บทที่ 6
เซลแสงอาทิตย์ซิลิกอนและแบบอื่น

ในบทนี้จะกล่าวถึงเซลแสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอนในรูปต่าง ๆ กัน เช่น ซิลิกอนในรูปของผลึกเดี่ยว (single crystal) ผลึกเชิงซ้อน (polycrystal) และอมอฟัส (amorphous) โดยที่เซลแสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอนนี้มีโครงสร้างต่าง ๆ เช่นโครงสร้างแบบรอยต่อพี-เอน (p-n junction) แบบช็อตกี้แบริเออร์ (Schottky barrier) แบบ MIS (metal-insulator-semiconductor) เป็นต้น นอกจากนี้ ยังกล่าวถึงเซลแสงอาทิตย์ที่ทำจากแกลเลียมอาเซไนด์ (gallium arrenide) และแคดเมียมซัลไฟด์ (cadmium sulphide)

6.1 เซลแสงอาทิตย์ซิลิกอน

เนื่องจากซิลิกอนเป็นธาตุที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในโลกเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น และได้รับการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับอุตสาหกรรมอิเลคทรอนิคส์มานานแล้ว เซลแสงอาทิตย์ซิลิกอนนี้มีโครงสร้างต่าง ๆ หลายแบบเพราะได้รับการพัฒนามานานแล้ว และซิลิกอนที่ใช้มีรูปแบบต่าง ๆ กัน เช่นผลึกเดี่ยว ผลึกเชิงซ้อน เป็นต้น สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเซลแสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบต่าง ๆ

6.1.1 เซลแสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว

ในการสร้างเซลแสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวนั้น ต้องใช้ซิลิกอนที่มีความบริสุทธิ์สูง เทคโนโลยีที่ใช้สำหรับทำเซลแสงอาทิตย์สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

เทซิลิกอนจากเตาหลอมลงในรางตื้น ๆ ทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นทุบซิลิกอนที่เป็นแผ่นแข็งนี้ให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ซิลิกอนที่ได้นี้จะมีความบริสุทธิ์ ประมาณ 98-99% โดยที่สารเจือปนส่วนใหญ่คือเหล็กและอลูมิเนียม MG ซิลิกอนนี้เฉลี่ยแล้วขายกันราคาประมาณ 20 บาทต่อน้ำหนักหนึ่งกิโลกรัม (ราคาในปี ค.ศ. 1977)

2. ซิลิกอนชนิด metallurgical **ทำเป็นซิลิกอนชนิดสารกึ่งตัวนำ (Se G ซิลิกอน)**

ซิลิกอนที่ใช้ในการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (เช่นใช้ในการผลิตไดโอด ทรานซิสเตอร์ วงจรไอซี ฯลฯ) หรือใช้ในการสร้างเซลแสงอาทิตย์ (แบบผลึกเดี่ยว) ต้องใช้ซิลิกอนที่มีความบริสุทธิ์มากกว่า MG ซิลิกอน การทำให้ MG ซิลิกอนมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น (เป็น Se G ซิลิกอน) นั้น ใช้เทคนิคทำให้ MG ซิลิกอนอยู่ในรูปของสารประกอบ ไตรโคโลไซเลน (tricholosilane; Si HCl_3) เสียก่อน เพราะไตรโคโลไซเลนมีจุดเดือดต่ำ ประมาณ 31.8 °C เท่านั้น จึงง่ายต่อการแยกสารนี้ออกจากสารเจือปนอื่น จากปฏิกิริยาเคมีระหว่าง กรดเกลือ (HCl) และ MG ซิลิกอน โดยให้ Cu เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) จะได้ไตรโคโลไซเลน ดังสมการ

$$Si + 3\,HCl \longrightarrow Si\,HCl_3 + H_2$$

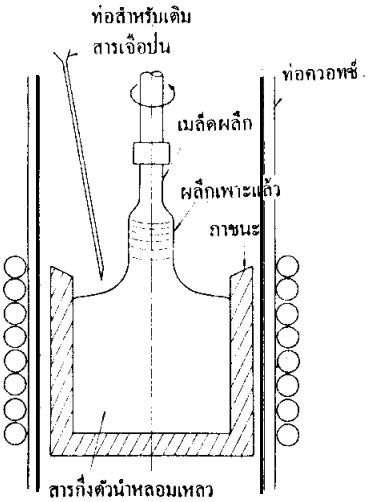
นำกาซที่ได้จากสมการข้างต้นผ่านเครื่องควบแน่นจะได้ของเหลว จากนั้นจึงนำของเหลวนี้ไปผ่านเครื่องกลั่นลำดับส่วน จะได้ไตรโคโลไซเลนนั้นที่มีความบริสุทธิ์สูง ในการแยก Se G ซิลิกอนจากไตรโคโลไซเลนนั้น ใช้ปฏิกิริยา reduction ด้วยไฮโดรเจน ปฏิกิริยานี้ใช้ความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 100 °C ดังสมการ

$$Si\,HCl_3 + H_2 \longrightarrow . Si + 3HCl$$

Se G ซิลิกอนที่ได้นี้จะอยู่ในรูปของผลึกเชิงซ้อน และเฉลี่ยแล้วมีราคาประมาณ 1,300 บาท ต่อน้ำหนักกิโลกรัม

3. ซิลิกอนชนิดสารกึ่งตัวนำทำเป็นแว่นผลึกซิลิกอนที่เป็นผลึกเดี่ยว

เพื่อให้เซลแสงอาทิตย์ที่สร้างจากซิลิกอนมีประสิทธิภาพสูง เราต้องใช้ซิลิกอนที่มีความบริสุทธิ์สูง เพราะว่าสารเจือที่เติมลงไปจำนวนเล็กน้อยจะได้มีผลตามที่ต้องการ และอีกประการหนึ่งคือต้องไม่มีการแตกแยกของโครงสร้างผลึก หรือความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างผลึกมีน้อย นั่นคือ ผลึกซิลิกอนต้องเป็นผลึกเดี่ยว แต่จากหัวข้อที่แล้วเราได้ซิลิกอนในรูปผลึกเชิงซ้อน วิธีมาตรฐานวิธีหนึ่งในการผลิตผลึกเดี่ยวคือวิธีการดึงผลึกหรือวิธีของโชราลสกี (Czochralski method) วิธีการนี้จะเป็นการดึงผลึกจากซิลิกอนที่หลอมเหลวโดยอาศัยเม็ดผลึกที่ทราบทิศทางผลึกที่แน่นอน การดึงเม็ดผลึกขึ้นอย่างช้า ๆ นี้ มีผลทำให้เฟสสารเหลวถูกดึงตามขึ้นมาด้วย ทำให้ผลึกเดี่ยวมีขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ โดยที่ซิลิกอนที่หลอมเหลวนั้นต้องอยู่ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย และเม็ดผลึกต้องมีขนาดใหญ่พอ วิธีการดังกล่าวนี้จึงเรียกว่าวิธีดึงผลึก เนื่องจากเราต้องการให้สารเจือมีความหนาแน่นอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นในการดึงผลึกขึ้นไป ต้องมีการหมุนแกนผลึกรอบตัวไปด้วย ดูรูปที่ 6-2



รูปที่ 6-2 แสดงอุปกรณ์ดึงผลึก

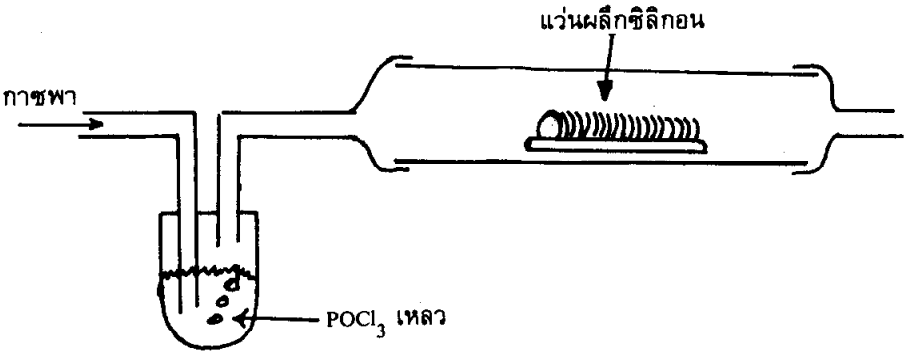
เราต้องควบคุมอัตราการหมุนรอบตัว ความเร็วในการดึงผลึก และอุณหภูมิ โดยทั่วไปอัตราการหมุนรอบตัวมีค่าประมาณ ⅛ ~ ½ รอบต่อวินาที และความเร็วในการดึงผลึกจะมีค่าประมาณ 10^{-4} - 3×10^{-2} ซม. ต่อวินาที ในการผลิตผลึกเดี่ยวด้วยวิธีนี้ เราจะได้ผลึกเดี่ยวที่

มีชนิด การนำกระแสและความต้านทานจำเพาะตามที่ต้องการได้ โดยการเปลี่ยนชนิดและจำนวนของสารเจือ

ผลึกเดี่ยวซิลิกอนที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10 ซม. และยาวประมาณ 1-2 เมตร ในขณะนี้เราจะได้มีซิลิกอนที่เติมสารเจือลงไปแล้ว (อาจเป็นชนิดเอนหรือชนิดพีก็ได้) ขั้นตอนต่อไปเราจะตัดท่อนซิลิกอนที่ได้จากการดึงผลึกนี้ ให้เป็นแว่นผลึก หนาประมาณ 0.5 - 1.0 มม. กรรมวิธีในการตัดจะใช้ใบเลื่อยซึ่งมีผงเพชรผสมอยู่และหมุนรอบตัวด้วยความเร็วสูง ภายหลังการตัดแล้วผิวของแว่นผลึกจะชำรุดหมดอันเนื่องจากการขัดสีกับผงเพชรของล้อตัด ดังนั้นกรรมวิธีขั้นต่อไปคือ การขัดผิวแว่นผลึกเพื่อกำจัดชั้นที่ชำรุด การขัดมักจะใช้ผงซิลิกอนคาร์ไบน์ (SiC) ซึ่งมีหลายชนิดแล้วแต่ขนาดของเม็ดผง การขัดขั้นแรก ๆ มักจะใช้เม็ดผงหยาบและค่อย ๆ ลดขนาดของเม็ดผงลงในขั้นต่อ ๆ ไปจนกระทั่งถึงขั้นขัดมัน การขัดมันมักจะใช้ผงอลูมินา ขนาดของผงอยู่ในช่วง 0.5 - 0.1 ไมโครเมตร กรรมวิธีการขัดผิวที่กล่าวมานี้เป็นกรรมวิธีแบบกายภาพ ถ้าการกำจัดชั้นชำรุดไม่อาจจะกำจัดได้โดยวิธีทางกายภาพ จะอาศัยวิธีทางเคมี ซึ่งเรียกว่า กรรมวิธีเอดชิง (etching method) ในขั้นตอนนี้พบว่ามีการสูญเสียผลึกเดี่ยวซิลิกอนจากที่ปลูกผลึกได้เป็นแท่งจนถึงตัดเป็นแว่นผลึกบาง ๆ ที่ขัดผิวเรียบร้อยแล้ว ประมาณ 60% และราคาของผลึกเดี่ยวซิลิกอนประมาณ 40,000 บาท ต่อน้ำหนักหนึ่งกิโลกรัม ด้วยเหตุนี้ราคาของเซลแสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวจึงมีราคาค่อนข้างแพง

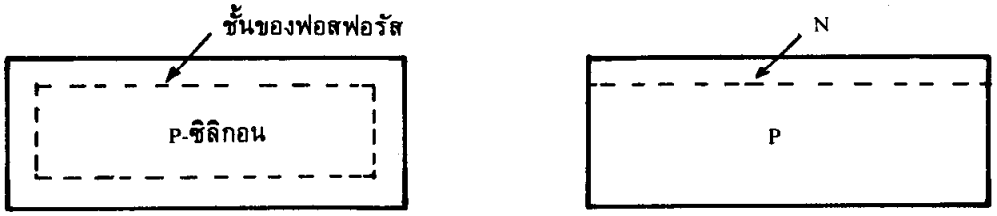
4. แว่นผลึกซิลิกอนที่เป็นผลึกเดี่ยวทำเป็นเซลแสงอาทิตย์

ภายหลังจากการเอดชิงแว่นผลึกซิลิกอนเพื่อกำจัดชั้นที่ชำรุดจากแว่นผลึก และทำความสะอาดแล้ว ขั้นตอนต่อไปเราจะเติมสารเจือลงไปบนแว่นผลึกเพื่อสร้างรอยต่อพีเอนขึ้นโดยกรรมวิธีการแพร่สาร ในวิธีการนี้ สารเจือถูกเติมลงสู่แว่นผลึกโดยการแพร่ผ่านผิวของแว่น ผลึกซิลิกอน ซึ่งถูกเผา ณ อุณหภูมิสูง เช่นถ้าให้แว่นผลึกเป็นสารชนิดพี สารเจือที่เติมในขั้นตอนนี้ คือฟอสฟอรัส ซึ่งจะแพร่สารด้วย $POCl_3$ ดังรูปที่ 6-3



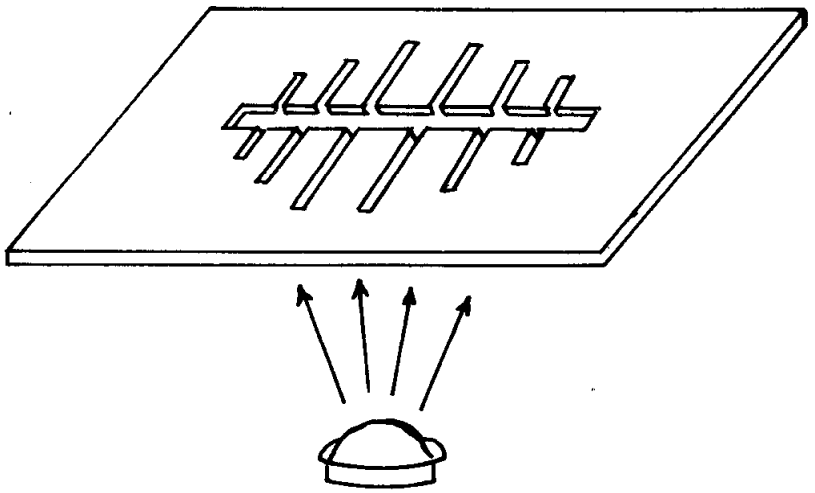
รูปที่ 6-3 แสดงการเติมสารเจือฟอสฟอรัสด้วยวิธีแพร่สาร

สารเจือนี้จะแพร่ซึมแว่นผลึกซิลิกอนโดยรอบ ดังรูปที่ 6-4 ก. จากนั้นจะใช้วิธีการเอดชิง เพื่อกัดสารเจือส่วนที่เกินที่ผิวออกไป ดังรูปที่ 6-4 ข.



รูปที่ 6-4 แสดงการกระจายของสารเจือฟอสฟอรัส (ก) หลังจากแพร่สารแล้ว (ข) หลังจากการเอดชิงด้านหลังและด้านข้างออกแล้ว

ขั้นตอนต่อไปจะสร้างผิวสัมผัสโลหะ (metal contact) กับรอยต่อพีเอน ทั้งด้านชนิดพีและชนิดเอน วิธีการมาตรฐานที่ส่วนมากใช้กันอยู่ คือการฉาบไอโลหะภายใต้สูญญากาศ (vacuum evaporation) ด้านหลังของเซลจะฉาบไอโลหะตลอดทั้งหมด สำหรับด้านหน้าของเซลซึ่งรับแสงอาทิตย์ การฉาบไอโลหะจะทำเป็นรูปนิ้วมือ หรือเป็นตะแกรง โดยใส่หน้ากากปิดแว่นผลึกไว้ขณะที่ทำการฉาบไอ ดูรูปที่ 6-5



รูปที่ 6-5 แสดงการฉาบไอโลหะเป็นรูปตะแกรง

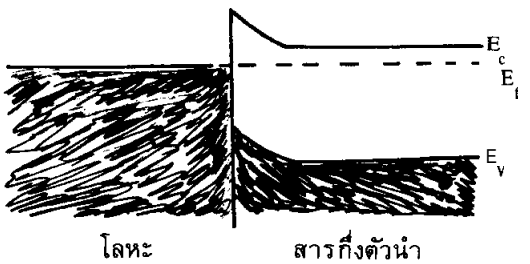
เมื่อทำขั้วโลหะทั้งสองด้านของแว่นผลึกแล้ว ขั้นต่อไปก็คือการเคลือบด้านหน้าของแว่นผลึกด้วยสารต้านการสะท้อนแสง (AR coating) โดยใช้กรรมวิธีการฉาบไอเช่นกัน แว่นผลึกที่ได้ในขั้นนี้เป็นเซลแสงอาทิตย์เกือบสมบูรณ์แล้วเหลือแต่เพียงการห่อหุ้ม (encapsulation) ตัวเซลเท่านั้น

5. การห่อหุ้มเซลแสงอาทิตย์

ขั้นตอนสุดท้ายของการทำเซลแสงอาทิตย์ คือ การห่อหุ้มเซลแสงอาทิตย์เพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นเข้าถึงตัวเซล โดยปกติแล้วจะนำเซลแสงอาทิตย์แต่ละเซลมาต่อกันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้า เช่น ,6, 9 หรือ 12 โวลท์ เป็นต้น เป็นแผง (module) ของเซลแสงอาทิตย์ แล้วจึงนำแผงของเซลแสงอาทิตย์นี้ไปทำการห่อหุ้ม วัสดุที่ใช้ทำการห่อหุ้มเซล ต้องเป็นวัสดุที่ยอมให้แสงทะลุผ่านเข้าไปถึงเซลได้ และทนต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี วัสดุที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือแก้ว

6.1.2 เซลแสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบช็อตกี้แบริเออร์

เซลแสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบช็อตกี้แบริเออร์มีโครงสร้างเป็นรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ (ใช้ซิลิกอน) เมื่อสร้างรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำแล้วจะเกิดการโค้งงอของแถบพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 6-6



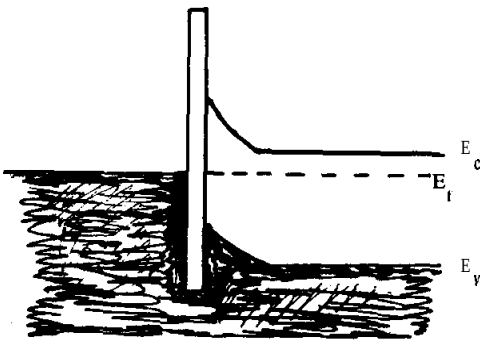
รูปที่ 6-6 แสดงพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

การโค้งงอของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากความแตกต่างของ work function ระหว่างโลหะ (ϕ_m) และสารกึ่งตัวนำ (ϕ_s) ในทางปฏิบัติแล้วพบว่าผิวสัมผัสรอยต่อแบบช็อตกี้แบริเออร์นี้ ถูกกำหนดโดย surface state ที่บริเวณรอยต่อ

เซลแสงอาทิตย์แบบช็อตกี้แบริเออร์นี้สร้างขึ้นได้อย่างง่าย ๆ กล่าวคือ ใช้วิธีการฉาบไอโลหะลงไปบนสารกึ่งตัวนำที่เติมสารเจือแล้ว จะได้รอยต่อแบบช็อตกี้แบริเออร์ขึ้น เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบรอยต่อแบริเออร์จะทำให้เกิดคู่อิเลคตรอนโฮลขึ้นในบริเวณรอยต่อนี้ สนามไฟฟ้าในบริเวณแถบพลังงานที่โค้งงอนี้จะทำให้อิเลคตรอน โฮลที่เกิดขึ้นไหลไปคนละทางทำให้เกิดกระแสโฟโตขึ้นได้

6.1.3 เซลแสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบ MIS (metal-insulator-semiconductor)

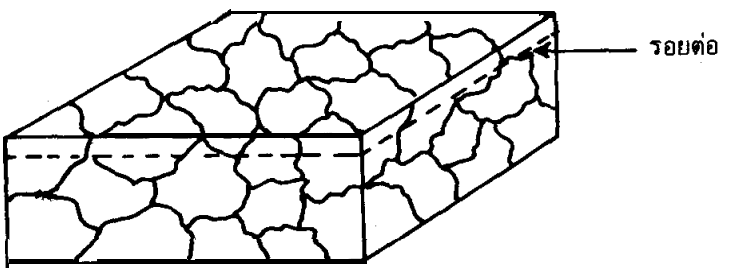
เซลแสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบ MIS นี้มีลักษณะคล้ายกับแบบช็อตกี้แบริเออร์ เพียงแต่ระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำนี้มีชั้นของฉนวนสอดแทรกอยู่ ชั้นของฉนวนที่สอดแทรกอยู่นี้บางมากอยู่ในลำดับของ 10 A° เพื่อให้กระแสพาหะทะลุผ่านไปได้โดยอาศัยปรากฏการณ์ tunneling รูปที่ 6-7 แสดงแถบพลังงานของเซลแสงอาทิตย์ แบบ MIS



รูปที่ 6-7 แสดงแถบพลังงานของเซลแสงอาทิตย์แบบ MIS สำหรับฉนวนที่บางมาก ๆ นี้ ส่วนใหญ่จะเป็นชั้นของออกไซด์

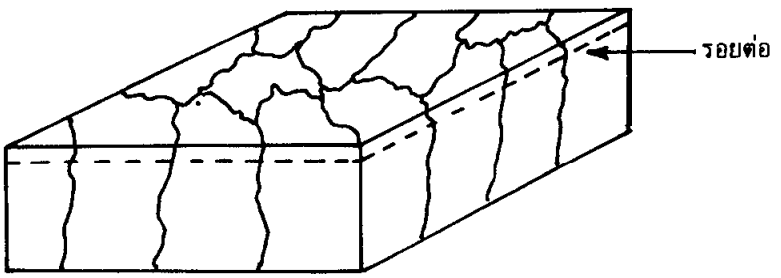
6.1.4 เซลแสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเชิงซ้อน

การใช้ซิลิกอนในรูปผลึกเชิงซ้อนมาสร้างเซลแสงอาทิตย์ ข้อดีก็คือเป็นการลดต้นทุนการผลิต เพราะผลึกเชิงซ้อนเตรียมได้ง่ายกว่าและราคาถูกกว่าผลึกเดี่ยว แต่มีปัญหาสำคัญคืออิทธิพลของ grain boundary ที่มีต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของเซลแสงอาทิตย์ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของเซลแสงอาทิตย์แบบนี้ไม่สูงมากนัก เซลแสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเชิงซ้อนมีอยู่ 3 ลักษณะด้วยกันดังนี้



รูปที่ 6-8 แสดงเซลแสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเชิงซ้อนที่ผลึกย่อยมีการเรียงตัวอย่างกระจัดกระจาย

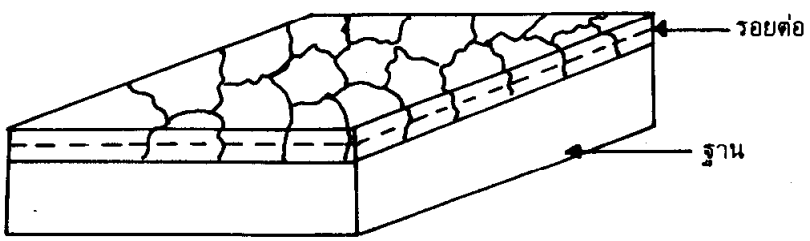
รูปที่ 6-8 เป็นกรณีที่ผลึกย่อยมีการเรียงตัวอย่างกระจัดกระจาย ผลึกย่อยส่วนบนเท่านั้นจึงมีบทบาทต่อการเป็นเซลแสงอาทิตย์ สำหรับส่วนล่างนั้นเนื่องจากอิทธิพลของ grain boundary ทำให้ความเร็วในการรวมตัวสูง ดังนั้นแสงที่ทำให้เกิดพาหะประจุ (charge carriers) ขึ้นในช่วงลึกของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้พาหะเหล่านี้เกิดการรวมตัวขึ้นก่อนที่จะไปถึงบริเวณรอยต่อของเซลแสงอาทิตย์ ถ้าเป็นการเรียงตัวของผลึกแบบไฟบรัส (fibrous orientation) ดังแสดงในรูปที่ 6-9



รูปที่ 6-9 แสดงเซลแสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเชิงซ้อนที่ผลึกย่อยมีการเรียงตัวแบบไฟบรัส

การเรียงตัวของผลึกย่อยในลักษณะเช่นนี้ ทำให้พาหะที่เกิดขึ้นในบริเวณลึก ๆ ของสารกึ่งตัวนำ ไม่เกิดการรวมตัวกันก่อนเนื่องจาก grain boundary ผลึกเชิงซ้อนซิลิกอนที่มีการเรียงตัวของผลึกย่อยแบบนี้ จึงเหมาะสมที่จะใช้สร้างเซลแสงอาทิตย์ในแง่ของการค้า

เซลแสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเชิงซ้อนอีกลักษณะหนึ่งเป็นแบบฟิล์มบาง แสดงดังรูปที่ 6-10 เซลแสงอาทิตย์ในลักษณะนี้จะมีชั้นบาง ๆ ของผลึกเชิงซ้อน

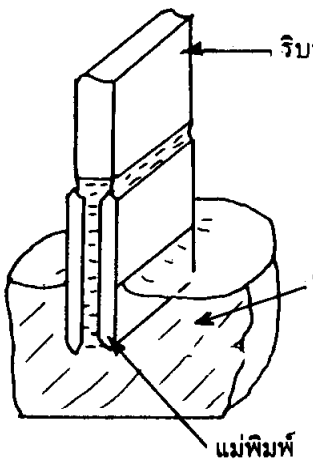


รูปที่ 6-10 แสดงเซลแสงอาทิตย์ซิลิกอนแบบผลึกเชิงซ้อนที่เป็นฟิล์มบาง

ซิลิกอน อยู่บนฐานรองเช่นแกรไฟต์ สำหรับความหนาของชั้นบาง ๆ ของผลึกเชิงซ้อนซิลิกอนนี้ควรจะน้อยกว่าขนาดของผลึกย่อย

6.1.5 เซลแสงอาทิตย์ที่ทำจากริบบอนซิลิกอน

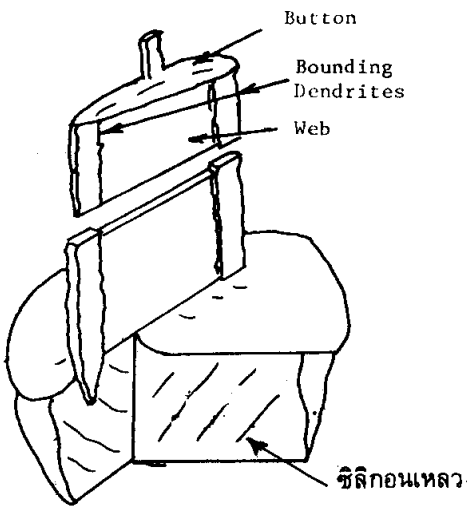
การสร้างเซลแสงอาทิตย์จากผลึกเดี่ยวซิลิกอนโดยกรรมวิธีที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นสิ้นเปลืองวัสดุและพลังงานมาก การดึงผลึกซิลิกอนในรูปของริบบอนที่มีความหนาที่เหมาะสมเป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยแก้ปัญหานี้ เทคนิคที่ใช้ในการปลูกผลึกซิลิกอนริบบอน ได้แก่ วิธี EFG (Edge-defined Film-fed Growth) วิธี dendritic web และวิธีปลูกผลึกแบบริบบอนกับริบบอน (ribbon to ribbon)



รูปที่ 6-11 การปลูกผลึกซิลิกอนริบบอนโดยวิธี EFG

สำหรับวิธี EFGนั้นคล้ายกับวิธีการดึงผลึกของโซราลสกี เว้นแต่รูปร่างของผลึกที่ดึงขึ้นมาได้นั้น ขึ้นกับแม่พิมพ์ (die) ซึ่งส่วนใหญ่ทำจากแกร์ไฟต์ โดยการดึงผลึกด้วยวิธี EFG นี้ เราสามารถจะได้ผลึกในรูปของริบบอนบาง ๆ จากผลึกที่หลอมละลายโดยตรง ดังนั้นในอุตสาหกรรมเซลแสงอาทิตย์ สามารถดึงผลึกริบบอนครั้งละหลาย ๆ แผ่น พร้อมกันจากซิลิกอนที่หลอมเหลวแห่งเดียวกันได้และผลึกริบบอนที่เตรียมได้โดยวิธีนี้ มีหน้ากว้างมากถึงประมาณ 7.5 ซม. ดังนั้นวิธีการนี้ จึงเหมาะที่จะใช้ผลิตเซลแสงอาทิตย์จำนวนมาก ๆ (mass production)

อัตราการแข็งตัวของการปลูกผลึกแบบนี้เร็วกว่าของการปลูกผลึกด้วยวิธีโชราลสกี ซึ่งมีผลให้โครงสร้างของผลึกมีความสมบูรณ์น้อยกว่า แต่ปัญหาส่วนใหญ่ของการปลูกผลึกซิลิกอนวิธีนี้ได้แก่คุณภาพของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ ซึ่งส่วนใหญ่ใช้แกร์ไฟต์ ทำให้อณูของคาร์บอนหรือ ซิลิกอนคาร์ไบน์ (SiC) ปนอยู่ในเนื้อของริบบอนซิลิกอน ซึ่งเป็นสาเหตุใหญ่ที่ทำให้เซลแสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมาโดยใช้ริบบอนซิลิกอนที่ปลูกด้วยวิธี EFG นี้ มีคุณสมบัติเลวลง

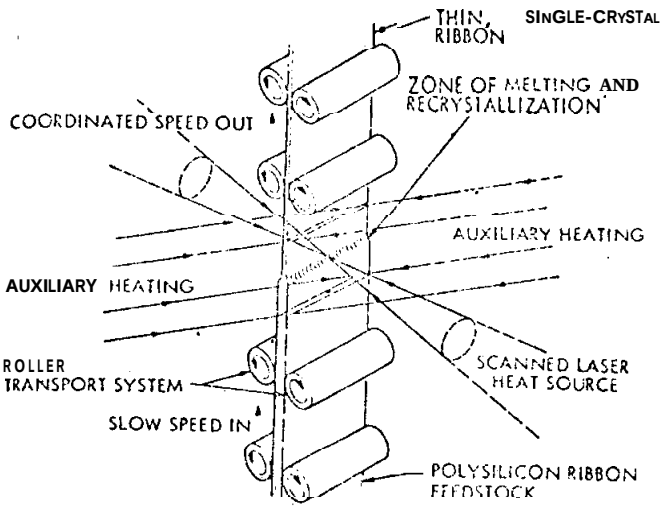


รูปที่ 6-12 การปลูกผลึกซิลิกอนริบบอนโดยวิธี dendritic web

สำหรับวิธี dendritic web นั้น แสดงไว้ดังรูปที่ 6-12 เทคนิคของ dendritic web นั้นต่างกับเทคนิคของ EFG กล่าวคือ ไม่ต้องมีแม่พิมพ์ แต่ใช้ dendrite ซิลิกอน 2 อัน จุ่มลงในซิลิกอนที่หลอมเหลว แล้วดึงขึ้นมาอย่างช้า ๆ ส่วนที่เป็นแผ่นบาง ๆ (web) ของซิลิกอนเหลวจะอยู่ระหว่าง button และ dendrite ทั้งสอง เมื่อแผ่นบาง ๆ ของซิลิกอนเหลวนี้แข็งตัวจะกลายเป็นริบบอนซิลิกอนที่เป็นผลึกเดี่ยว

เนื่องจากวิธีการปลูกผลึกซิลิกอนริบบอนโดยวิธี dendritic web นั้น ไม่ต้องใช้แม่พิมพ์ ดังนั้น โครงสร้างของซิลิกอนริบบอนที่ได้จึงดีพอ ๆ กับวิธีดึงผลึกของโชราลสกี แต่ข้อเสียของวิธี dendritic web นั้น สามารถผลิตซิลิกอนริบบอนได้ในอัตราค่อนข้างช้า

วิธีปลูกผลึกแบบริบบอนกับริบบอน เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ไม่มีแม่พิมพ์ วิธีนี้ได้ผลึกแบบริบบอนในรูปผลึกเชิงซ้อน แต่สามารถทำเป็นซิลิกอนริบบอนที่เป็นผลึกเดี่ยวโดยฉายแสงเลเซอร์ผ่านเข้าไป ริบบอนจะหลอมในบริเวณแคบ ๆ และจะจัดเรียงตัวใหม่ (recrystallize) กลายเป็นผลึกเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 6-13

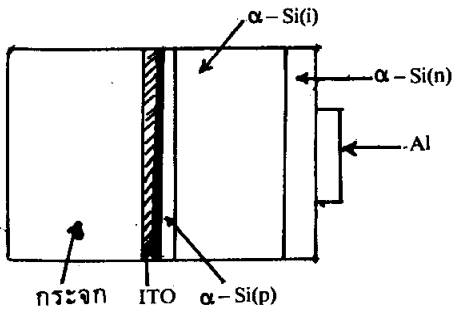


รูปที่ 6-13 แสดงซิลิกอนริบบอนที่ถูกทำ recrystallize ด้วยเลเซอร์

6.1.6 เซลแสงอาทิตย์ที่ทำจากอมอฟัสซิลิกอน

อมอฟัสซิลิกอน (ใช้ตัวย่อ α – Si) เป็นวัสดุที่เตรียมได้ง่ายและมีราคาถูกเมื่อเทียบกับผลึกเดี่ยวซิลิกอน และผลึกเชิงซ้อนซิลิกอน ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพของเซลแสงอาทิตย์ที่ทำจาก α – Si จะไม่สูงมากนัก ข้อที่น่าสนใจของ α – Si คือมีแถบห้ามพลังงาน (ประมาณ 1.55 eV) ที่เหมาะสมกับสเปคตรัมของดวงอาทิตย์ นอกจากนี้ยังทำเป็นฟิล์มบางได้ง่าย และมีค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนแสงสูง α – Si สามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น vacuum evaporation cathod sputtering electrolytic deposition และ glow discharge deposition เซลแสงอาทิตย์ที่ทำจาก α – Si อาจมีโครงสร้างได้หลายแบบ เช่น แบบ pn แบบ p-i-n และแบบช็อตกี้-แบริเออร์ เป็นต้น

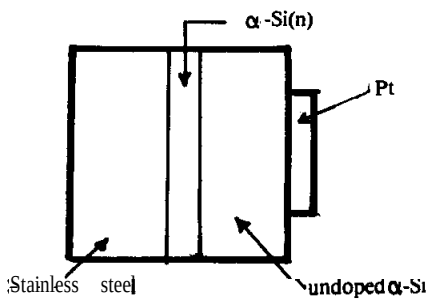
คาร์ลสัน (Carlson) ได้ทดลองสร้างเซลแสงอาทิตย์ จาก α – Si ที่มีโครงสร้างเป็นแบบ p-i-n โดยใช้แก้วเป็นฐาน ดังแสดงในรูปที่ 6-14



รูปที่ 6-14 แสดงโครงสร้างของเซลแสงอาทิตย์แบบ p-i-n ที่ทำจาก -Si

ทางด้านรับแสงของเซลใช้ขั้วโลหะโปร่งแสง ITO (indium tin oxide) จากนั้นจึงเป็นชั้นของ α-Si ชนิดพี สำหรับชั้น i นั้นเป็น α-Si ที่ไม่ได้เติมสารเจือ (undoped α-Si) ต่อจากนั้นจึงเป็นชั้นของ α-Si ชนิดเอน ขั้วโลหะด้านหลังของเซลเป็นอลูมิเนียม สำหรับชั้นพีและชั้นเอนนั้นหนาหลายร้อยอังสตรอม ส่วนชั้น i หนาประมาณ 1 ไมครอน ประสิทธิภาพของเซลแสงอาทิตย์แบบนี้มีค่าประมาณ 2.4%

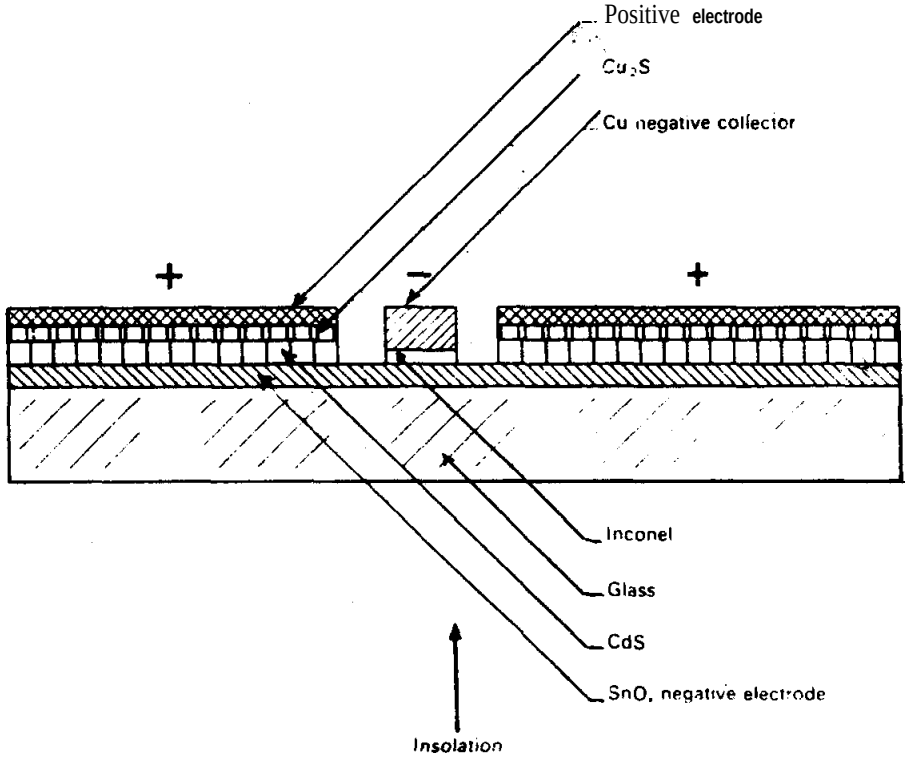
สำหรับเซลแสงอาทิตย์ที่ทำจาก α -Si ซึ่งมีโครงสร้างแบบช็อตกี้แบริเออร์นั้น ฐานที่ใช้คือ stainless steel ต่อจากนั้นเป็นชั้นของ α-Si ที่ไม่เติมสารเจือ สำหรับโลหะที่ใช้ทำรอยต่อแบบช็อตกี้แบริเออร์นั้นได้แก่ พลาตินัม (อาจจะเป็น อลูมิเนียม โครเนียม เป็นต้น) ดังแสดงในรูปที่ 6-15 เซลแสงอาทิตย์แบบนี้ให้ประสิทธิภาพสูงสุดถึง 6%



รูปที่ 6-15 แสดงโครงสร้างของเซลแสงอาทิตย์แบบช็อตกี้แบริเออร์ ที่ทำจาก α-Si

6.2 เซลแสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์

สารที่ได้รับความสนใจมากที่สุดในการทำวิจัยเกี่ยวกับเซลแสงอาทิตย์ รองลงมาจากซิลิกอนคือ แคดเมียมซัลไฟด์ สำหรับแคดเมียมซัลไฟด์นั้น จะให้ประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ถ้าใช้ร่วมกับทองแดงซัลไฟด์ (Cu_2S) ในรูปของ Cd S - Cu_2 S heterojunction เทคโนโลยีที่ใช้เรียกว่าเซลแบบ front wall กล่าวคือประกอบด้วยชั้นของ CdS ซึ่งหนาประมาณ 20 ไมโครเมตรเป็นฐาน และฉาบไอ Cu_2S ในลักษณะฟิล์มบาง ๆ บนชั้นของ CdS และทั้งหมดจะถูกปิดให้แน่น (sealed) อยู่ในเปลือกหุ้มที่เป็นแก้ว ต่อมาได้มีการปรับปรุงโครงสร้างของเซลแสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ ให้มีโครงสร้างเป็นแบบ back-wall ดังแสดงในรูป 6-16 ซึ่งเป็นภาคตัดขวางของเซลแสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์



รูปที่ 6-16 แสดงภาคตัดขวางของเซลแสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์

โดยทั่วไปจะใช้กระจกเป็นฐาน (เรียกกระจกนี้ว่า window เพราะแสงอาทิตย์ต้องผ่านกระจกก่อนถึงเซล) แล้วใช้กรรมวิธีทางเคมีพ่น (spray) ชั้นของสารที่นำไฟฟ้า ดีบุกออกไซด์ ซึ่งเป็นสารโปร่งแสงลงบนกระจก จากนั้นจึงฉาบไอชั้น CdS ลงไป ถัดจากนั้นจึงเป็นชั้นของ Cu_2S เซลในลักษณะเช่นนี้ มุ่งหมายที่จะรับแสงอาทิตย์ทางด้านหลัง กล่าวคือแสงอาทิตย์ต้องผ่านกระจกที่เป็นฐานและชั้นของสารกึ่งตัวนำก่อนจะถึงชั้นของ barrier หรือรอยต่อ โครงสร้างของเซลในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า เซลแบบ back-wall

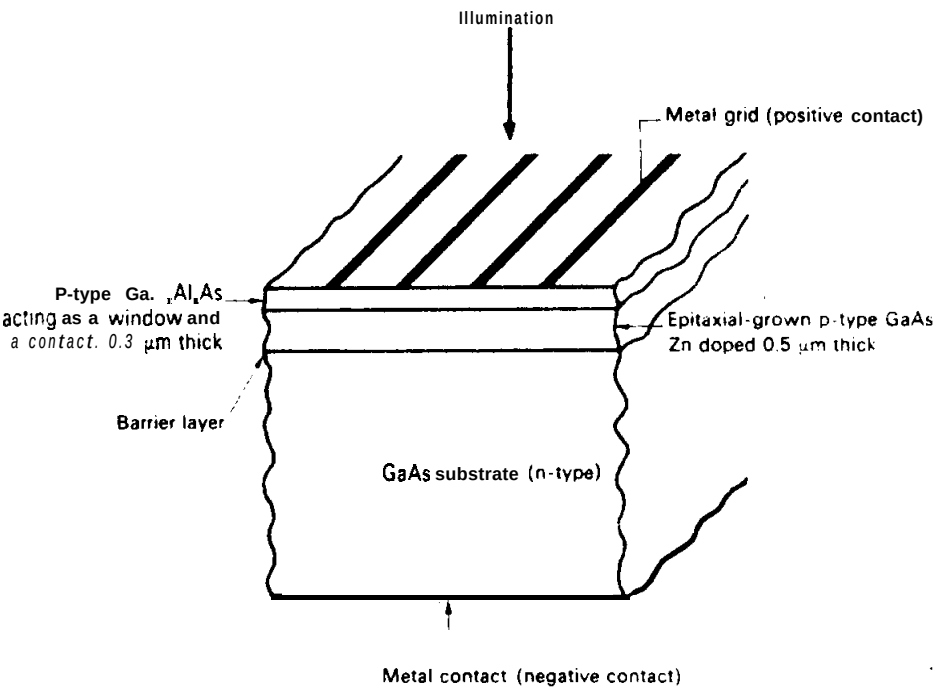
เซลแสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์นี้ใช้เทคนิคของฟิล์มบาง จึงทำให้เซลมีขนาดโตได้ นอกจากนี้ยังทำให้ต้นทุนในการผลิตเซลแสงอาทิตย์ต่ำลงอย่างมาก เนื่องจากประการแรก เซลในลักษณะนี้ใช้เนื้อสารที่ทำเซลน้อยเพราะชั้นต่าง ๆ บางมาก ประการที่สองสารที่ใช้อยู่ในรูปของผลึกเชิงซ้อนซึ่งราคาถูกกว่าซิลิกอนที่เป็นผลึกเดี่ยว แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลแสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์อยู่ในช่วง 400-500 mV ซึ่งต่ำกว่าของเซลซิลิกอน แต่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีค่าพอ ๆ กับของเซลซิลิกอน ประสิทธิภาพสูงสุดของเซลมีค่าประมาณ 8% ถึง 8.5%

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าต้นทุนในการผลิตเซลแสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์จะต่ำ แต่มีปัญหาในด้านการใช้งาน กล่าวคือ เกิดการเสื่อมคุณภาพของเซล อันเนื่องจาก ความชื้น อุณหภูมิสูงเมื่อถูกแสง (ถ้าอุณหภูมิของเซลสูงกว่า 60 °C เซลจะเสื่อมคุณภาพ) และการพองร่อนของเซล อันเนื่องจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวของสารที่ใช้สร้างเซลไม่เท่ากัน ถ้าหากปรับปรุงแก้ไขการเสื่อมคุณภาพของเซลแสงอาทิตย์แคดเมียมซัลไฟด์ได้แล้ว จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานบนพื้นโลกได้อย่างกว้างขวาง เพราะเซลแบบนี้มีต้นทุนการผลิตต่ำ

6.3 เซลแสงอาทิตย์แกลเลียมอาเซไนด์

แกลเลียมอาเซไนด์เป็นสารที่ใกล้เคียงกับสารที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้สร้างเซลแสงอาทิตย์ เพราะมีค่าแถบพลังงานต้องห้าม (Eg = 1.43 eV) ที่เหมาะสมกับสเปคตรัมของดวง

อาทิตย์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานได้ในสภาพที่อุณหภูมิสูง ๆ และแสงความเข้มสูง ๆ ได้ ตลอดจนคงทนต่อกัมมันตรังสีและอนุภาคที่มีพลังงานสูง จึงเหมาะสมที่จะใช้งานในอวกาศ แต่อย่างไรก็ตาม ข้อเสียคือแกลเลียมอาเซไนด์เป็นสารที่มีราคาแพงมากและหาได้ยากกว่าเมื่อเทียบกับซิลิกอน ดังนั้นเพื่อให้ได้เซลแสงอาทิตย์แกลเลียมอาเซไนด์ที่มีราคาถูกจึงต้องใช้เทคนิคของฟิล์มบางสร้างเซล เนื่องจากแกลเลียมอาเซไนด์เป็นสารที่มีความเร็วในการรวมตัวที่ผิวสูง จึงต้องใช้สารที่ทำหน้าที่เป็น window ปิดทับแกลเลียมอาเซไนด์เสียก่อน ซึ่งมักใช้แกลเลียมอลูมิเนียมอาเซไนด์ (GaAlAs)



รูปที่ 6-17 แสดงภาคตัดขวางของเซลแสงอาทิตย์แกลเลียมอาเซไนด์

แบบฝึกหัด

1. จงอธิบายวิธีการดึงผลึกของโชราลสกีโดยสังเขป
2. จงเปรียบเทียบเซลแสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิกอนในรูปของผลึกเชิงซ้อนและอมอร์ฟัส
3. วิธีการปลูกผลึกซิลิกอนริบบอน EFG และวิธี dendritic web ต่างกันอย่างไร
4. เซลแสงอาทิตย์ที่ทำจากแกลเลียมอาเซไนด์และแคดเมียมซัลไฟด์มีโครงสร้างแตกต่างกันอย่างไร