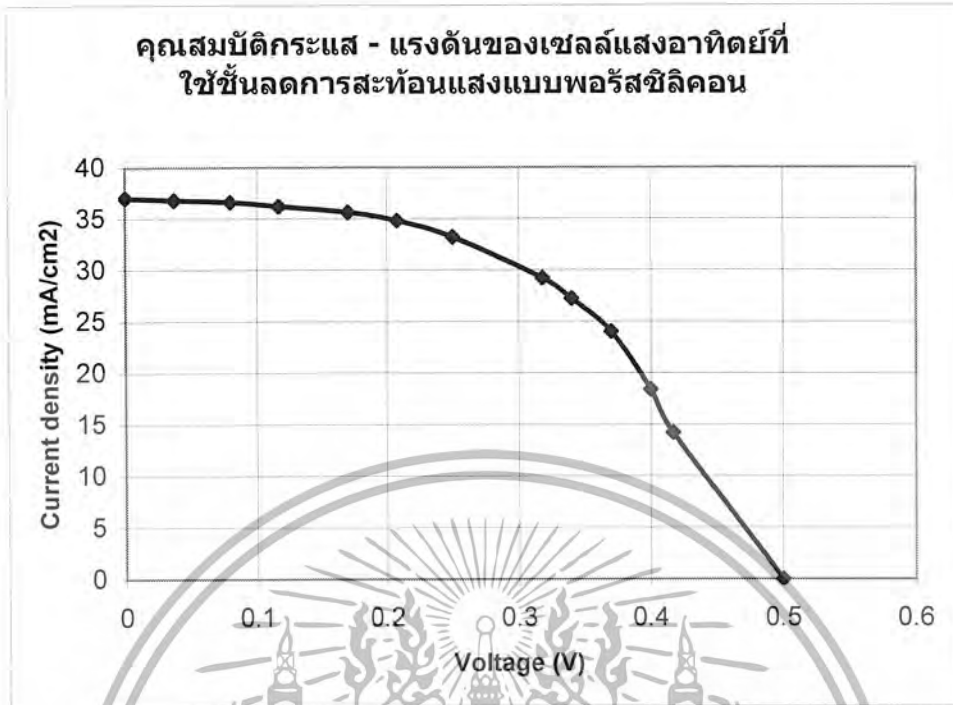
เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและเผยแพร่ความรู้ทางวิชาการ
 เป็นข้อมูลการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω-cm ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



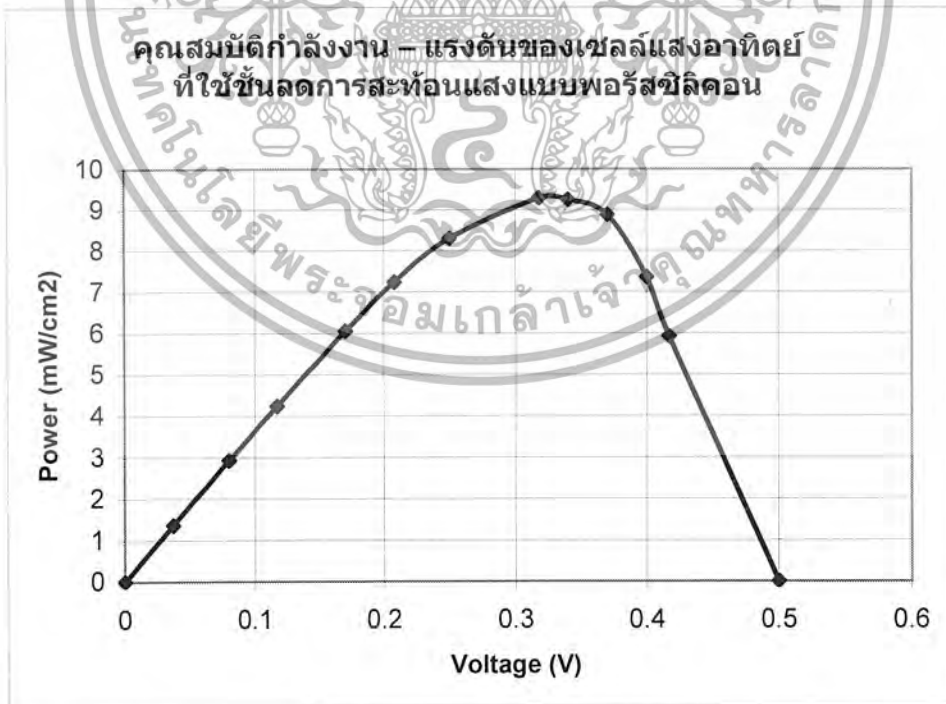
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงาน และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω -cm คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบพอร์ซิลิคอน (71p)

ความเข้มแสง	=	125,000 lx
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	18.5 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.5 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	=	9.25 mW
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	37 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	14.6 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.318 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	4.64 mW
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.)	=	0.5
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	11.15 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.5 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c
ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นชั้นพอร์ซิลิคอน		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.18 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω -cm

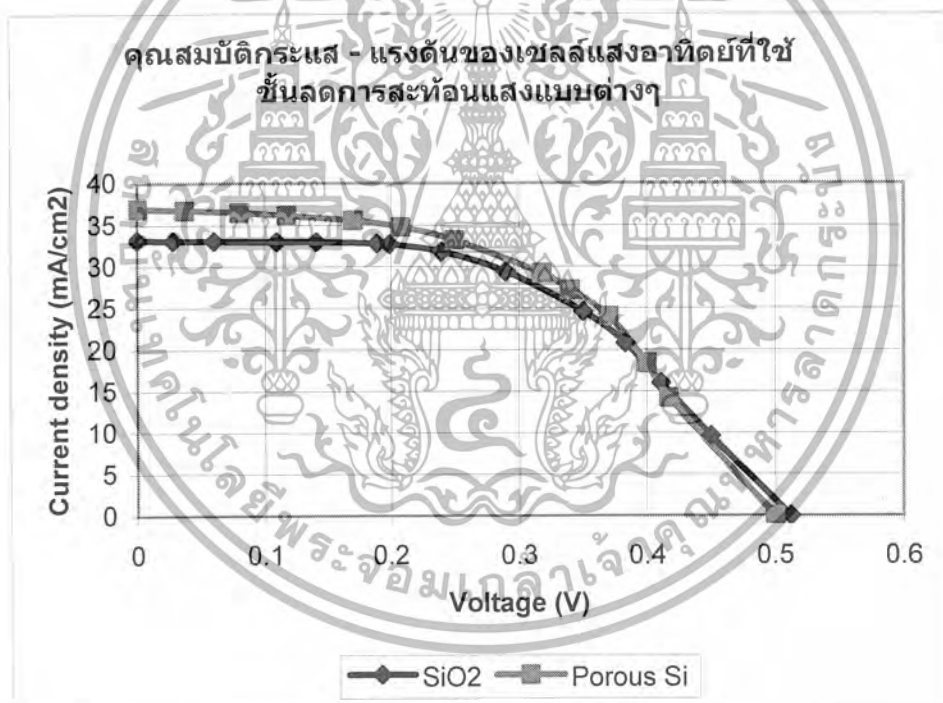


รูปที่ 5.19 กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงาน และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω -cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

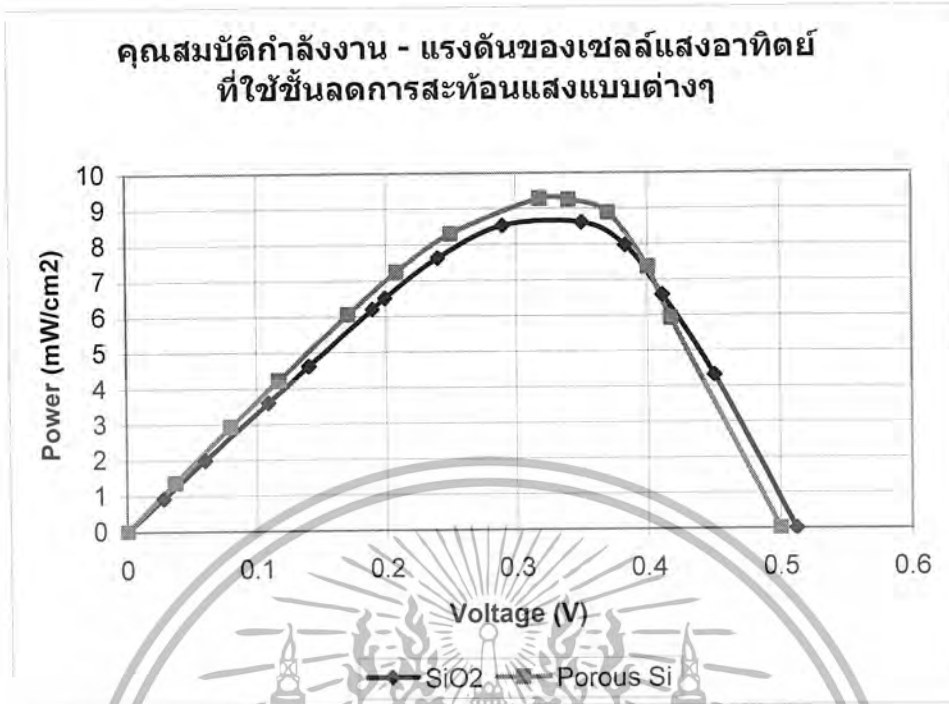
ARC	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	P_0 (mW)	J_{sc} (mA/cm ²)	I_m (mA)	V_m (V)	P_m (mW)	F.F.	Eff. (%)
SiO ₂	16.6	0.512	8.5	33.2	12.3	0.35	4.31	0.51	10.36
Porous Si	18.5	0.5	9.25	37	14.6	0.318	4.64	0.5	11.15
% การเปลี่ยนแปลง	+11.45	-2.34	+8.82	+11.45	+18.7	-9.14	+7.66	-1.96	+7.63

ตารางที่ 5.7 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์ซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω-cm



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

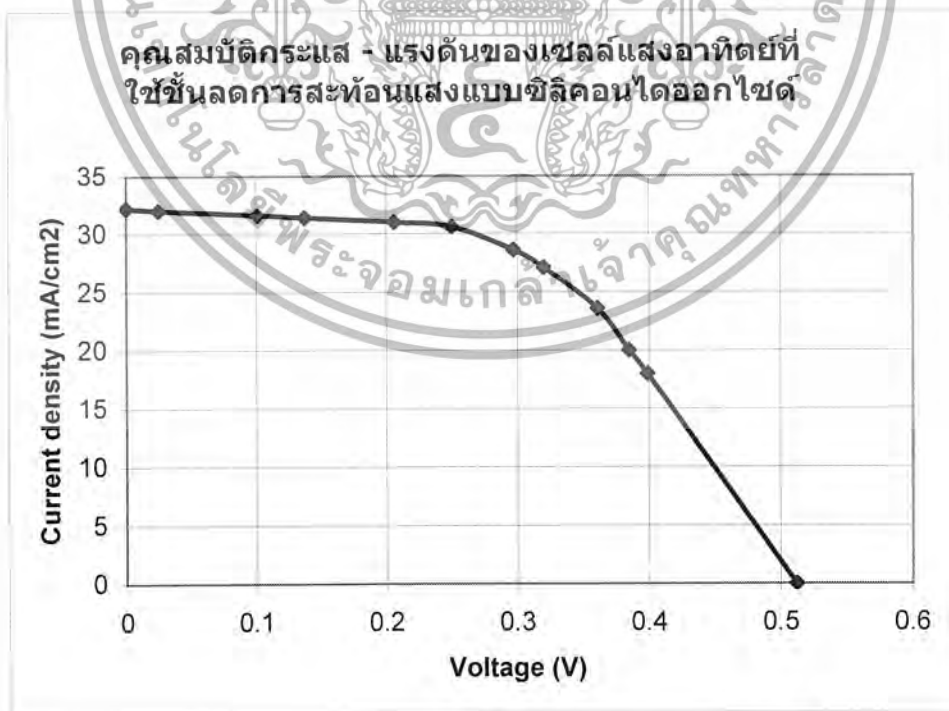


- รูปที่ 5.20 (ก) กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์ตซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน $3-5 \Omega\text{-cm}$
- (ข) กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์ตซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน $3-5 \Omega\text{-cm}$

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ ที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 6-12 Ω-cm

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	16.1 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.512 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	=	8.24 mW
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	32.2 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	13.6 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.32 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	4.43 mW
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F.)	=	0.52
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	10.24 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.5 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c

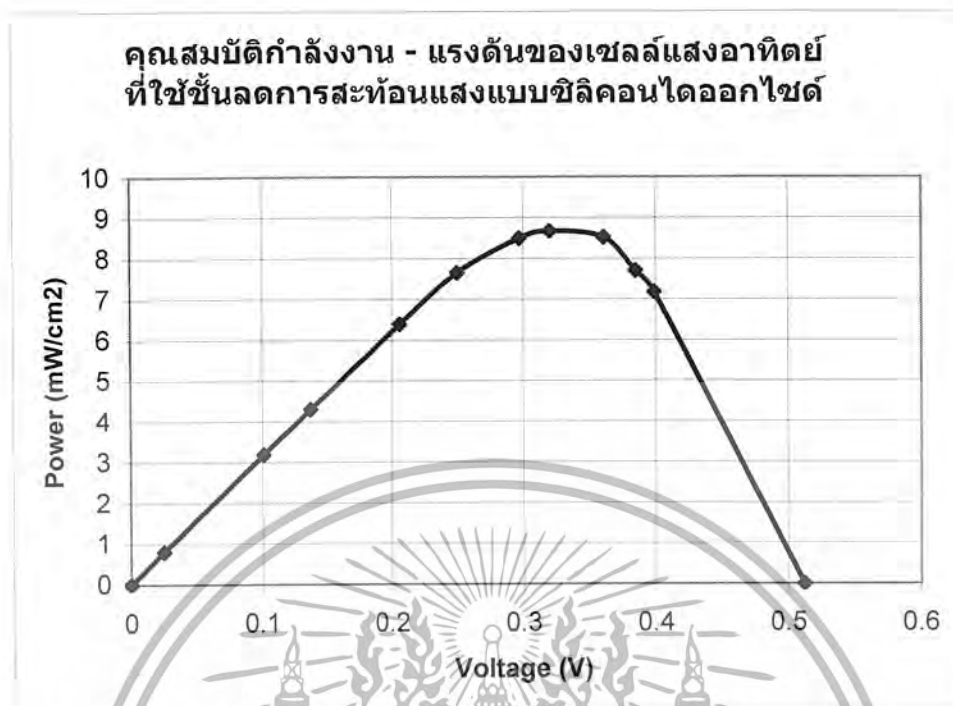
ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอน ไดออกไซด์หนาประมาณ 1000 อังสตรอม



รูปที่ 5.21 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 6-12 Ω-cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



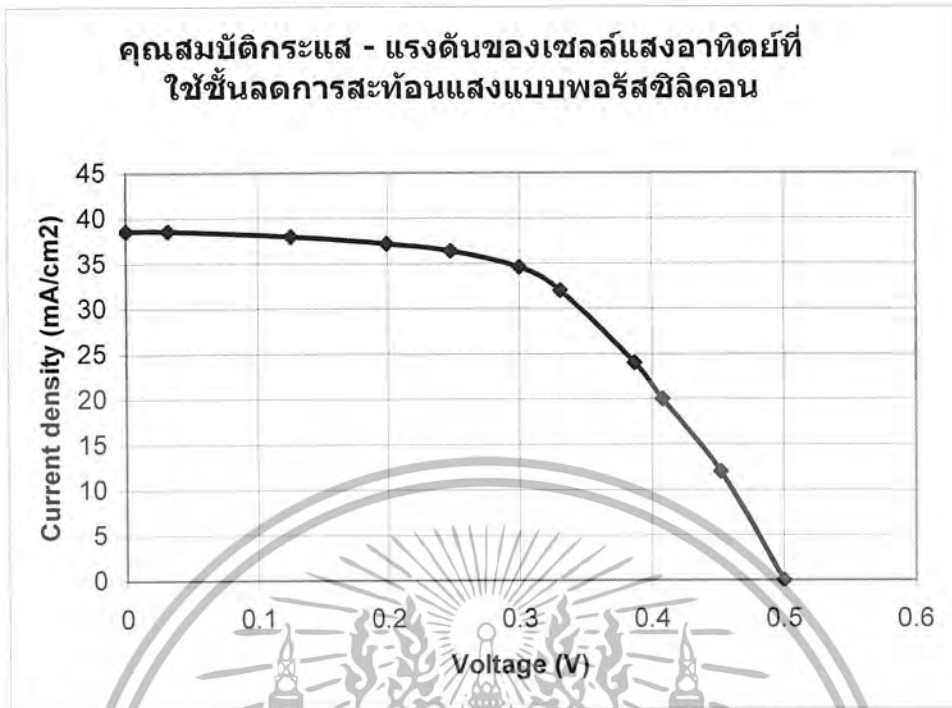
รูปที่ 5.22 กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงาน และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 6-12 Ω -cm

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบพอร์สซิลิคอน ที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 6-12 Ω -cm

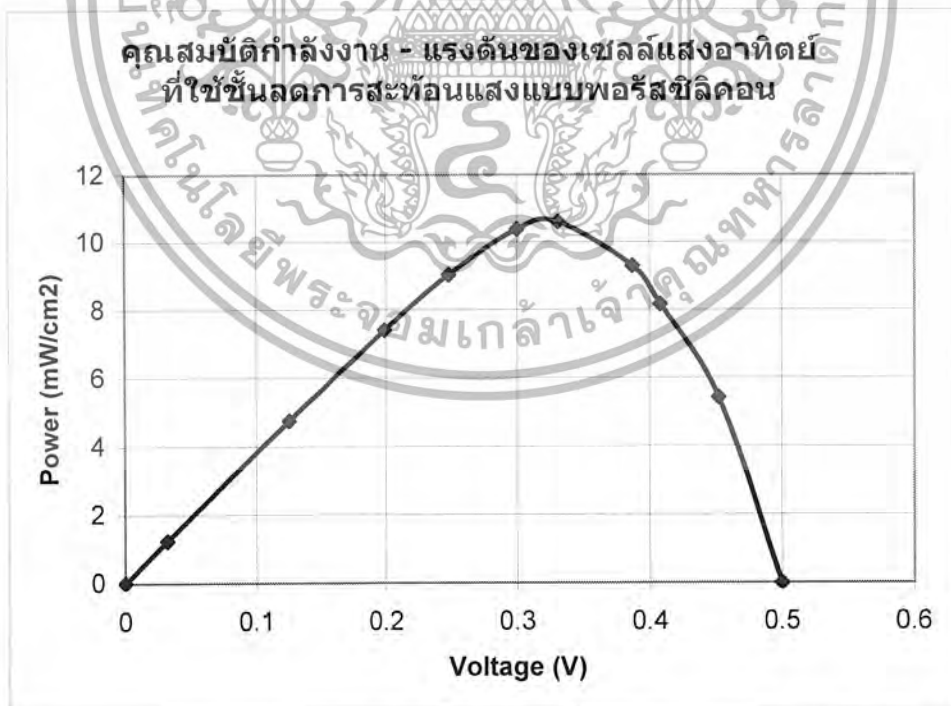
ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะเปิดวงจร (I_{sc})	=	19.3 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.5 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	=	9.65 mW
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	38.6 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	16 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.331 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	5.3 mW
ค่าฟิลแฟคเตอร์ (F.F.)	=	0.55
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	12.74 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.5 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c

ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นชั้นพอร์สซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.23 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์ซซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน $6-12 \Omega\text{-cm}$

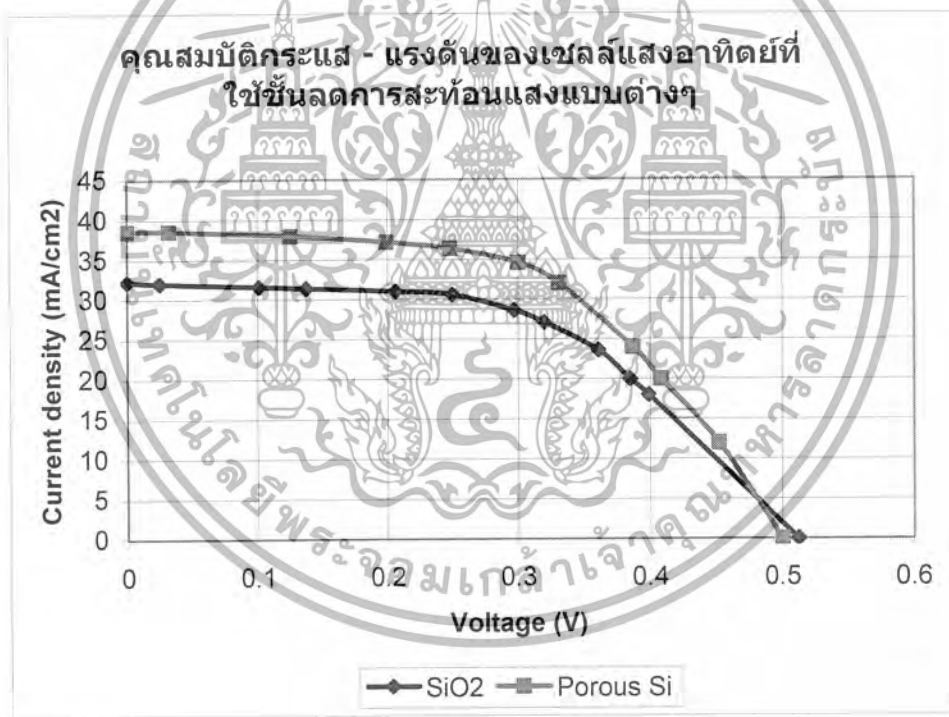


รูปที่ 5.24 กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงาน และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์ซซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน $6-12 \Omega\text{-cm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

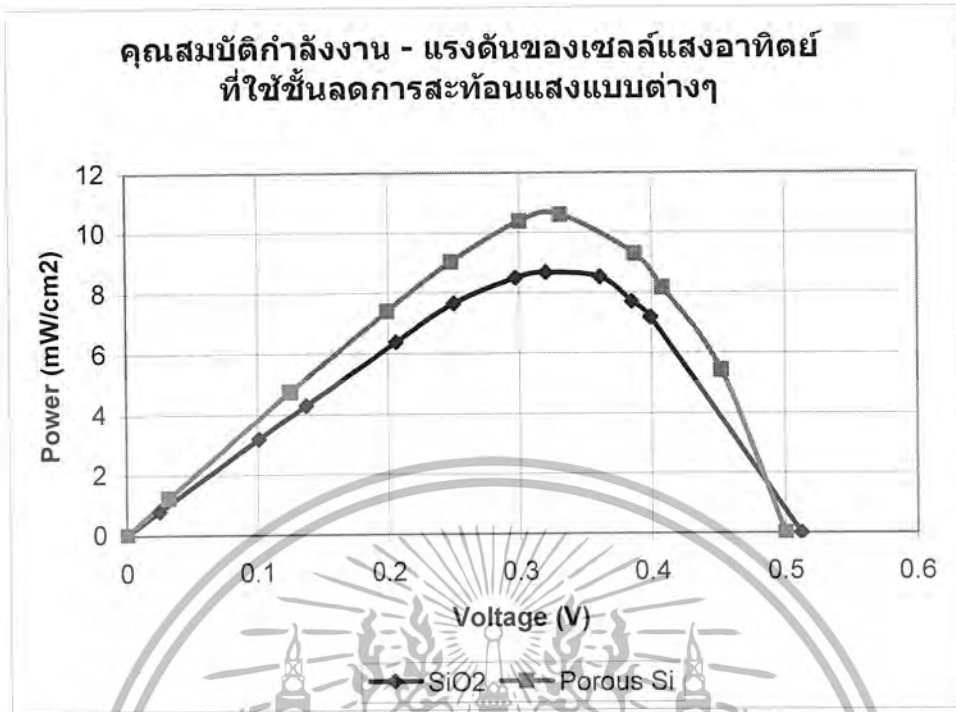
ARC	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	P_o (mW)	J_{sc} (mA/cm ²)	I_m (mA)	V_m (V)	P_m (mW)	F.F.	Eff. (%)
SiO ₂	16.1	0.512	8.24	32.2	13.6	0.32	4.43	0.52	10.24
Porous Si	19.3	0.5	9.65	38.6	16	0.331	5.3	0.55	12.74
% การเปลี่ยนแปลง	+19.88	-2.34	+17.11	+19.88	+17.65	+3.44	+19.64	+5.77	+24.41

ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 6-12 Ω-cm



(ก)

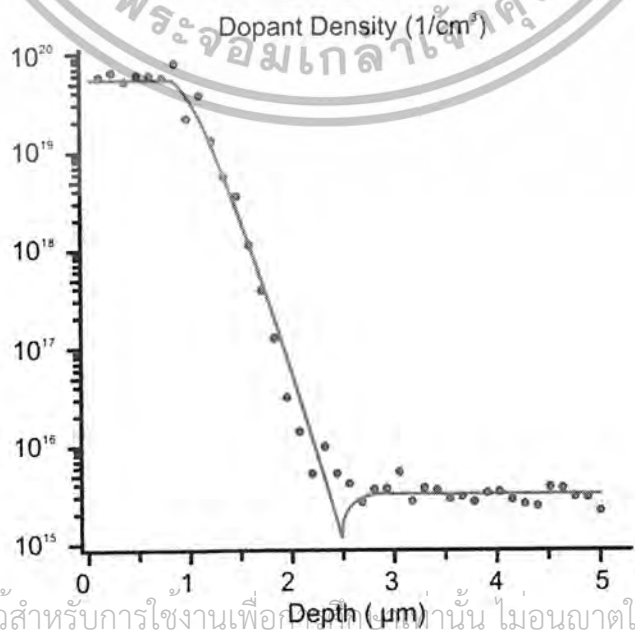
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

รูปที่ 5.25 (ก) กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์ซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 6-12 Ω-cm

(ข) กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์ซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 6-12 Ω-cm



(ข)

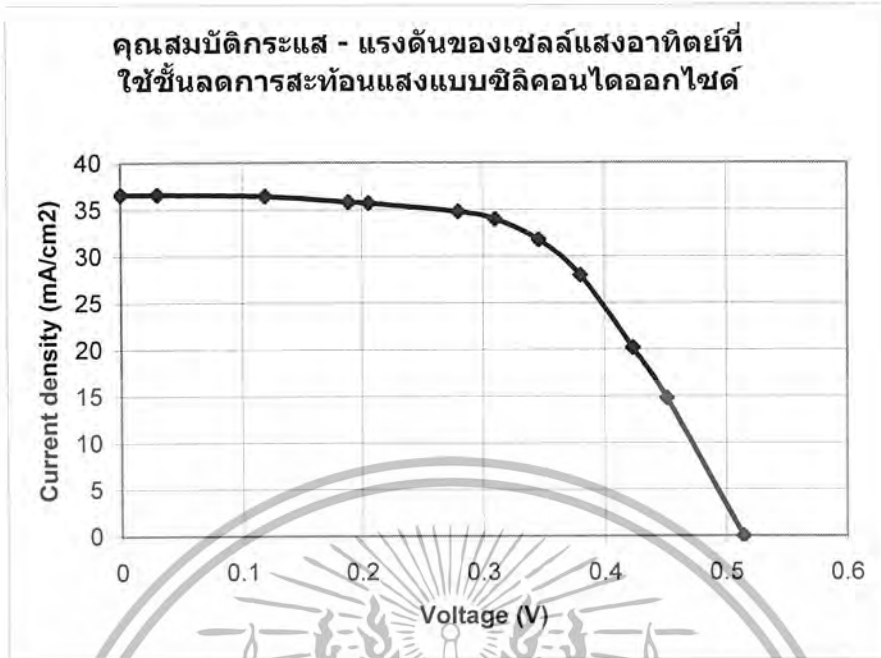
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.26 กราฟแสดง ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นที่ได้จากการวัด โดยทำการ Pre-dep 30 นาที และทำการ Drive-in 40 นาที ที่อุณหภูมิ 1050 องศาเซลเซียส ของแผ่นที่มีฐานรองที่มีสภาพต้านทาน $6-12 \Omega\text{-cm}$ ได้ความลึกรอยต่อประมาณ 1.3 ไมโครเมตร

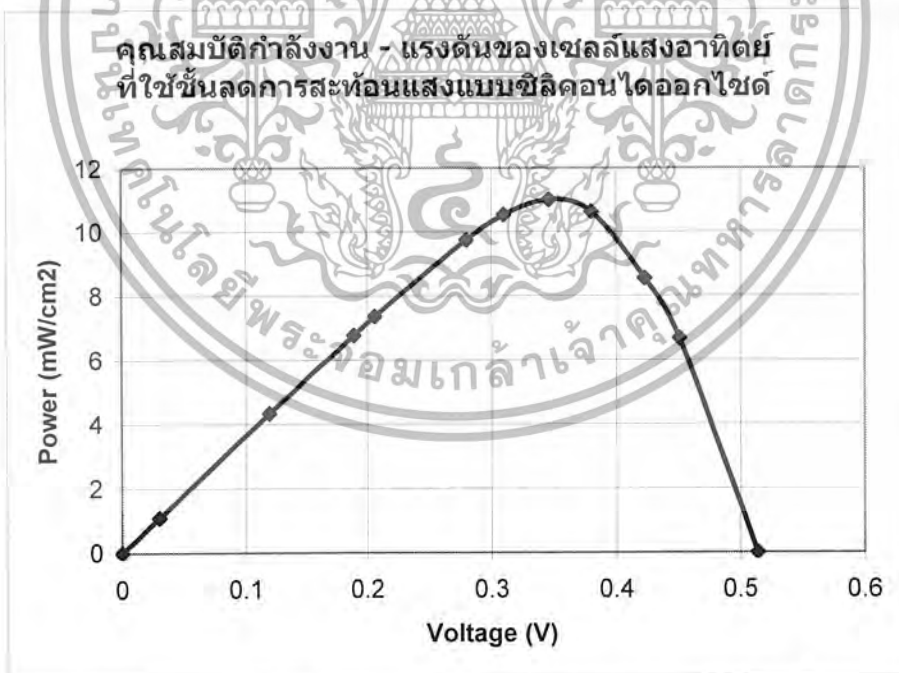
- นอกจากนี้ยัง ได้มีการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีสนามไฟฟ้าด้านหลังเพื่อทดสอบดูว่าสนามไฟฟ้าด้านหลังจะมีผลอย่างไรกับเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งได้ผลดังนี้

คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ ที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน $3-5 \Omega\text{-cm}$ ที่ทำการนับลิตรอยต่อด้านหลัง 4 ชั่วโมง

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	18.3 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.514 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_o)	=	9.41 mW
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	36.6 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	15.9 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.346 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	5.5 mW
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.)	=	0.58
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	13.22 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.5 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °c
ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 1000 อังสตรอม		



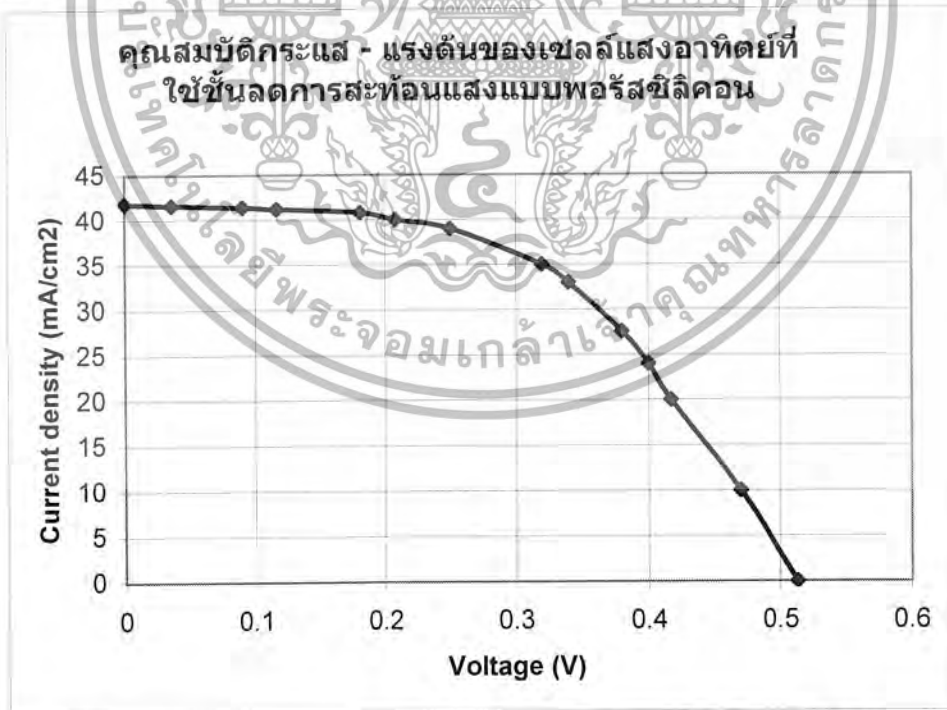
รูปที่ 5.27 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω -cm และทำการ ชั้บลิกรอยต่อด้านหลัง 4 ชั่วโมง



รูปที่ 5.28 กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงาน และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω -cm และ ทำการชั้บลิกรอยต่อด้านหลัง 4 ชั่วโมง

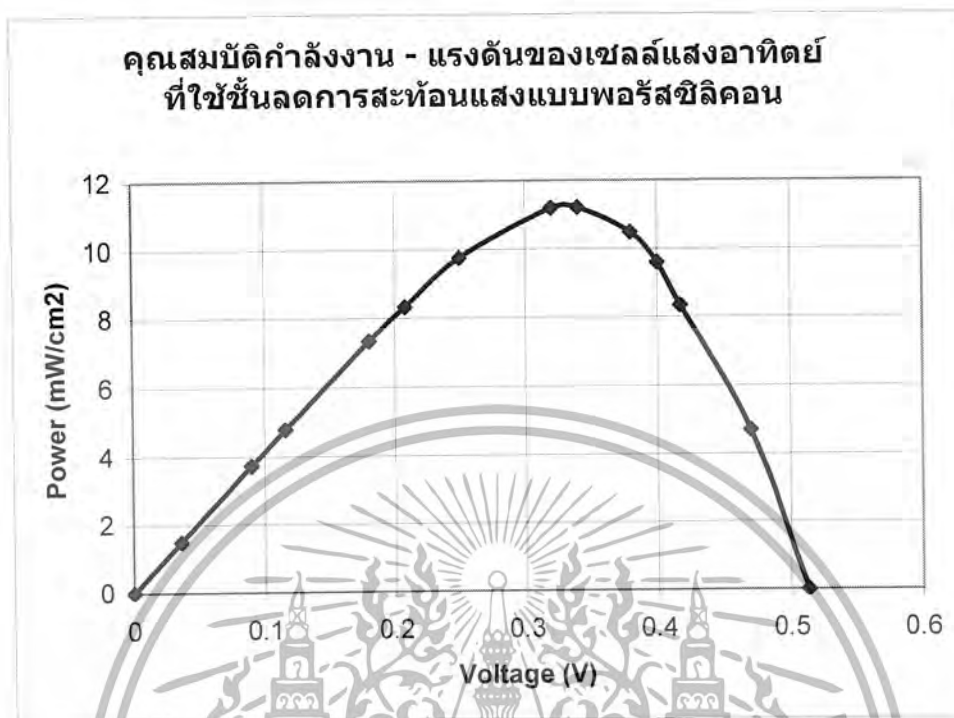
คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบพอร์สซิลิคอน ที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 $\Omega\text{-cm}$ ที่ทำการขั้วลึกรอยต่อด้านหลัง 4 ชั่วโมง

ความเข้มแสง	=	125,000 lx.
กระแสขณะลัดวงจร (I_{sc})	=	20.9 mA
แรงดันขณะเปิดวงจร (V_{oc})	=	0.513 V
พลังงานสูงสุดทางอุดมคติ (P_0)	=	10.72 mW
ความเข้มกระแส (J_{sc})	=	41.8 mA/cm ²
กระแสที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (I_m)	=	16.5 mA
แรงดันที่ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (V_m)	=	0.34 V
ค่ากำลังงานสูงสุดที่เซลล์จ่ายให้แก่โหลด (P_m)	=	5.61 mW
ค่าฟิลแฟกเตอร์ (F.F.)	=	0.52
ค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน (η)	=	13.49 %
พื้นที่รับแสงของเซลล์ (Area)	=	0.5 cm ²
อุณหภูมิ (Temp.)	=	20 °C
ชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นชั้นพอร์สซิลิคอน		



รูปที่ 5.29 กราฟแสดงคุณสมบัติกระแส และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 $\Omega\text{-cm}$ และทำการขั้วลึกรอยต่อด้านหลัง 4 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

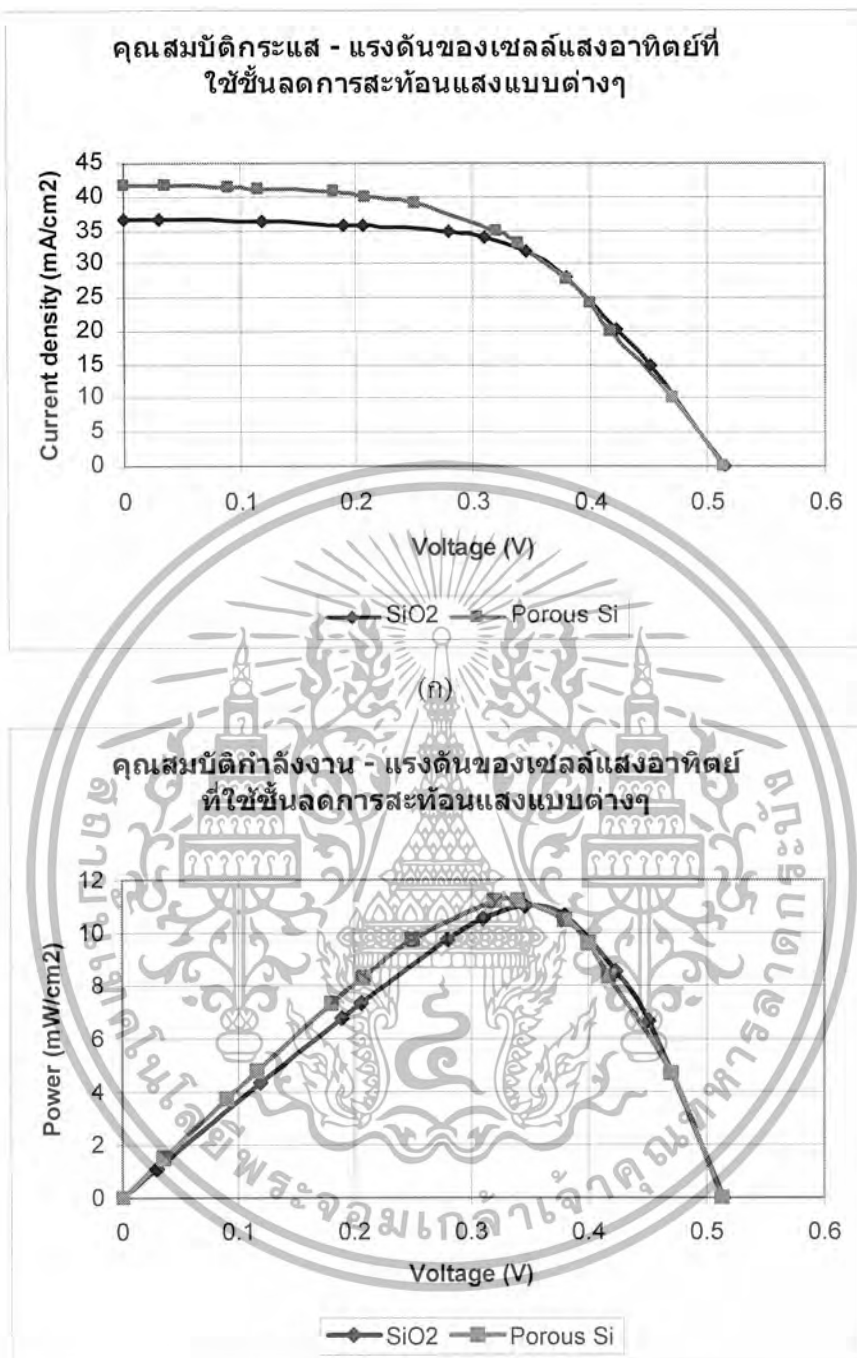


รูปที่ 5.30 กราฟแสดงคุณสมบัติกำลังงาน และแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 $\Omega\text{-cm}$ และทำการจับลึกรอยต่อด้านหลัง 4 ชั่วโมง

ARC	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	P_o (mW)	J_{sc} (mA/cm ²)	I_m (mA)	V_m (V)	P_m (mW)	F.F.	Eff. (%)
SiO ₂	18.3	0.514	9.41	36.6	15.9	0.346	5.5	0.58	13.22
Porous Si	20.9	0.513	10.72	41.8	16.5	0.34	5.61	0.52	13.49
% การเปลี่ยนแปลง	+14.21	-0.19	+13.92	+14.21	+3.77	-1.73	+2	-10.3	+2.04

ตารางที่ 5.9 ตารางแสดงเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 6-12 $\Omega\text{-cm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

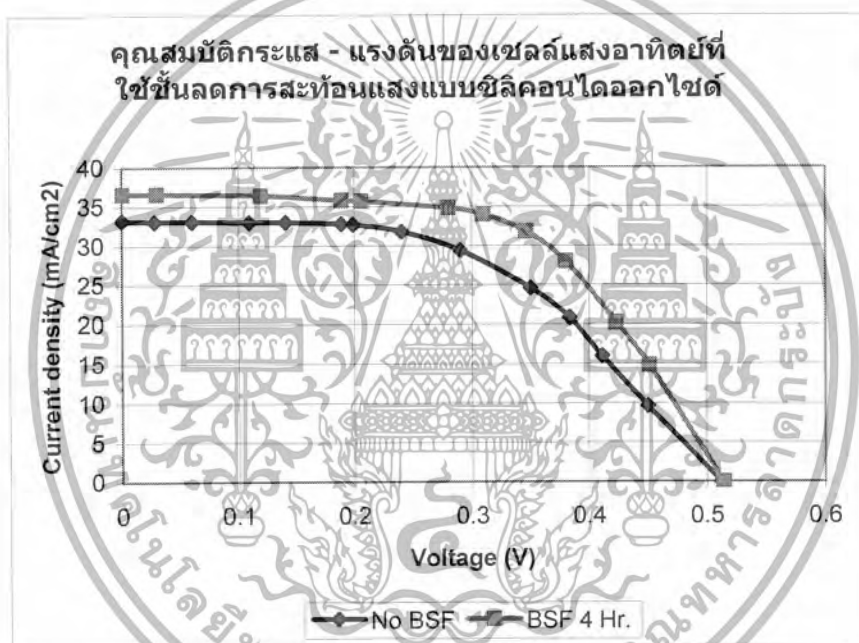
รูปที่ 5.31 (ก) กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์ซซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน $6-12 \Omega\text{-cm}$

(ข) กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์ซซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน $6-12 \Omega\text{-cm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

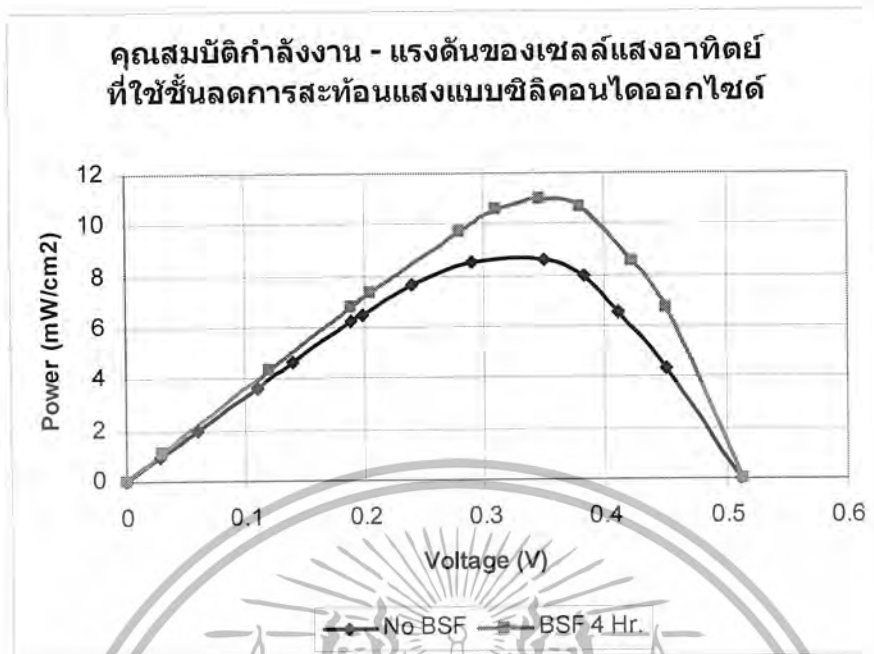
ARC	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	P_o (mW)	J_{sc} (mA/cm ²)	I_m (mA)	V_m (V)	P_m (mW)	F.F.	Eff. (%)
ไม่มี BSF	16.6	0.512	8.5	33.2	12.3	0.35	4.31	0.51	10.36
BSF 4 hr.	18.3	0.514	9.41	36.6	15.9	0.346	5.5	0.58	13.22
% การเปลี่ยนแปลง	+14.46	+0.59	+15.18	+14.46	+37.4	+1.16	+37.35	+19.6	+37.36

ตารางที่ 5.10 ตารางแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ โดยมีสนามไฟฟ้าด้านหลังที่เวลาต่างๆ



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

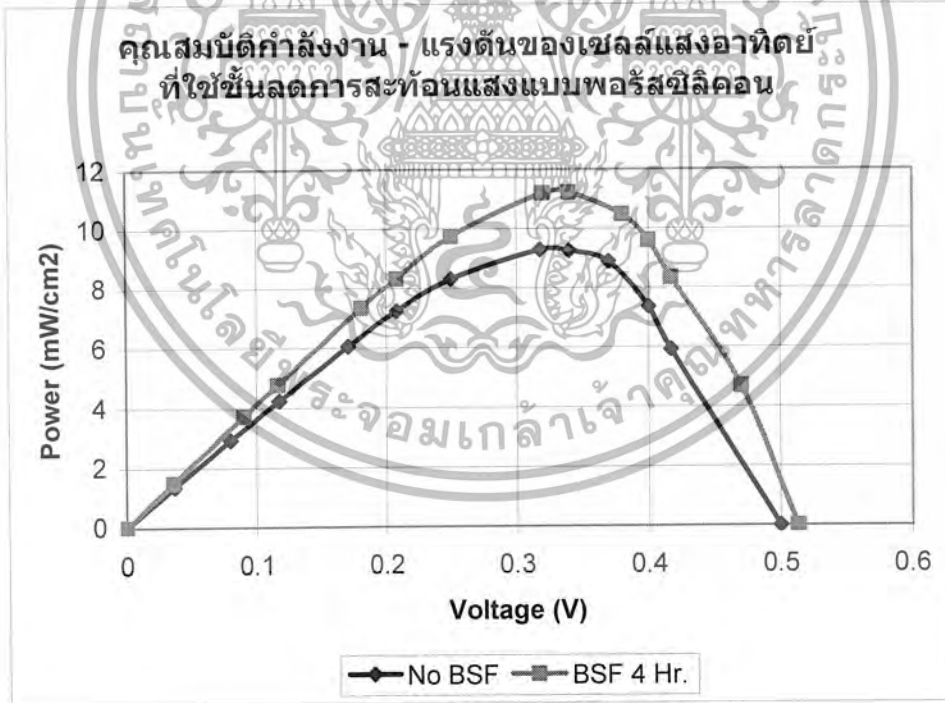
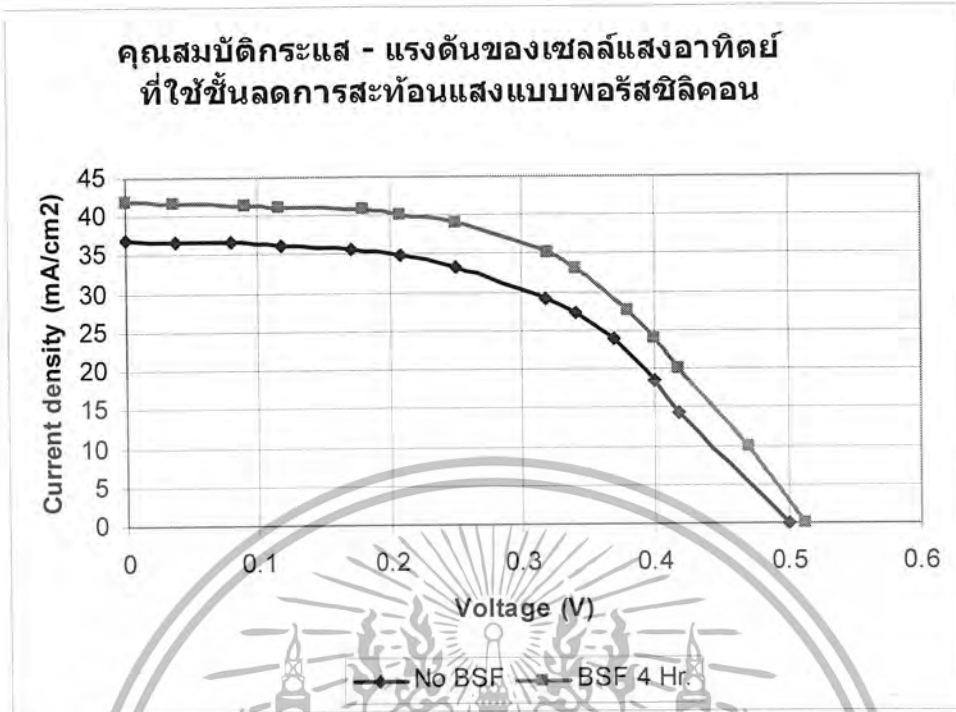
รูปที่ 5.32 (ก) กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยมีสนามไฟฟ้าด้านหลังที่เวลาต่างๆ ที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω -cm

(ข) กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยมีสนามไฟฟ้าด้านหลังที่เวลาต่างๆ ที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω -cm

ARC	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	P_o (mW)	J_{sc} (mA/cm ²)	I_m (mA)	V_m (V)	P_m (mW)	F.F.	Eff. (%)
ไม่มี BSF	18.5	0.5	9.25	37	14.6	0.318	4.64	0.5	11.15
BSF 4 hr.	20.9	0.513	10.72	41.8	16.5	0.34	5.61	0.52	13.49
% การเปลี่ยนแปลง	+12.97	+2.6	+15.89	+12.97	+13.01	+6.92	+20.91	+4.0	+20.99

ตารางที่ 5.11 ตารางแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยมีสนามไฟฟ้าด้านหลังที่เวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

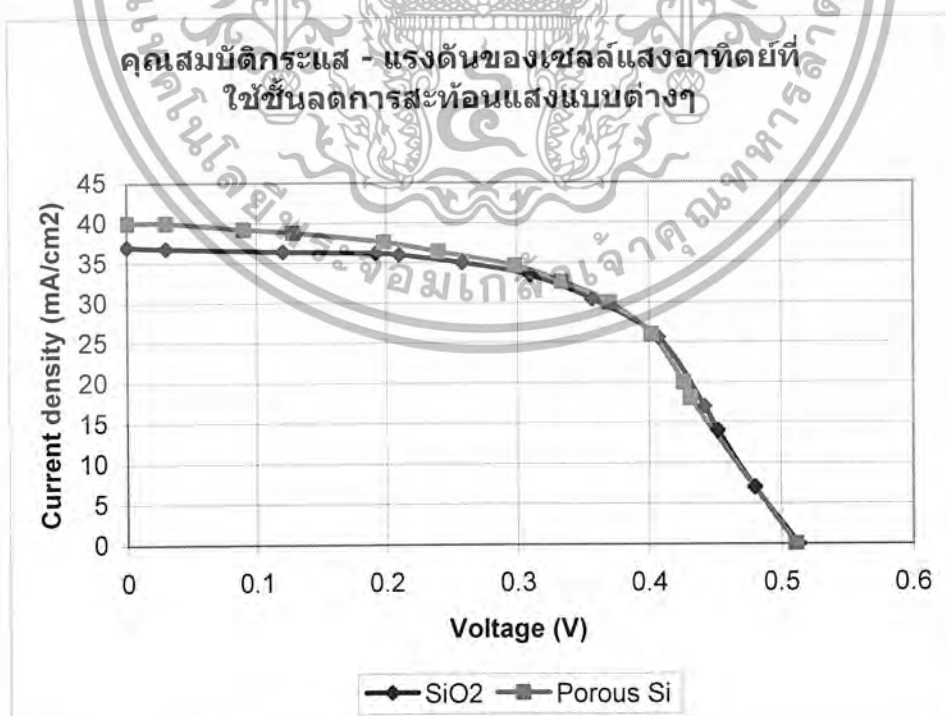
รูปที่ 5.33 (ก) กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยมีสนามไฟฟ้าด้านหลังที่เวลาต่างๆ ที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω-cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (ข) กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อน โดยมีสนามไฟฟ้าด้านหลังที่เวลาต่างๆ ที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 3-5 Ω -cm

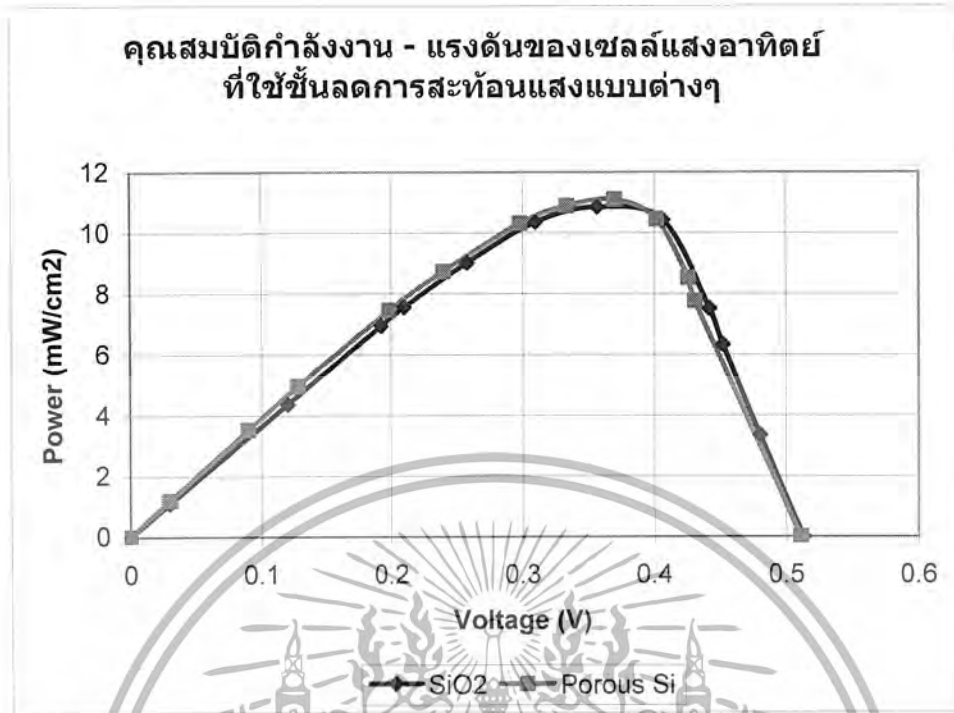
ARC	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	P_o (mW)	J_{sc} (mA/cm ²)	I_m (mA)	V_m (V)	P_m (mW)	F.F.	Eff. (%)
SiO ₂	18.5	0.513	9.49	37	15.2	0.357	5.43	0.57	13.05
Porous Si	20	0.511	10.22	40	15	0.37	5.55	0.54	13.34
% การเปลี่ยนแปลง	+8.11	-0.39	+7.69	+8.11	-1.32	+3.64	+2.21	-5.26	+2.22

ตารางที่ 5.12 ตารางแสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์และพอร์ซซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองความต้านทาน 6-12 Ω -cm



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



- รูปที่ 5.34 (ก) กราฟแสดงการเปรียบเทียบกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 6-12 Ω -cm
- (ข) กราฟแสดงการเปรียบเทียบกำลังงานและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจากแผ่นฐานรองสภาพต้านทาน 6-12 Ω -cm

5.4 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.4.1 การสร้างพอร์สซิติคอนด้วยวิธีการกัดข้อมล

1) ช่วงเวลาการเกิดพอร์สซิติคอนแบ่งเป็น 3 ช่วงเวลาคือ

ช่วงเวลาที่ 1 ยังไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น ไม่มีฟองก๊าซเกิดขึ้น

ช่วงเวลาที่ 2 เริ่มเกิดฟองก๊าซขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของแผ่น จากฟองขนาดเล็กๆรวมตัวกันเป็นฟองขนาดใหญ่ สามารถทำให้แผ่นลอยขึ้นมาได้ มีการเปลี่ยนสีสนที่ผิวหน้าของแผ่น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปอย่างรวดเร็ว

ช่วงเวลาที่ 3 ยังคงมองเห็นฟองก๊าซเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลาแต่ปฏิกิริยาการเกิดเป็นไปอย่างช้ากว่าเมื่อเทียบกับช่วงเวลาที่ 2 ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กและเกิดขึ้นช้ากว่าช่วงเวลาที่ 2





(3)

รูปที่ 5.35 (1) กราฟแสดงช่วงการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการสร้างพอร์สซิลิคอน โดยวิธีการกัดแบบ
 ย้อมสี (2)กราฟแสดงช่วงการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการสร้างพอร์สซิลิคอน โดย
 วิธีการกัดแบบย้อมสีโดยการกัดทะลุอะลูมิเนียม (3)กราฟแสดงช่วงการเกิดปฏิกิริยาที่
 เกิดขึ้นจากการสร้างพอร์สซิลิคอนโดยวิธีการกัดแบบย้อมสีโดยการกัดทะลุอะลูมิเนียมที่
 ทำการซินเตอร์ริง

- 2) สามารถสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดย้อมสีได้
- 3) แสงจะช่วยให้เวลาการเกิดของพอร์สซิลิคอนเร็วขึ้น
- 4) Ultra sonic จะช่วยให้ Uniform ของพอร์สซิลิคอนดีขึ้นแต่เวลาการเกิดของพอร์สซิลิคอน

จะช้าลง

- 5) การผสมเอทานอลแอลกอฮอล์จะช่วยให้ Uniform ของพอร์สซิลิคอนดีขึ้น
- 6) จากรูป SEM จะพบว่าเวลาในการเกิดพอร์สซิลิคอนที่มากขึ้นผิวหน้าของซิลิคอนจะเกิดรู
 พรุนมากขึ้นนั่นคือความพรุนของพอร์สซิลิคอนมากขึ้นนั่นเอง

5.4.2 การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอน

- 1) การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยชั้นป้องกันการเกิดพอร์สสามารถสร้างได้ทั้ง
 จากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az 1350 และ น้ำยาไวแสงชนิดบวก S1818
- 2) การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม
 สามารถสร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก S1818
- 3) การเลือกพื้นที่สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนบนแผ่นซิลิคอนที่ทำการเคลือบอลูมิเนียม ด้วย
 ชั้นป้องกันการเกิดพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากน้ำยาไวแสงชนิดบวก Az 1350 ทำได้โดยการลอกชั้น
 อลูมิเนียมออกก่อน หรือทำการเคลือบน้ำยาไวแสงหลายชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การสร้างพอร์สซิติคอน โดยวิธีการกัดทะลุอะลูมิเนียมจะเป็นการเร่งปฏิกิริยาการเกิดความพรุนของพอร์ส มากกว่าการสร้างพอร์สซิติคอนบนผิวหน้าซิติคอนธรรมดา

5.4.3 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

- 1) ทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงได้
- 2) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงจะให้กระแสลัดวงจรสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีซิติคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง
- 3) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงจะให้กำลังงานสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีซิติคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง
- 4) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงจะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีซิติคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง
- 5) สามารถประยุกต์กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอร์สซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงให้สามารถทำได้โดยใช้ Mask เดียว



ภาคผนวก ก

1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

มวลนิ่งของอิเล็กตรอน (rest mass of an electron)	m_e	9.109×10^{-31} kg
มวลนิ่งของโปรตอน (rest mass of proton)	m_p	1.672×10^{-27} kg
มวลนิ่งของนิวตรอน (rest mass of neutron)	m_n	1.675×10^{-27} kg
ประจุอิเล็กตรอน (electron charge)	q	1.602×10^{-19} C.
อัตราส่วนระหว่างประจุ กับมวลนิ่งของอิเล็กตรอน	q/m_e	1.76×10^{11} C/kg.
ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant)	h	6.626×10^{-34} J-sec
	$h/2\pi$	4.136×10^{-15} eV-sec
ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann's constant)	k	1.31×10^{-23} J/K
		8.617×10^{-5} eV/K
เลขคงที่อะโวกาโด (Avagadro's number)	N_0	6.023×10^{26} (k mol) ⁻¹
ความเร็วแสงในสุญญากาศ (speed of light in space)	C	2.998×10^8 m/sec
อัตราส่วนมวลโปรตอนและอิเล็กตรอน	m_p/m_e	1836
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสุญญากาศ (Permittivity of free space)	ϵ_0	8.854×10^{12}
		$e^2/N.m^2$ (F/m)
ค่าเปอร์มิอิตีในสุญญากาศ (Permeability of free space)	μ_0	1.257×10^{-6}
		T.m/A(H/m)
รัศมีของบอห์ร์ (Bohr radius)	a_0	5.292×10^{-11} m
ค่าคงที่ของริดเบิร์ก (Rydberg constant)	R	1.097×10^7 m ⁻¹
ค่าคงที่ของสเตฟาน (Stagan's constant)	σ	5.67×10^{-8} w/m ²
ค่าบอห์ร์แมกนีตอน (Bohr mahneton)	μ_B	9.273×10^{-24} J/T
ค่าคงที่อิเล็กตรอน โวลต์ (1 electron – volts)	eV	1.602×10^{-19} J
ค่าพลังงานจูล (1 Joule)	J	6.242×10^{18} eV
ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)	K	⁰ C+273.15 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คุณสมบัติทั่วไปของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิห้อง (300 K)

คุณสมบัติ	ซิลิคอน	เยอรมันเนียม	แกลเลียม อาเซไนด์	หน่วย
ความหนาแน่นอะตอม	5×10^{22}	4.4×10^{22}	2.2×10^{22}	cm^{-3}
ช่องว่างพลังงาน (E_g)	1.12	0.66	1.42	eV
มวลยังผล				
อิเล็กตรอน (m_n^*/m_0)	1.182	0.553	0.0655	
โฮล (m_p^*/m_0)	0.81	0.357	0.524	
ความหนาแน่นสถานะ ที่แถบนำ (N_c)	3.22×10^{19}	1.03×10^{19}	4.21×10^{17}	cm^{-3}
ที่แถบวาเลนซ์ (N_v)	1.83×10^{19}	5.35×10^{18}	9.52×10^{16}	
ความหนาแน่นพาหะ อินทรีนซิก (n_i)	1×10^{10}	2.17×10^{13}	2.49×10^6	cm^{-3}
สภาพคล่องที่ low doping				
μ_n (electron)	1350	3900	8800	$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
μ_p (hole)	480	1900	4000	
สนามไฟฟ้าพังทลาย	3×10^5	105	4×10^5	V/cm
Breakdown field				
ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (K)	11.8	15.8	13.1	
จุดหลอมละลาย	1,410	940	1240	$^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คุณสมบัติของซิลิคอนไดออกไซด์

ชื่อ	ขนาด	หน่วย
น้ำหนักอะตอม	60.08	
ความหนาแน่นอะตอม	2.310-22	cm ⁻³
ความต้านทาน (ที่ 300 K)	>1016	Ω-cm
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	3.9	
จุดหลอมเหลว	1700	°C
ความร้อนจำเพาะ	1.0	J/g °C
การนำความร้อน	0.014	W/cm-°C
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	0.5x10 ⁻⁶	(°C) ⁻¹

4. คุณสมบัติของซิลิคอน

ชื่อ	ขนาด	หน่วย
เลขอะตอม	14	
น้ำหนักอะตอม	28.086	g/cm ⁻³
ความหนาแน่น	2.328	cm ⁻³
ความหนาแน่นอะตอม	2.96 x10 ²²	
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	11.7	
พลังงานแถบต้องห้าม	1.115	
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของพลังงานแถบต้องห้าม	-2.3 x10 ⁻⁴	eV/°C
จุดหลอมเหลว	1417	°C
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ผิว ระบาย 100	580	cm ² /V.s
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในเนื้อสาร ระบาย100	1260	cm ² /V.s
ความคล่องตัวของโฮลที่ผิว ระบาย100	400	cm ² /V.s
ความคล่องตัวของโฮลในเนื้อสาร ระบาย 100	230	cm ² /V.s
ดัชนีหักเห	3420	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำความร้อน	1.57	W/cm-°C
การขยายตัว เนื่องจากความร้อน	2.6×10^{-6}	(°C) ⁻¹
ค่าคงที่ของผลึก	5.4307	Å
ความดันต่อหน่วยปริมาตร	0.98×10^{12}	cm ² /dym
ความร้อนในการละลาย	1000	J/G
ความหนาแน่นของพาหะของซิลิคอนบริสุทธิ์	1.45×10^{10}	cm ⁻³



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ภาคผนวก ข จะกล่าวถึง ข้อมูลของน้ำยาไวแสงและน้ำยาขุ่นลวดลายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากการทราบคุณสมบัติของน้ำยาไวแสงก่อนใช้งาน จะทำให้สามารถใช้น้ำยาไวแสงได้อย่างถูกต้อง

AZ P1350 Series Photoresist

For Photo Mask and Optical Disk Manufacturing

High Adhesion

For g – line Exposure

1. Description

Az 1350 series photoresist is suitable for photomask and optical disk manufacturing , especially for the processes requiring high adhesion properties . It is formulated with the safer solvent propylene glycol monomethyl ether acetate (PGMEA) rather than ethylene glycol acetate (EGA)

2. Features

- 1) Good resolution and linearity.
- 2) Wide exposure latitude and DOE margin.
- 3) Good adhesion.
- 4) Small dark erosion.

3. Storage Condition

Keep in sealed original container. Protect from sunlight. Store in a cool and dry room.

4. Handling Precaution / First Aid

- 1) handle with care. Keep away from heat, sparks, and open flames.
- 2) Keep away from skin. Wear gloves and protective clothing as needed.
- 3) First Aid

If skin contact: Wash affected areas with soap and water.

If eye contact : Flush with water for at least 15 min. Contact physician.

If inhaled : Move into fresh air.

5. Specifications

Solid Content (wt%) 16.2 ± 1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Viscosity / 25 °C	4.8 ± 0.5
Specific Gravity	1.010 ± 0.005
Water Content (wt%)	0.5 max
Solvent	propylene glycol monomethyl ether acetate (PGMEA)

Spin Curve



รูปที่ ข. 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของการสปินเนอร์กับความหนาของฟิล์มน้ำยาไวแสง เบอร์ AZ1350

MICROPOSIT

S1818 Series Photoresist

S1800 positive g – Line photoresist is an industry proven, general purpose resist for conventional device applications.

FEATURES

- Fast photo speed and High resolution
- Good adhesion
- Good dry etching resistance
- Good film retention

Component Photoresist



Components without CAS numbers are Trade Secret

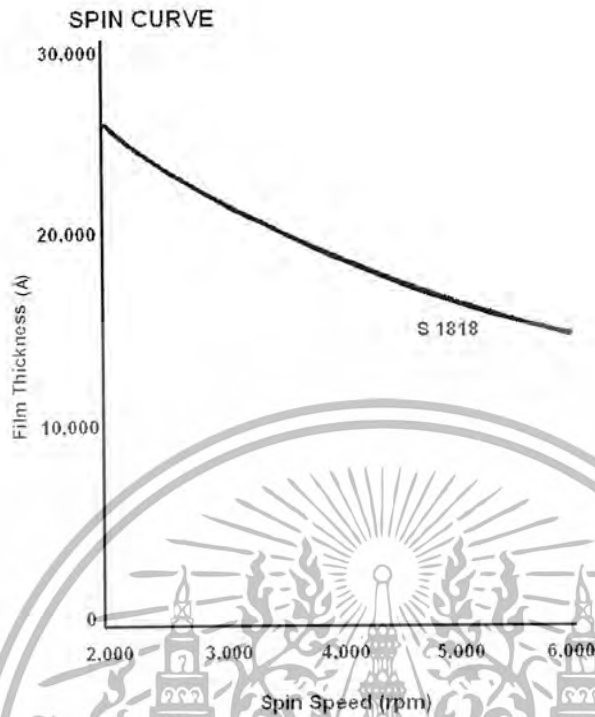
Component Name	CAS# / Codes	Concentration
Electronic grade propylene glycol	108-65-6	65.00 - 75.00
monomethyl ether acetate		
Mixed cresol novolak resin		20.00 - 30.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Component Name	CAS# / Codes	Concentration
Nonionic Surfactant		0.01 - 1.00
Diazo Photoactive Compound		1.00 - 10.00
cresol	1319-77-3	0.01 - 0.99

Physical State	Viscous liquid
Color	Red
Odor	Sweet
VOC (g/l)	741.06
Specific Gravity	1.055
pH	Neutral
Boiling Range/Point (°C/F)	145.8/295
Flash Point (PMCC) (°C/F)	40.5-46.1 / 105-115
Explosion Limits (%)	Lower limit 1.5 at 20 °C, Upper limit 7.0 at 20 °C.
Solubility in Water	Insoluble.
Vapor Density (Air = 1)	Heavier than air
Evaporation Rate	Slower than ether
Vapor Pressure	Propylene Glycol Monomethyl Ether-Acetate: 3.7 mmHg at 20 °C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



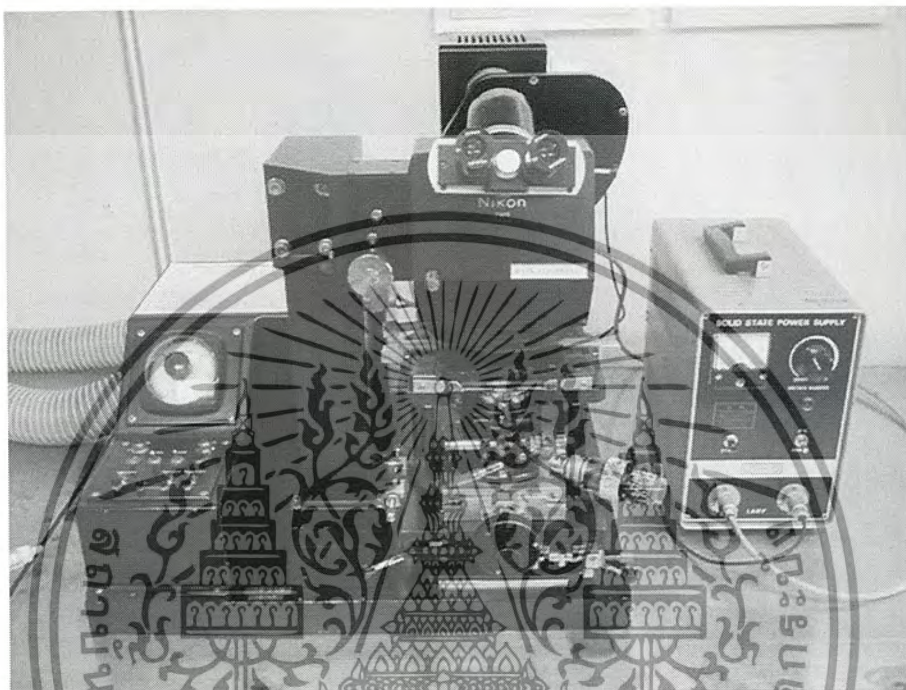
รูปที่ ก. 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของการสปินเนอร์กับความหนาของฟิล์มน้ำยาไวแสง เบอร์ S 1818

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1 Alignment expose

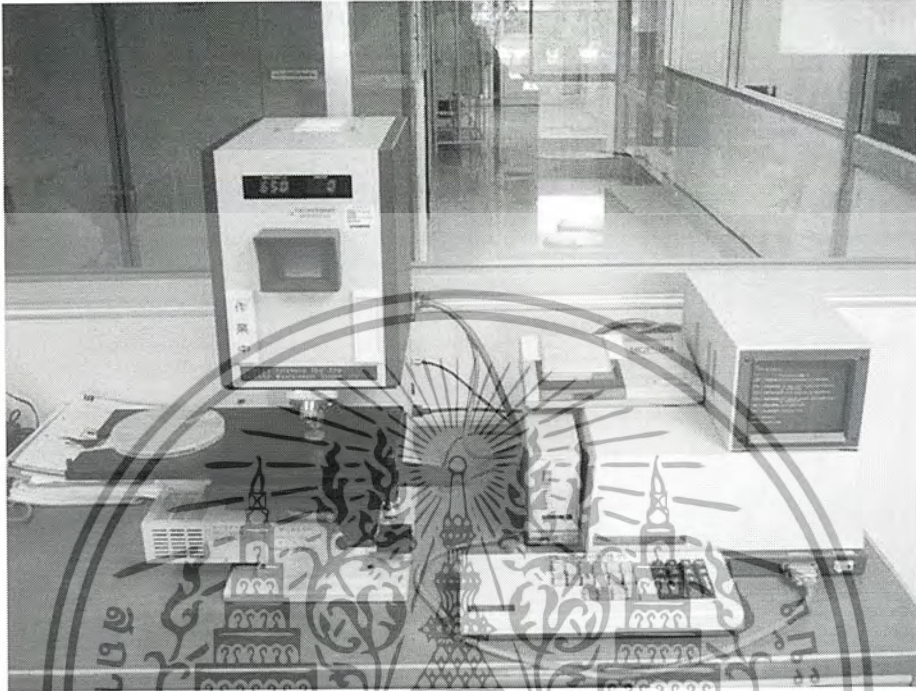


2. Four point probe resistivity testing



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Automatic thin film measurement

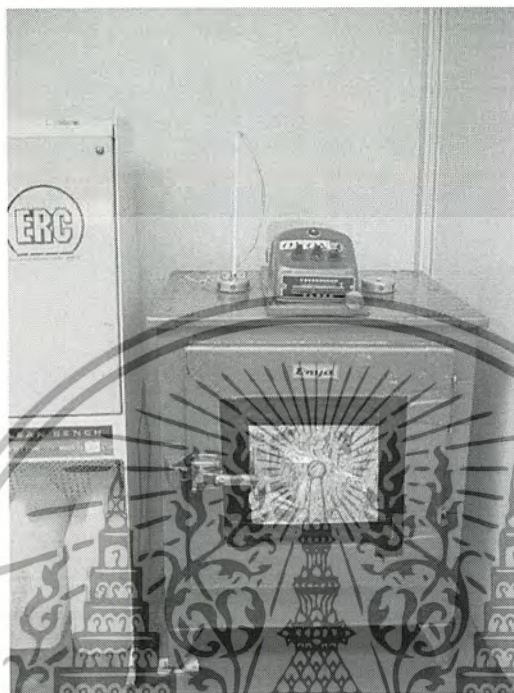


4. Spinner



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมืออนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ตู้อบไล่ความชื้น



6. Evaporator



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เตา Oxidation และ Sintering



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ และอะลูมิเนียม

1.1 น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดซิลิคอนไดออกไซด์

หรือที่เรียกว่า น้ำยาบัฟเฟอร์ (buffer solution)

น้ำยาบัฟเฟอร์ใช้สำหรับการกัดซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเปิดช่องสำหรับแพร์สารเจือ หรือเพื่อทำรอยสัมผัส (contact) ให้กับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ น้ำยาที่ใช้มีอัตราในการกัดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับ การเลือกใช้ตามความจำเป็นของงาน

น้ำยาบัฟเฟอร์ 1

กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 50 % 1 ส่วน

แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH₄F) 6 ส่วน

ผสมกันโดยปริมาตร มีอัตราการกัด (etching rate) ประมาณ 1000 อังสตรอมต่อนาที

น้ำยาบัฟเฟอร์ 2

กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 50 % 1 ส่วน

แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (NH₄F) 10 ส่วน

ผสมกันโดยปริมาตร มีอัตราการกัดประมาณ 600 อังสตรอมต่อนาที (10 อังสตรอมต่อวินาที)

1.2 น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดอะลูมิเนียม

น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดอะลูมิเนียมใช้สำหรับการกัดอะลูมิเนียมเพื่อทำลวดลาย ขั้วโลหะบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ มีส่วนผสมของสารเคมีโดยปริมาตร ดังนี้

กรดฟอสฟอริก (H₃PO₄) 80 ส่วน

กรดไนตริก (HNO₃) 5 ส่วน

กรดอะซิติก (CH₃COOH) 5 ส่วน

น้ำบริสุทธิ์ (deionized water; DI water) 10 ส่วน

1.3 น้ำยาเคมีที่ใช้ในการกัดพอร์ซซิลิคอน แบบ Stain etching

กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 50 % 1 ส่วน

กรดไนตริก (HNO₃) 3 ส่วน

น้ำบริสุทธิ์ (deionized water; DI water) 5 ส่วน

ภาคผนวก จ

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

- Ultrasonic ใน DI เวลา 2 นาที
- จุ่มในน้ำ DI
- ต้มในกรดไนตริก (HNO₃) เวลา 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI
- ต้มใน DI แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มใน DI แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- จุ่มใน DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ต้มใน Trichloroethylene (C₂HCl₃) เวลา 10 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone (CH₃COCH₃) เวลา 5 นาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

การ Slice Etching

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มใน DI แก้วที่ 1
- จุ่มใน DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

ภาคผนวก ฉ
ประวัติที่มงาน



รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ สุขเดช (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ปัจจุบัน : รองศาสตราจารย์ ระดับ 9 ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ และนักวิจัยอาวุโสประจำศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การศึกษา : วศ.บ. โทเทคนิคนามคม (เกียรตินิยม), สากล., M.Eng., D.Eng. (Electronics), Tokai University Tokyo, Japan., Cert. In “Semiconductor Processes” OKI Electric Company, Japan, Cert. In “Integrated Circuits Manufacturing” NEC, Japan.

ประสบการณ์ :

2526 – 2533 หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

2533 – 2537 คณะบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รางวัลผลงานวิจัย :

โครงการวิจัยดีเด่น ปี 2526 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
“การออกแบบ สร้าง และพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์”

โครงการวิจัยดีเด่น ปี 2539 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
“การสร้างฟิล์มบางเพชร สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์”

ผลงานการเขียน :

ตำราเรียน “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์”, “เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์” และ “เซมิคอนดักเตอร์เทคโนโลยี”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



นาย วิบูลย์ กิ่งสะกิจ

ปัจจุบัน : นักศึกษาชั้นปีที่3 หลักสูตรต่อเนื่อง ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การศึกษา : ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์, วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี, สระบุรี



นาย เศรษฐชัย เวชพุกขไพบูลย์

ปัจจุบัน : นักศึกษาชั้นปีที่3 หลักสูตรต่อเนื่อง ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การศึกษา : ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ , กรุงเทพฯ
ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาช่างอิเล็กทรอนิกส์, วิทยาลัยเทคนิคสกลนคร, สกลนคร

บรรณานุกรม

- [1] Leigh Canham. **“Properties of Porous Silicon”** Short Run Press Ltd.,1997
- [2] รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช. **“เซมิคอนดักเตอร์ฟิลิกส์”** แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2544
- [3] รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช. **“สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ”** แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2545
- [4] รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช. **“เทคโนโลยีการสร้าง และการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์”** แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [5] รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช. **“เทคโนโลยีวงจรรวม”** เอกสารประกอบวิชาเทคโนโลยีวงจรรวม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2546
- [6] นายมนัสชัย ไชยนอก **“การประยุกต์ใช้งานพอร์ซิลิกอนในเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพี-เอ็น”** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2546
- [7] Matin A.Green. **“Solar Cells Operating Principles, Technology and System Application”** Prentice-Hall, Inc., 1982
- [8] นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง. **“การศึกษาคูลสมบัติลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์ซิลิกอน”** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2542
- [9] Y.S. Tsuo, Y. Xiao, M.J. Heben, X. Wu, F.J. Pern, and S.K. Deb, **“Potential Applications Of Porous Silicon in Photovoltaics”** Photovoltaic Specialists Conference, 1993. Conference Record of the Twenty Third, IEEE,USA
- [10] Funktiomella Material. **“Porous Silicon”** Chelsie Dickson,Stockholm
- [11] J. Xu and A. J. Steckl. **“Stain-etched porous silicon visible light emitting”** University of Cincinnati, Ohio, 1995
- [12] ชลิตา กุหาเรือง. **“กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีสำหรับสร้างลวดลายขนาด 5 ไมครอน บนซิลิกอนไดออกไซด์และอลูมิเนียม”** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้