

2.1 โครงสร้างของผลึกซิลิคอน

ผลึก ประกอบด้วยกลุ่มอะตอมหรือกลุ่มโมเลกุลหลายๆ กลุ่ม ซึ่งอยู่ใน Unit Cell มาเรียงต่อกันทุกทิศทางอย่างสม่ำเสมอ ถ้าการเรียงตัวนี้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน เราเรียกวัสดุนั้นว่าเป็นผลึกเดี่ยว (Single Crystal) แต่ถ้าการจัดเรียงตัวนั้นแยกออกเป็นย่าน โดยในแต่ละย่าน จะมีการเรียงตัวกันของ Unit Cell ไปในทิศทางต่างกัน จะเรียกว่าผลึกโพลี (Polycrystalline) แต่ถ้าการจัดเรียงตัวเป็นไปอย่างไม่เป็นระเบียบทั่วทั้งก้อน ลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า วัสดุอสัณฐาน (Amorphous)

ผลึกสามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ระบบ โดยใช้ความยาวของ Unit Cell (a,b,c) และมุมระหว่างด้านของ Unit Cell (α, β, γ) เป็นตัวกำหนด ซึ่งลักษณะของระบบทั้ง 7 ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.1

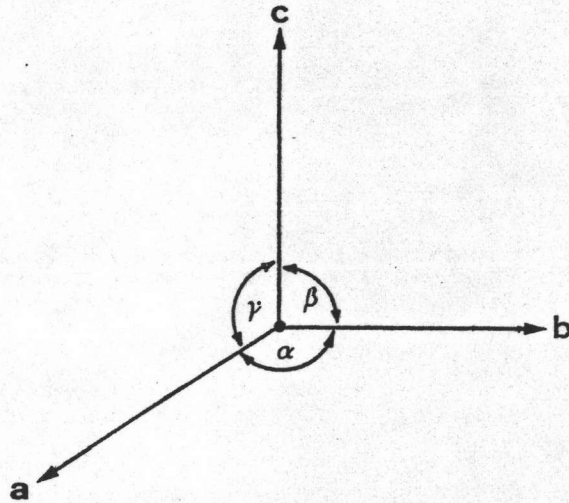
เหตุที่การใช้งานผลึก จะต้องคำนึงถึงแนวการจัดเรียงตัวของอะตอม เพื่อให้เกิดคุณสมบัติต่าง ๆ ตามต้องการ ดังนั้น การบอกระนาบ และทิศทางในผลึกจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการสร้างดรรชนีมิลเลอร์ (Miller index) ขึ้นมา

ตามรูปที่ 2.2 ระนาบซึ่งถูกล้อมด้วยจุด X Y Z บนแกนหลักของ Unit Cell จะแสดงทิศทาง ด้วยส่วนกลับของอัตราส่วนของจุดตัดระนาบบนแกนต่อหน่วยความยาวแต่ละด้านของ Unit Cell ดังนั้น ระนาบ X Y Z จะถูกเขียนบอกตามหลักของดรรชนีมิลเลอร์ด้วย $[h k l]$ โดยที่

$$h = Oa / OX$$

$$k = Ob / OY$$

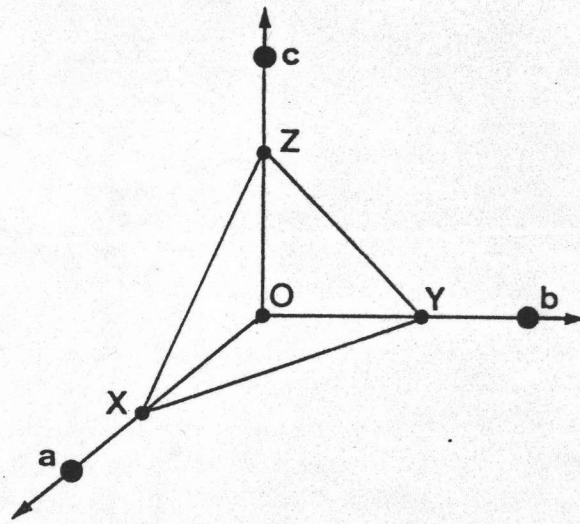
$$l = Oc / OZ$$



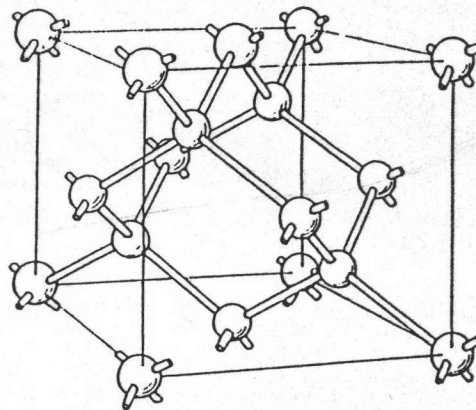
รูปที่ 2.1 ระบบแกนอ้างอิงของ Unit Cell

ระบบของผลึก	ลักษณะของ Unit Cell	ตัวอย่าง
Triclinic	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma$	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Monoclinic	$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Orthorhombic	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	KNO_3
Tetragonal	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Sn, TiO_2
Cubic	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Au, Si, NaCl
Trigonal	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	$\text{SiO}_2, \text{CaCO}_3$
Hexagonal	$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	Zn, Graphite

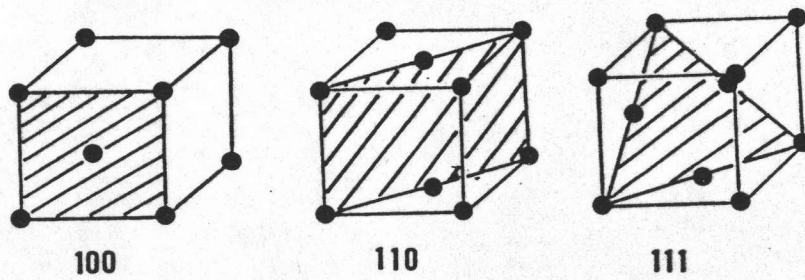
ตารางที่ 2.1 ลักษณะของระบบผลึกทั้ง 7 ชนิด



รูปที่ 2.2 กราฟระบบพิกัด XYZ



รูปที่ 2.3 Si Cubic Unit Cell



รูปที่ 2.4 ระนาบ [100], [110] และ [111]

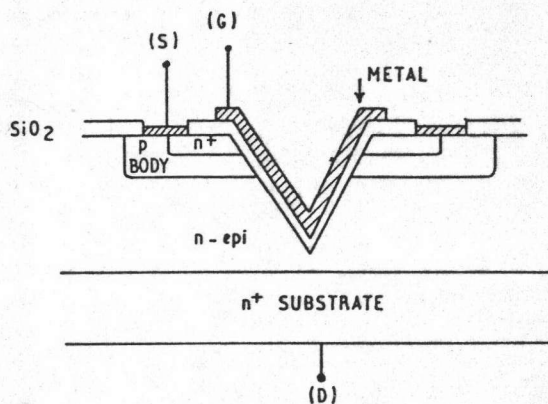
รูปที่ 2.3 เป็นการยกตัวอย่าง Unit Cell แบบ Cubic ซึ่งมีความยาวแต่ละด้านเท่ากัน และมีมุมของแต่ละด้านเป็นมุมฉากซึ่งกันและกัน พลิกของซิลิคอนก็มีลักษณะเป็น Cubic เช่นกัน แต่จะเป็นลักษณะของ Face Centered Cubic (FCC) ซึ่งเป็นรูปย่อยของระบบ Cubic ในรูป 2.4 จะแสดงระนาบ [100] , [110] และ [111] ซึ่งเป็นระนาบที่มีใช้กันมากในกระบวนการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจากซิลิคอน

2.2 Anisotropic Etching

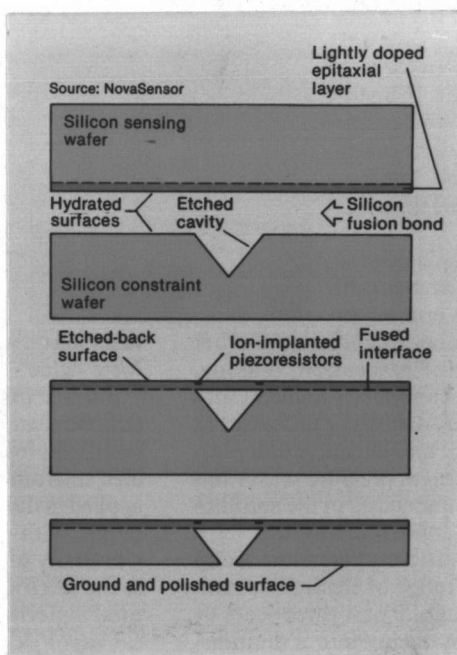
เทคนิคการกัดเนื้อผลึกซิลิคอนแบบ Anisotropic Etching ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่าง ๆ ทั้งนี้อาจเป็นการกัดในลักษณะที่ขึ้นอยู่กับทิศทางของการจัดเรียงตัวของผลึกนั้น เรียกว่า Orientation Dependent Etching (ODE) หรือการกัด ที่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารเจือปนในเนื้อผลึกนั้น เรียกว่า Concentration Dependent Etching (CDE) การนำเทคนิคการกัดทั้ง 2 แบบนี้มาใช้ก็เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างพิเศษ และอาศัยธรรมชาติของการจัดเรียงอะตอมของผลึกที่มีลักษณะเฉพาะตายตัวให้เกิดประโยชน์ เราสามารถจะกำหนดรูปแบบของการกัดได้ด้วยการถ่ายภาพและเปิดช่อง (Masking Technique) ประกอบกับการควบคุมกระบวนการผลิตที่เหมาะสม

ในปัจจุบัน ได้มีผู้คิดสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ โดยใช้ประโยชน์จาก Anisotropic Etching นี้ขึ้นมามากมาย ยกตัวอย่างเช่น (1)

- VMOS
- JFET Array
- High Precision Inkjet Printhead Nozzle
- DI Process Thickness Indicator
- Solid State Pressure Transducer
- High Voltage Diode Array
- Wave Guide
- IR Detector
- Optical Collimator
- Metallization Template
- Imaging Antenna Array (2)
- Solar Cell Anti-reflection Surface



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ VMOS (3)



รูปที่ 2.6 การสร้าง Pressure Sensor (4)

สารละลาย	ลักษณะการกัด
HF - HNO ₃ - CH ₃ COOH	มีอัตราการกัด เท่ากันทุกทิศทาง
KOH - n Propanol - H ₂ O	การกัดในทิศทาง [100] จะเร็วกว่าทิศทาง [111] ~ 100 เท่า
KOH - H ₂ O	การกัดในทิศทาง [110] จะเร็วกว่าทิศทาง [111] ~ 600 เท่า
Pyrocatechol - Ethylenediamine - H ₂ O	การกัดในทิศทาง [100] เร็วมาก ส่วนทิศทางอื่นและ SiO ₂ จะช้ามาก

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างสารละลายที่ใช้กัดซิลิคอน (5)

ในทางปฏิบัติโดยทั่วไป ธาตุในกลุ่มอัลคาไลน์ เช่น Li, Na, K เป็นสิ่งที่จะต้องหลีกเลี่ยงให้มากที่สุด ในกระบวนการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ จากสารกึ่งตัวนำ ในสารละลายที่ใช้ KOH เป็นส่วนผสม จะมีปริมาณของโปแตสเซียมไอออน (K⁺) เป็นจำนวนมาก และอาจเกิดการตกค้างอยู่ในเนื้อของผลึกซิลิคอน กลายเป็นประจุอิสระที่วิ่งไปมาระหว่างรอยต่อพี-เอ็น เป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดกระแสรั่วในบริเวณรอยต่อ สารละลายที่ใช้ KOH จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

ในการเตรียมผิวของผลึกซิลิคอน สำหรับงานวิจัยนี้ ใช้สารละลาย Pyrocatechol C₆H₄(OH)₂ (P), Ethylenediamine NH₂(CH₂)₂NH₂ (ED) และน้ำ ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า สารละลาย P-ED การเตรียมผิวผลึกนี้ จะทำให้เกิด ร่อง รูปตัว วี (V-groove) ที่มีขนาดเล็กจำนวนมาก เพื่อนำมาใช้เป็นผิวรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ลักษณะโครงสร้างแบบนี้ จะทำให้เกิดลักษณะการดักแสง ซึ่งเป็นแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

ในกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนแบบ Anisotropic Etching นี้ จะอาศัยคุณสมบัติของการกัดด้วยอัตราที่ไม่เท่ากันใน 3 ทิศทางของโครงผลึก กล่าวคือในทิศทาง [100] จะมีอัตราการกัดที่เร็วที่สุด ส่วนทิศทาง [110] อัตราการกัดจะช้ากว่าเล็กน้อย แต่สำหรับทิศทาง [111] อัตราการกัดจะช้ามาก ทั้งนี้จะเห็นว่าในระนาบ [111] จะมองเห็นการจัดเรียงตัวของอะตอม ในลักษณะ close pack โดยโครงสร้างแบบนี้ อะตอม 1 ตัวจะมีอะตอมข้างเคียงอยู่ 12 ตัว การจัดเรียงตัวแบบ close pack นี้จะเกิดได้กับผลึกใน 2 กรณีเท่านั้นคือ ระบบ Hexagonal และ Face Center Cubic ระนาบ [111] ดังนั้นพันธะระหว่างอะตอมในระนาบนี้ จะมีค่าสูงมากกว่าในระนาบอื่น ๆ (6) การที่จะดึงอะตอมออกจากระนาบนี้จึงทำได้ยากกว่าในระนาบอื่นมาก จากเหตุผลนี้จึงทำให้เกิดเทคนิค Anisotropic Etching จากคุณสมบัติของผลึกซึ่งมีการจัดเรียงตัวของอะตอมเป็นระบบของ Unit Cell ทำให้เราสามารถใช้อัตราการกัดจากระนาบต่าง ๆ ของโครงผลึก ประกอบกับเทคนิค Anisotropic Etching เกิดเป็นรูปแบบผิวของผลึกที่มีลักษณะเฉพาะตัว มีมุมของพื้นผิวที่ถูกกำหนดด้วยทิศทางของระนาบ มุมนี้จะเป็นมุมคงที่ ทำให้การผลิตในระบบ Reproduction ทำได้ง่าย ขึ้นอยู่กับการออกแบบ mask สำหรับการกัด และการจัดวาง mask ให้เป็นไปในแนวที่ต้องการ จากรูป 2.4 จะเห็นว่ามุมระหว่างระนาบ [100] และ [110] เป็นมุม 45° แต่มุมระหว่างระนาบ [100] กับ [111] อาศัยการคำนวณ จะได้ค่ามุมเท่ากับ 54.75° ยังมีมุมคงที่อื่น ๆ อีกมากบนผลึกซิลิคอน ขึ้นอยู่กับระนาบที่สนใจนำมาใช้งาน แต่งานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะ ระนาบ [100] และ [111] เท่านั้น

2.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายแบบ และใช้สารกึ่งตัวนำได้หลายชนิด ในที่นี้จะขออธิบายเฉพาะ โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ แบบหัวต่อพี-เอ็น โดยใช้วัสดุผลึกซิลิคอน (7)

1. ฐาน (Base) คือส่วนที่เป็นเนื้อซิลิคอนที่ใช้สำหรับรองรับโครงสร้างอื่น ๆ ฐานนี้จะมีความหนาอยู่ในช่วง 200 ถึง 300 ไมครอน ตามทฤษฎีแล้ว ส่วนฐานควรจะบางลงกว่านี้มาก เพื่อลดความต้านทานทางไฟฟ้าลง ซึ่งจะส่งผลให้ความสามารถในการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ดีขึ้น(8) แต่ก็ต้องคำนึงถึงความสะดวกในการจับถือในระหว่างการผลิต และการนำไปใช้งานเป็นสำคัญ เพราะถ้าฐานมีความบางมาก จะเปราะแตกง่าย ทำให้ลำบากต่อการจับถือ

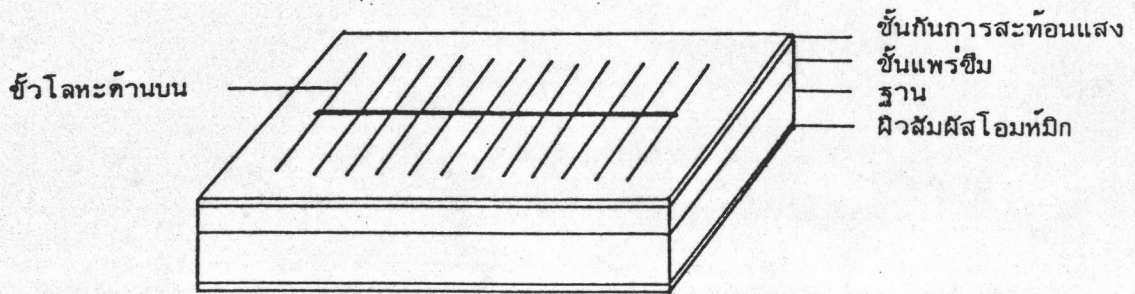
2. ชั้นแพร่ซึม (Diffusion layer) ด้านหนึ่งของฐานจะแพร่ซึมสารเจือปน จนกระทั่งทำให้ชนิดของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนเป็นตรงกันข้ามกับฐาน เช่น ฐานที่เป็นชนิด พี ที่ ถูกเจือปนด้วยอะตอมของโบรอน จะถูกทำการแพร่ซึมด้วยฟอสฟอรัส จนผิวหน้าด้านหนึ่งเปลี่ยน เป็นชนิด เอ็น การแพร่ซึมนี้จะทำให้เกิดชั้นแพร่ซึม ที่มีความลึกจากผิวหน้าประมาณ 0.2-0.5 ไมครอน

3. ผิวสัมผัสทางไฟฟ้า (Electrical Contact) ทำหน้าที่หลักคือ รวบรวม ประจุพาหะที่เกิดขึ้นเมื่อมีแสงมาตกกระทบผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ และมีการเคลื่อนที่ของประจุพาหะบริเวณใกล้รอยต่อระหว่างชั้นแพร่ซึมกับฐาน ผิวสัมผัสนี้จะต้องมีคุณสมบัติเป็นโอห์มมิก หมายถึง ความสามารถในการส่งผ่านพาหะผ่านผิวสัมผัสนี้จะต้องดีทุกทิศทาง ผิวสัมผัสทางไฟฟ้ามี 2 ส่วน

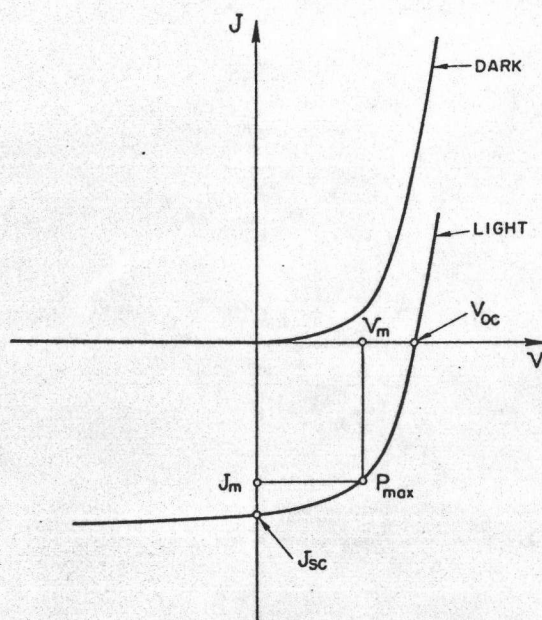
3.1 ผิวสัมผัสด้านหน้า อยู่บนชั้นแพร่ซึม ซึ่งเป็นด้านที่ใช้สำหรับรับแสงด้วย ดังนั้นรูปร่างของผิวสัมผัสนี้ จะต้องออกแบบเพื่อให้ได้พื้นที่ในการรวบรวมพาหะมากที่สุด ในขณะที่เดียวกันก็ต้องทำให้มีพื้นที่ในการรับแสงมากที่สุดด้วย

3.2 ผิวสัมผัสด้านหลัง ทางด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งไม่สามารถจะใช้ประโยชน์ในการรับแสงได้ เพราะแสงไม่สามารถเข้าไปถึงรอยต่อ พี-เอ็น จากทางด้านหลัง ดังนั้นด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีผิวสัมผัสทางไฟฟ้าแบบเต็มพื้นที่ และจะต้องเป็นโอห์มมิก เช่นกัน

4. ชั้นต้านการสะท้อนแสง (Anti-reflection) จะปิดทับผิวด้านรับแสงของ เซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อลดการสะท้อนแสงจากผิวรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ชั้นต้านการสะท้อน แสงอาจได้แก่ SiO , SiO_2 , SnO_2 , ITO เป็นต้น ส่วนความหนาของชั้นนี้จะขึ้นอยู่กับ ดรรชนีหักเหของสารที่ใช้แต่ละชนิด



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.8 ลักษณะสมบัติ กระแส-แรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์

2.4 ลักษณะสมบัติและพารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

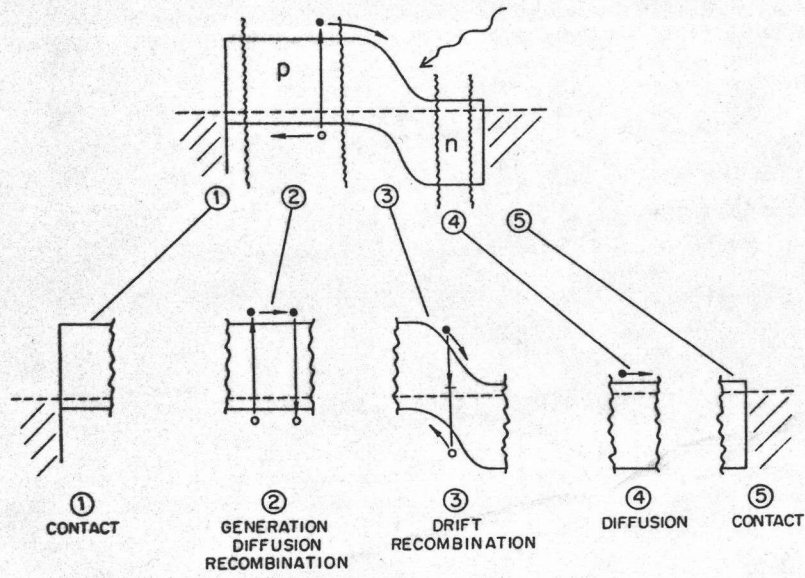
เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างแบบห้วต่อ พี-เอ็น นั้น จะมีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเช่นเดียวกับไดโอด คือมีความสามารถพื้นฐานในการตัดกระแส (Current Rectification) ได้เหมือนไดโอด แต่จะเพิ่มคุณสมบัติเกี่ยวกับการผลิตกระแสไฟฟ้าเมื่อมีแสงมาตกกระทบ และเข้าไปถึงบริเวณรอยต่อ พี-เอ็น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถจะนำไปใช้ได้จริง ๆ นั้น จะกำหนดได้จากการต่อโหลดที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ กระแส และแรงดันไฟฟ้าค่าสูงสุด ดังนั้น การนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งานให้เกิดประโยชน์จะต้อง ทราบลักษณะสมบัติและพารามิเตอร์หลักดังต่อไปนี้

1. ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Circuit Voltage , V_{oc}) เป็นแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบห้วต่อ พี-เอ็น มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความกว้างของแถบพลังงานต้องห้าม (Energy Gap , E_g) ของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่ากระแสลัดวงจร (I_{sc}) ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของห้วต่อ พี-เอ็น (I_0) และค่าความสมบูรณ์ของห้วต่อ (η) ดังนี้

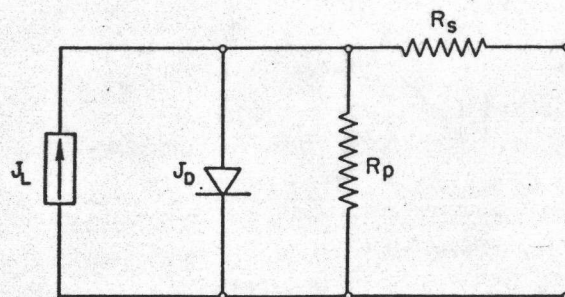
$$V_{oc} = n(kT/q) \ln[I_{sc}/I_0] \quad (2.1)$$

2. ค่ากระแสลัดวงจร (Short Circuit Current , I_{sc}) เป็นค่ากระแสขาออก เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่ากระแสลัดวงจรขึ้นอยู่กับ สเปคตรัมของต้นกำเนิดแสง รวมถึงความเข้มแสงต่อหน่วยพื้นที่ และค่าการตอบสนองทางแสงของสารกึ่งตัวนำ (Spectral Response) โดยทั่วไปแล้ว มักจะเรียกเป็น Short Circuit Current Density (J_{sc}) เป็นการ normalize ค่ากระแสเพื่อการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ต่าง ๆ โดยไม่คิดถึงพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

3. ฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor , FF) คืออัตราส่วนระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ กับผลคูณของ V_{oc} กับ I_{sc} ตำแหน่งของกำลังไฟฟ้าสูงสุดคือ จุดที่พื้นที่สี่เหลี่ยมภายใต้เส้นโค้งคุณสมบัติ กระแส-แรงดัน มีค่ามากที่สุด ที่จุดนี้ กระแสที่จ่ายออกคือ I_m และมีแรงดันขาออก V_m



รูปที่ 2.9 กระบวนการทางไฟฟ้า จากปรากฏการณ์ Photovoltaic



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูล ของเซลล์แสงอาทิตย์

$$FF = (I_m \cdot V_m) / (I_{sc} \cdot V_{oc}) \quad (2.2)$$

ค่าฟิลล์แฟกเตอร์จะพิจารณาได้จากค่า I_{sc} , V_{oc} , ค่าความต้านทานขนาน (R_p) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ของเซลล์แสงอาทิตย์ กล่าวคือ ถ้า R_s มีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ลดลง และถ้าค่า R_p ลดลง ก็จะทำให้ฟิลล์แฟกเตอร์ลดลงเช่นกัน

2.5 กระบวนการ Photovoltaic ในเซลล์แสงอาทิตย์ (9)

เมื่อมีการฉายแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ ปรากฏการณ์ทาง Photovoltaic หลายอย่าง จะเกิดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ รูปที่ 2.9 จะแบ่งขอบเขตของปรากฏการณ์ออกเป็น 5 บริเวณ ประกอบด้วย บริเวณผิวสัมผัสด้าน พี, บริเวณเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิด พี, บริเวณรอยต่อ, บริเวณสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น และบริเวณผิวสัมผัสด้าน เอ็น แผนภูมิที่แสดงเป็นการแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานกับระยะทาง ภายในเนื้อของเซลล์แสงอาทิตย์

1. บริเวณผิวสัมผัสด้าน พี บริเวณนี้จะเป็นส่วนที่เกิดการสัมผัสระหว่าง โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิด พี ทำให้เกิดค่าความต้านทานของผิวสัมผัสด้าน พี (R_{cp})
2. บริเวณเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิด พี พาหะที่เกิดจากการดูดกลืนพลังงานแสงจะเกิดขึ้นในบริเวณนี้เป็นส่วนใหญ่ และจะเคลื่อนที่ผ่านบริเวณนี้ ด้วยวิธีการแพร่ (Diffuse) และบางส่วนจะเกิดการรวมตัว (Recombination)
3. บริเวณรอยต่อ พาหะจะถูกกวาดให้เคลื่อนที่ออกไปคนละทาง ด้วยสนามไฟฟ้าที่บริเวณนี้ แต่ก็จะมีบางส่วนเกิดการรวมตัว เนื่องจากผลของ Localized state ในบริเวณเขตปลอดพาหะ (Depletion region) หรือในบริเวณที่สารกึ่งตัวนำกำลังเปลี่ยนชนิด
4. บริเวณเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น บริเวณนี้จะเป็นตัวกำหนด ค่าความต้านทานอนุกรมที่สำคัญ
5. บริเวณผิวสัมผัสด้าน เอ็น เมื่อมีโลหะมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะทำให้เกิดความต้านทานที่ผิวสัมผัสด้านเอ็น (R_{cn}) ผลรวมของค่าความต้านทานทั้งหมดของเซลล์แสงอาทิตย์คือ R_s โดยมีนิยามดังนี้

$$R_s = R_{cp} + R_{bp} + R_{bn} + R_{ch} \tag{2.3}$$

โดย R_{bp} และ R_{bn} คือค่าความต้านทานที่เกิดในเนื้อของสารกึ่งตัวนำชนิด พี และ เอ็น ตามลำดับ ความต้านทานในเนื้อสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$R_b = d/Nq\mu_b \tag{2.4}$$

- เมื่อ q คือประจุของพาหะ
- N คือความหนาแน่นของพาหะ
- μ_b คือความคล่องตัวของพาหะในเนื้อสารกึ่งตัวนำ
- d คือค่าความหนาประสิทธิผล

ในกรณีของการมีผิวสัมผัส ถ้าสารกึ่งตัวนำมีความหนา t_s และผิวสัมผัส มีลักษณะเป็น grid ค่า d จะมีค่าประมาณ $(t_s + t_x/2)$ เมื่อ t_x คือช่องว่างระหว่าง grid line ดังนั้น จากสมการ (2.4) สามารถแทนค่าได้เป็น

$$R_b = t_s/Nq\mu_b + t_x/2Nq\mu_b \tag{2.5}$$

ค่า R_s นี้ จะทำให้เกิดการลดทอนพลังงาน ของเซลล์แสงอาทิตย์ลงไป ΔP ซึ่งสามารถเปรียบเทียบ กับพลังงานรวมของเซลล์แสงอาทิตย์ P ได้ดังนี้

$$\Delta P/P \sim J_m^2 R_s / J_m V_m = J_m R_s / V_m \sim J_{sc} R_s / V_{oc} \tag{2.6}$$

อัตราการเกิดคู่วาหะอิเล็กตรอน-โฮล ในบริเวณเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิด พี ใกล้รอยต่อ (บริเวณที่ 2) จะขึ้นอยู่กับค่า Photon flux (ϕ) และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง $\alpha(\lambda)$ ของสารกึ่งตัวนำ

$$G(x) = \alpha\phi_0 \exp(-\alpha x) \tag{2.7}$$

เมื่อ ϕ_0 คือ Photon flux ที่ตกกระทบผิวรับแสง (ระยะ $x = 0$)

การสูญเสียพาหะในบริเวณนี้ จะเนื่องมาจากการรวมตัวในขณะที่พาหะเคลื่อนที่เข้าสู่

รอยต่อ พาหะจะมีระยะทางค่าหนึ่งที่จะเคลื่อนที่ไปได้ ก่อนจะเกิดการรวมตัว ซึ่งเรียกว่า Diffusion length (L_D) และจะมีอายุชีวิตของพาหะข้างน้อย (Minority Carrier Lifetime, τ) เป็นตัวกำหนด

$$L_D^2 = D\tau \quad (2.8)$$

เมื่อ D คือค่าคงที่ของการแพร่ของพาหะ มีค่าเป็นไปตามความสัมพันธ์ของ Einstein ดังนี้

$$D = \mu kT/q \quad (2.9)$$

หากพิจารณาโดยรวมแล้ว จะเห็นว่ากระแสขาออก J จะมีค่าที่น้อยกว่า กระแสไฟฟ้าแสง ในอุดมคติ J_L โดยจะถูกลดทอนด้วยฟังก์ชันหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับแรงดันขาออกของเซลล์นั้น ($H(V)$)

$$J = H(V) \cdot J_L \quad (2.10)$$

ในกรณีที่เข้าเซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันเป็นศูนย์ กระแสที่ไหลออกไปคือ J_{sc} ดังนั้น

$$J_{sc} = H(0) \cdot J_L \quad (2.11)$$

ค่า $H(0)$ นี้ มีชื่อเฉพาะว่า Quantum Efficiency เป็นค่าที่แสดงถึงผลตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต่อแสงความยาวคลื่นต่าง ๆ

จากรูปวงจรมุมของเซลล์แสงอาทิตย์ ค่ากระแสที่ไหลผ่านไดโอด J_D จะขึ้นอยู่กับ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับของไดโอด J_0 และค่า diode factor χ ดังต่อไปนี้

$$J_D = J_0 [\exp(\chi V) - 1] \quad (2.12)$$

$$\chi = q/nkT \quad (2.13)$$

n คือ ideality factor พิจารณาเมื่อพาหะเคลื่อนที่มาถึงขอบของ Depletion region ด้านสารชนิด n กระแสแพร่ของพาหะจะมีค่า

$$J_{od} = (qN_D D_n / L_n) \exp [-q(V_D - \Delta E_c) / kT] \quad (2.14)$$

- เมื่อ N_D = ความหนาแน่นของ donor ในสารชนิด เอ็น
 D_n = สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน
 L_n = ระยะทางในการแพร่ของอิเล็กตรอนในสารชนิด พี
 ΔE_c = ผลต่างของค่าระดับพลังงานในแถบนำไฟฟ้า ที่ 2 ด้านของ Depletion region

กระแสขาออกเมื่อไม่มีแสง ของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่า

$$I = (1 + R_s / R_p)^{-1} [I_o \exp \{ \chi (V - IR_s) \} + V / R_p - I_o] \quad (2.15)$$

และถ้ามีการฉายแสง

$$I = (1 + R_s / R_p)^{-1} [I_o \exp \{ \chi (V - IR_s) \} + V / R_p - I_o - H(V) I_L] \quad (2.16)$$

จะเห็นว่าค่า R_s , R_p , I_o , χ ต่างเป็นค่าที่ไม่ขึ้นอยู่กับสภาวะแสงเลย แต่จะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างและกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

ถ้าทำการย้ายข้างสมการ (2.16) เพื่อจะแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด จะได้

$$V_{oc} = \frac{1}{\chi} \ln \{ H(V_{oc}) I_L / I_o + 1 - V_{oc} / I_o R_p \} \quad (2.17)$$

และค่ากระแสลัดวงจร

$$I_{sc} = (1 + R_s / R_p)^{-1} \{ I_o \exp (-\chi I_{sc} R_s) - I_o - H(0) I_L \} \quad (2.18)$$

2.6 การพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

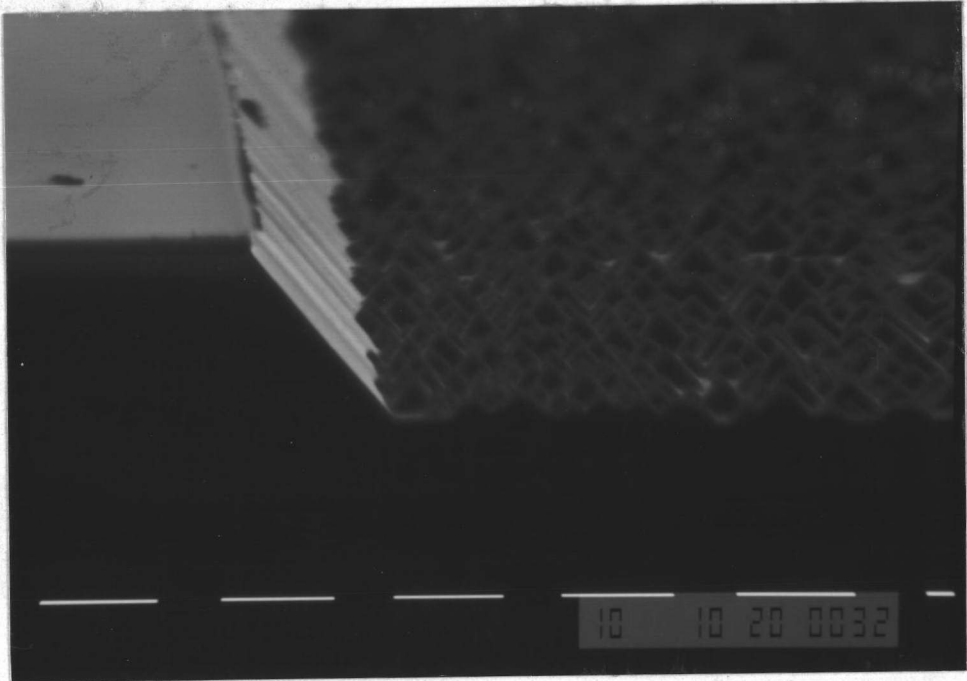
ดังได้กล่าวในสมการ (2.7) ถ้าเราสามารถเพิ่ม photon flux ได้ โดยพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ยังคงมีขนาดเท่าเดิม ก็จะช่วยให้เกิดการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ต่อหน่วยพื้นที่ของเซลล์มีค่าสูงขึ้น และจะทำให้ความหนาแน่นของกระแสมีค่า

สูงขึ้น การเพิ่ม photon flux ภายในเนื้อของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น เราจะต้องเพิ่มค่าของ ϕ_0 คือ photon flux ที่ตกกระทบผิวรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ เทคนิคการเพิ่ม ϕ_0 ได้มีผู้ทำการวิจัยและพัฒนากันอย่างจริงจัง นับตั้งแต่วิกฤตการณ์ด้านพลังงานในปี ค.ศ. 1973 เช่น การใช้ระบบรวมแสงให้มีความเข้มสูงมาก ส่องตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ข้อเสียของระบบนี้ คือ ค่าใช้จ่ายสูง, ระบบมีความใหญ่โตและมีน้ำหนักมาก อีกทั้งจะต้องมีระบบติดตามดวงอาทิตย์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย (10) จึงไม่มีความเหมาะสมนักในการนำไปใช้ในลักษณะการพัฒนาชุมชนที่ห่างไกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบการรวมแสงจะทำให้เกิดความร้อนสูงที่ตัวเซลล์ฯ ทำให้ต้องติดระบบระบายความร้อนให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ ผลของความร้อน จะทำให้การจ่ายกระแสไฟฟ้าแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง

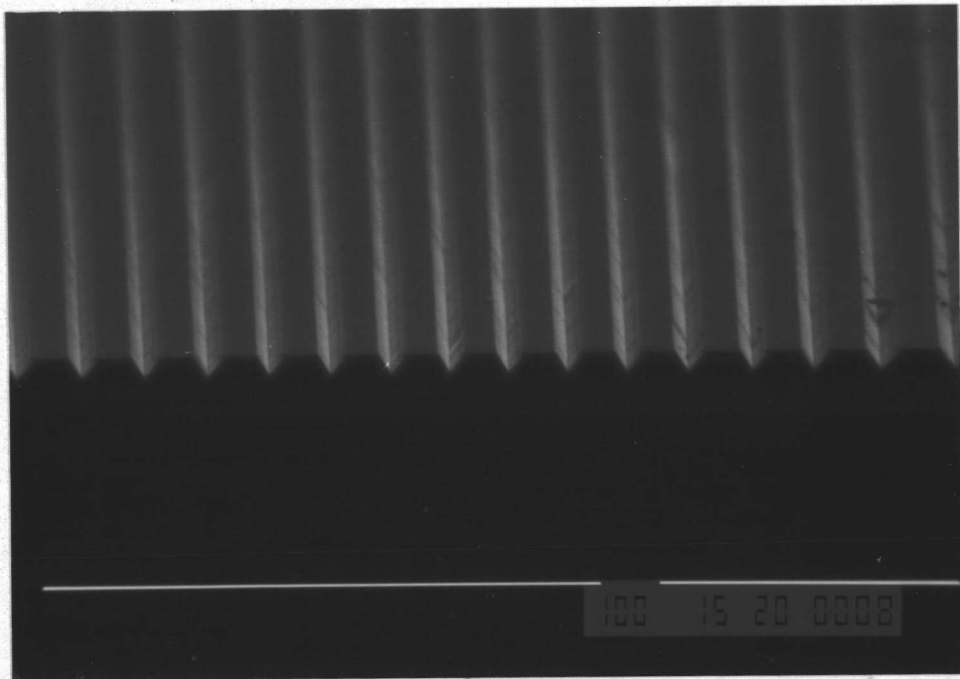
อีกวิธีหนึ่งที่มีผู้ทำวิจัยไว้ คือ การเตรียมผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่จะนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิค Texturization (11) ผิวของผลึกจะถูกกัดให้เป็นลักษณะพีระมิดขนาดเล็กจำนวนมาก จากนั้นจึงนำผลึกนี้ไปทำการสร้างขึ้นแพร์ซิม และอาศัยผิวของพีระมิดที่มีลักษณะเอียงเป็นผิวบังคับให้แสงที่สะท้อนออกจากผิว เข้าไปสู่ผิวรับแสงของพีระมิดอีกด้านหนึ่ง วิธีนี้ได้ผลดีพอสมควร พบว่าสามารถเพิ่มกระแสไฟฟ้าแสงได้จริง อย่างไรก็ตาม เทคนิค Texturization ยังเป็นกระบวนการทางเคมีที่ควบคุมยาก เพราะเป็นการกัดผิวผลึก โดยไม่มีการควบคุมรูปแบบ การเกิดพีระมิดจะมีลักษณะแบบสุ่ม (Randomize) และอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้มีจุดบกพร่องทางผลึกเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งส่งผลในเชิงลบ โดยอายุชีวิตของพาหะจะสั้นลง จนทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดต่ำลง

อีกประการหนึ่งคือ ผิวแบบ Texturization นี้ ยังไม่ดีนักในด้านการเพิ่ม photon flux เพราะจะเกิดลักษณะของ Diffuse Reflection มาก เพราะตำแหน่งของพีระมิดเป็นลักษณะสุ่มนั่นเอง ดังนั้น เมื่อมีแสงมาตกกระทบผิวพีระมิดด้านหนึ่ง จะมีโอกาสสูงที่จะกระจายออกจากผิวเซลล์แสงอาทิตย์โดยไม่ได้เข้าสู่ผิวพีระมิดลูกอื่นเลย

จากการพบปัญหานี้จึงได้มีแนวความคิดในการพัฒนาผิวแบบ Texturization ให้มีรูปแบบใหม่ โดยทำการบังคับตำแหน่งการกัดผิวหน้าให้เกิดเป็นร่องรูปตัว V ขนาดเล็กจำนวนมาก (V-groove) เพื่อเพิ่มโอกาสที่จะให้แสงสะท้อนที่ออกมาจากผิวเอียงด้านหนึ่ง เข้าสู่ผิวเอียงอีกด้านหนึ่งของร่อง เป็นการปรับเปลี่ยนลักษณะของ Randomized Structure ให้เป็นลักษณะของ Perpendicular Structure ทำให้มีความเหมาะสม กับการนำไปผลิตในระดับอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.11 ลักษณะผิวแบบพีระมิด



รูปที่ 2.12 ลักษณะผิวแบบร่องรูปตัว V