

การประยุกต์ใช้งานฟิล์มบาง a-Si:H เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

บทนำ

วัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) ได้รับความสนใจนำมาผลิตเป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์มากมายหลายชนิด เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ ทรานซิสเตอร์ฟิล์มบาง vidicon LED ฟิล์มบาง ฯลฯ ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตกันมากที่สุด โดยได้ถูกนำไปใช้งานเกี่ยวกับ consumer products หลายรูปแบบ และใช้ในงานผลิตไฟฟ้าในที่ห่างไกล ดังในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ได้มีการประมาณว่ายอดการขายของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน และโมดูล สูงกว่าเซลล์ฯ ชนิดผลึกแล้วในปัจจุบัน (2)

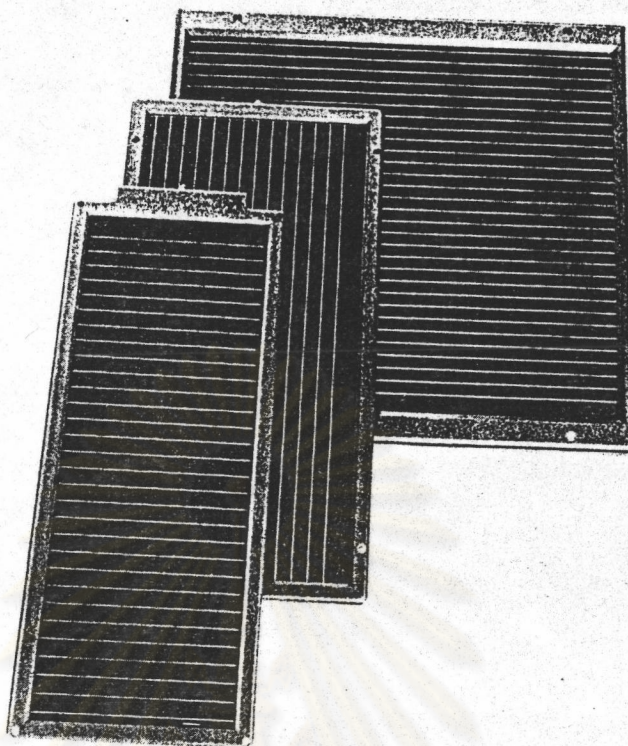
เนื้อหาในบทนี้ในตอนต้นจะกล่าวถึง เหตุผลข้อดีเด่นของการผลิต a-Si:H เป็น เซลล์แสงอาทิตย์ หลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H และในตอนท้ายจะกล่าวถึงเทคโนโลยีวิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จาก a-Si:H ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ผู้วิจัยและคณะได้ออกแบบและสร้างขึ้นเอง

คุณสมบัติเด่นของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จากอะมอร์ฟัสซิลิคอน

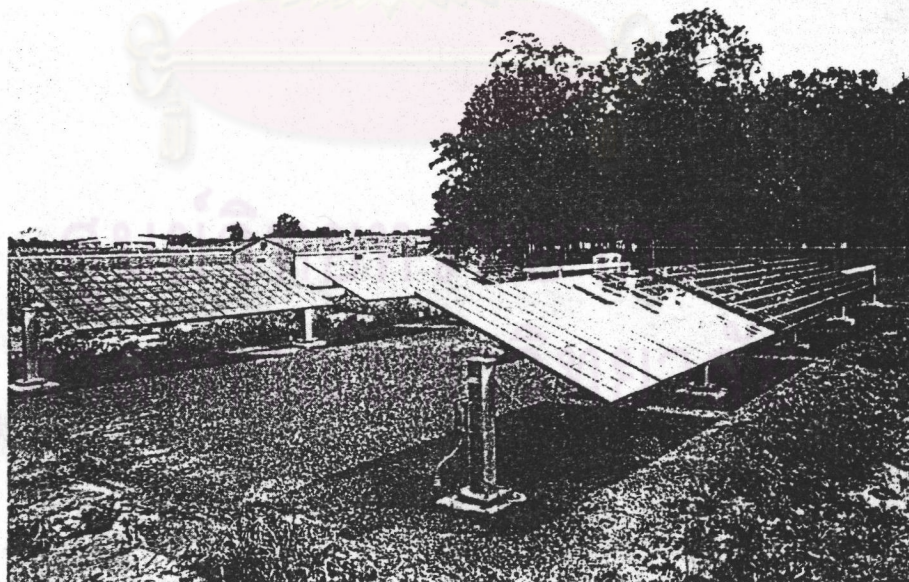
ข้อดีเด่นหลายประการที่ทำให้ a-Si:H เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการทำเซลล์แสงอาทิตย์ คือ

- มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงมาก ($> 10^5 \text{ cm}^{-1}$) ในย่านของแสงที่ตามองเห็น ซึ่งทำให้ต้องการฟิล์มบางเพียง 0.1-0.5 μm เท่านั้นในการทำสิ่งประดิษฐ์ นั่นคือต้นทุนในด้านวัสดุจะต่ำ

- กระบวนการผลิตใช้อุณหภูมิต่ำ ($\sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$) และสามารถเคลือบเป็นพื้นที่กว้างอย่างสม่ำเสมอ ประหยัดพลังงานในการผลิต



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างโมดูลของเซลล์ฯ ชนิด a-Si:H ขนาดเล็ก สำหรับใช้งาน consumer electronics (2)



รูปที่ 4.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H สำหรับการผลิตพลังงานในที่ห่างไกล ชุมชนมีขนาด 20 kW ตั้งอยู่ที่ Limerick Philadelphia (2)

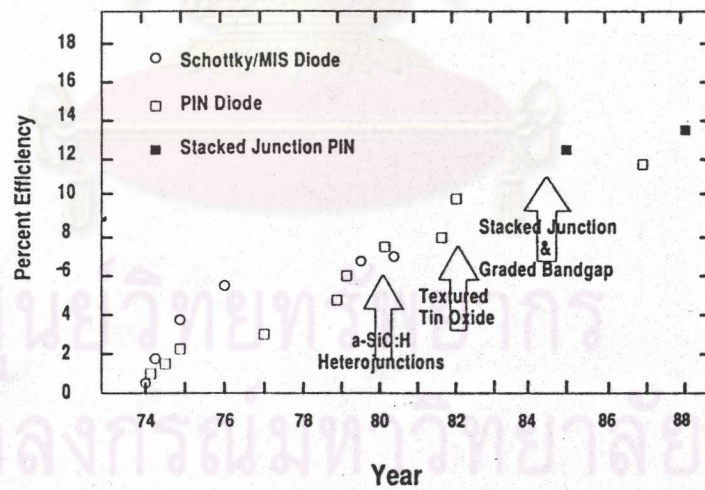
- ช่องว่างพลังงานทางแสงมีค่า ~ 1.7 eV ซึ่งอยู่ใกล้กับช่วงพลังงานของแสงอาทิตย์ที่ คาดว่าจะให้ประสิทธิภาพการแปรพลังงานสูง
- สามารถทำในลักษณะ integrated และเป็น monolithic ได้ง่าย ลดขั้นตอนใน การตัดและติดซึ่งใช้ต้นทุนสูง
- ซิลิคอนและไฮโดรเจน เป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณมาก
- สามารถได้ปะอมอร์ฟัสซิลิคอนให้เป็นชนิด n หรือชนิด p ได้ง่าย โดยใช้ฟอสฟอรัสหรือ โบรอน (ถึงแม้จะไม่มีประสิทธิภาพมากนัก)
- วัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอน มีคุณสมบัติของการขนส่งพาหะ คืออิเล็กตรอนและโฮล ที่จำเป็น ต่อการทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์

ด้วยข้อดีเด่นเหล่านี้ ทำให้มีความดึงดูดใจ เพราะอาจมีโอกาสดำเนินการเซลล์ฯ ที่มีประสิทธิ ภาพสูงและราคาถูกลงได้ และการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ควรมีราคาถูกลงที่จะแข่งขันกับการ ผลิตพลังงานด้วยวิธีปกติที่ใช้ฟอสซิลหรือนิวเคลียร์ ในตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบ ต้นทุนของการผลิตเซลล์ฯ ชนิดต่าง ๆ จากสายการผลิตขนาด 25 MW ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเซลล์ฯ ที่ทำ จาก a-Si:H ทั้งชนิดเซลล์ฯ เดี่ยวและ tandem มีราคาของโมดูล ($\$/วัตต์สูงสุด$) ถูกลงที่สุด ถึงแม้ว่าจะคิดให้ประสิทธิภาพของเซลล์ฯ ต่ำกว่าก็ตาม (2)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนถูกสร้างขึ้นครั้งแรกโดย David E Carlson ในปี ค.ศ. 1975 ที่ศูนย์การวิจัยของ RCA เซลล์ฯ มีโครงสร้างเป็น p-i-n และมีประสิทธิภาพ 2.4 % จากนั้นมา ก็ได้มีการปรับปรุงสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์อะมอร์ฟัสขึ้นมาเรื่อย ๆ ดัง ในรูปที่ 4.3 ถึงแม้ว่าในระยะแรกเซลล์ฯ ชนิดชนิดนี้จะดูว่าน่าจะไปได้ดี เซลล์ฯ ชนิด p-i-n จะให้แรงดันเปิดวงจรที่สูงกว่าซึ่งจำเป็นต่อการเพิ่มประสิทธิภาพ การพัฒนาที่สำคัญอีกขั้นหนึ่งก็คือ การใช้โครงสร้างรอยต่อเฮเทอโร (heterojunction) ซึ่งใช้อัลลอยซิลิคอนคาร์ไบด์ชนิด p (p a-SiC:H) แทนที่ p a-Si:H เป็นชั้นหน้าต่างกว้างรับแสง ทำให้เซลล์ฯ มีกระแสเอาต์ พุทและแรงดันเอาต์พุทสูงขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเฉลี่ยคิด 10% เมื่อใช้รอยต่อต่างชนิด และใช้แผ่นฐานที่มีผิว texture เพื่อเพิ่มการดูดกลืนแสงเข้าสู่เซลล์ฯ การพัฒนาในขั้นต่อมาคือ การทำ graded bandgap เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากการรวมตัวที่รอยต่อ p/i เมื่อรวม แนวความคิดเหล่านี้ เข้ากับการออกแบบโครงสร้างเพื่อให้ใช้แสงอย่างคุ้มค่าที่สุดจะได้ประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4.1 ต้นทุนการผลิต (จากการคำนวณ) ของเซลล์แสงอาทิตย์
ชนิดผลึกซิลิกอนและอะมอร์ฟัสซิลิกอน (2)

Cell Type	Module Price (1985 \$/Peak Watt)
CRYSTALLINE SILICON	
Dendritic Web	1.23
Czochralski	1.90
500× Concentrator	1.40
AMORPHOUS SILICON	
Single Junction	1.15
Tandem Alloy	1.03



รูปที่ 4.3 การพัฒนาของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H (2)

สูงถึง 12% สำหรับเซลล์ฯ แบบเดี่ยว (2)

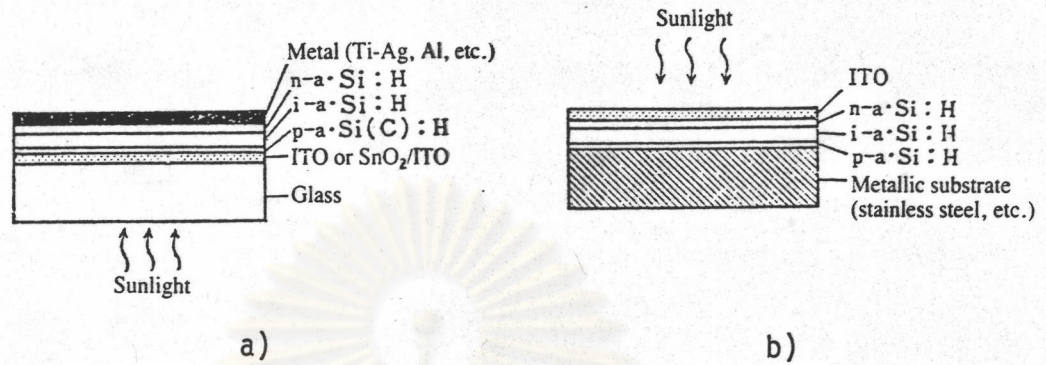
ถึงแม้ว่าถ้ามองกว้าง ๆ แล้ว เป็นการดีมาก ที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์ฯ เดี่ยวก็ตาม ในปัจจุบันโครงการวิจัยของบริษัทอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่เซลล์ฯ แบบหลายรอยต่อ ซึ่งคาดว่าจะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า และปัญหาของการ degrade ของเซลล์ฯ เนื่องจากแสง ก็ทำให้คนหันมาสนใจเซลล์ฯ แบบหลายรอยต่อกันมากยิ่งขึ้น เพราะพบว่าเซลล์ฯ ชนิดนี้มีเสถียรภาพดีว่ามาก ผลที่ติดตามมาคือ มีการวิจัยเกี่ยวกับอัลลอยของอะมอร์ฟัสซิลิคอนเพิ่มขึ้น เพื่อนำมาทำเป็นรอยต่อทั้งชนิดช่องว่างพลังงานกว้างและแคบ ถึงแม้ในปัจจุบันงานวิจัยเกี่ยวกับเซลล์ฯ หลายรอยต่อ อาจยังอยู่ในระยะเริ่มแรกก็ตาม ก็ปรากฏผลน่าพอใจ คือสามารถผลิตเซลล์ฯ ที่มีประสิทธิภาพ 10-13% ได้

ทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

1. คุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

ในปัจจุบันคำว่า "เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน" โดยทั่วไปหมายถึงเซลล์ฯ ที่มีโครงสร้างรอยต่อแบบ p-i-n และมักนิยมใช้โครงสร้างแบบ glass/ITO/SnO₂/p-i-n/metal และแบบ ITO /n-i-p/ metallic substrate ดังรูปที่ 4.4 (a) และ (b) ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของซิลิคอนผลึกเดี่ยว และอะมอร์ฟัสซิลิคอน ที่จำเป็นต่อการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ ช่องว่างพลังงานของ a-Si:H อยู่ในช่วง 1.6-1.8 eV แล้วแต่ปริมาณของไฮโดรเจน (5) (มากกว่าของซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยวซึ่ง = 1.1 eV) ทำให้ a-Si:H ไม่สามารถใช้กับแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 800 nm ได้ (ถ้าความยาวคลื่นยาวกว่านี้จะทะลุผ่าน) ค่า E_g ที่เหมาะสมของวัสดุที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์นั้น คือประมาณ 1.4 eV (10)

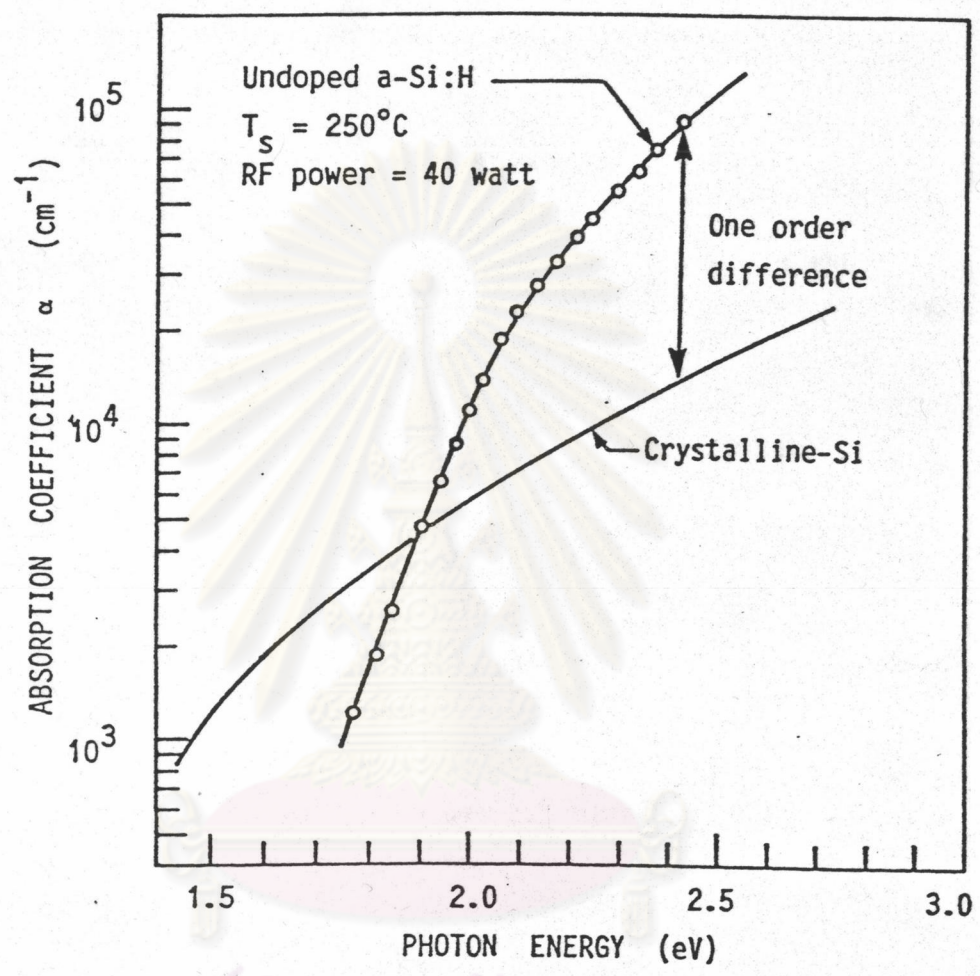
ในขณะที่ซิลิคอนผลึกเดี่ยวเป็นวัสดุที่เป็น indirect transition type และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ต่ำ (ดูได้จากรูปที่ 4.5 ซึ่งแสดงสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง) อะมอร์ฟัสซิลิคอนกลับมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.4 a) โครงสร้างของเซลล์ชนิด a-Si:H ที่ใช้แผ่นแก้วเป็นแผ่นฐาน (ชนิดรอยต่อโฮโม)
 b) โครงสร้างของเซลล์ชนิด a-Si:H ที่ใช้สแตนเลสเป็นแผ่นฐาน

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่สำคัญของซิลิคอนผลึกเดี่ยวและอะมอร์ฟัสซิลิคอน (10)

Item	Monocrystalline Si	Amorphous Si
Atomic arrangement	regular	disordered
Forbidden bandgap (eV)	1.1	1.6-1.8
Absorption coefficient (visible spectrum)	small	large
Minority carrier diffusion length (μm)	10-100	0.1-2
Electron mobility ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	~ 1000	0.1-1
Conductivity (S cm^{-1})	$10^{-4}-10^4$	$10^{-13}-10^2$
p-n junction characteristics	rectifying	ohmic
p-i-n junction depletion layer width	1-10 μm	0.5-1 μm
Thickness of solar cell	$\sim 200 \mu\text{m}$	0.5-1 μm

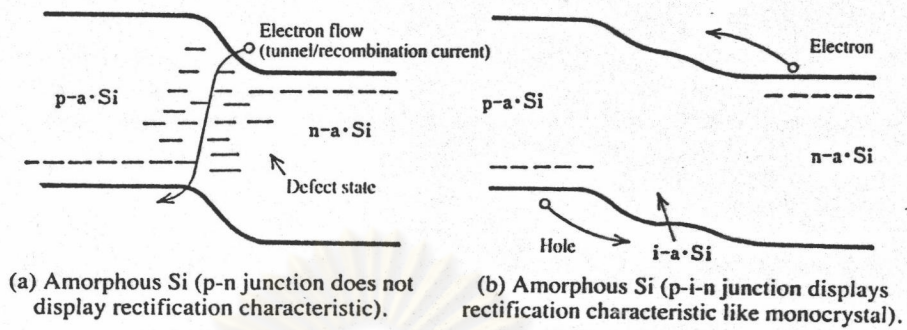


รูปที่ 4.5 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ a-Si:H และของผลึก Si(6)

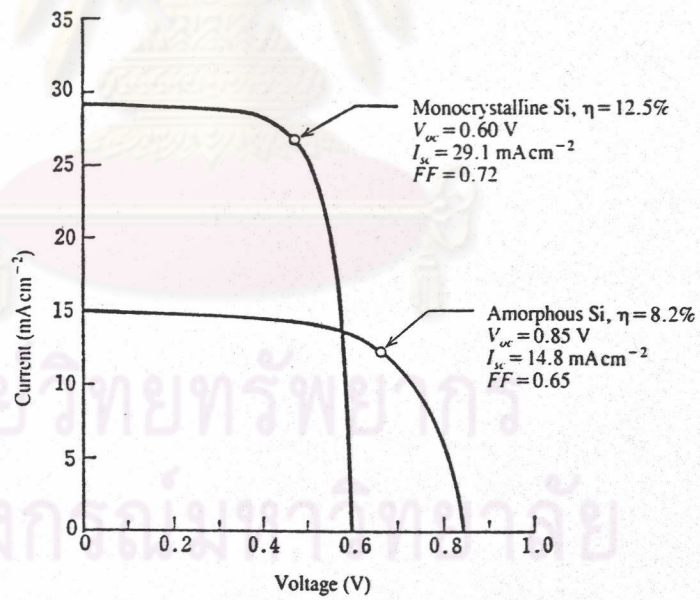
เหมือนในกรณีของวัสดุ direct transition (โดยเฉพาะในช่วงบริเวณที่แสงมีพลังงาน 2.0-2.5 eV ซึ่งเป็นช่วงที่ความเข้มข้นการแผ่รังสีของแสงอาทิตย์มีค่าสูงสุด ค่า α ของ a-Si:H มีค่าสูงกว่าของผลึก Si เกือบ 10 เท่า) ในกรณีของซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยว จะต้องใช้วัสดุที่หนาประมาณ 200 μm เพื่อที่จะได้การดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์มากเพียงพอในขณะที่อะมอร์ฟัสซิลิคอนต้องการเพียง 0.5 - 1 μm อย่างไรก็ตามค่าความยาวการแพร่ซึมของพาหะส่วนน้อย (ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่กำหนดประสิทธิภาพการกวาดเก็บพาหะที่เกิดจากแสง) ของอะมอร์ฟัสซิลิคอนสั้นประมาณ 0.1-2 μm (เทียบกับผลึก 10-100 μm) แต่เนื่องจากชั้นที่เกี่ยวกับข้องกับการแปรพลังงาน photoelectric นั้นบาง ค่าความยาวการแพร่ซึมของพาหะส่วนน้อยประมาณ 1-2 μm ก็เพียงพอแล้ว

ค่าสภาพนำไฟฟ้าของอะมอร์ฟัสซิลิคอนนั้นต่ำ ทั้งแบบ p และ n โดยสูงที่สุดก็เพียง 10^{-2} Scm^{-1} เนื่องจากมีปริมาณ defect levels มาก ดังนั้น ในการทำเป็นโครงสร้าง p-i-n ถ้าชั้น p และ n หนา (มากกว่าหลายร้อยอังสตรอม) ค่าความต้านทานอนุกรมของชั้นเหล่านี้ไม่สามารถถูกละเลยไปได้ การใช้ไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน ($\mu\text{c-Si}$) ซึ่งมีสภาพนำไฟฟ้า $10-10^2 \text{ Scm}^{-1}$ เป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดความต้านทานอนุกรมได้

รอยต่อ p-n ของอะมอร์ฟัสซิลิคอน โดยปกติจะไม่มีคุณสมบัติเรียงกระแส แต่จะแสดงคุณสมบัติเป็น Ohmic contact ไม่มากนักอ ย เป็นเพราะในชั้น p และ n นั้น มี defect levels มาก และความหนาแน่นของพาหะก็มีค่ามาก กระแสเนื่องจากปรากฏการณ์ tunnel จึงกลายเป็นตัวหลัก ในรูป 4.6 แสดงโครงสร้างแบบ p-i-n ที่มีชั้น intrinsic ซึ่งไม่ถูก dope อยู่ระหว่าง ชั้น p และ n ซึ่งใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ ชั้น i เกือบทั้งหมดจะกลายเป็นชั้นปลอดพาหะ (depletion layer) และจะขัดขวางไม่ให้เกิดกระแส tunnel current ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส ชั้น i จะทำหน้าที่แปรพลังงาน photoelectric ส่วนชั้น p กับ n ถูกเรียกว่าเป็น "dead layer"



รูปที่ 4.6 ความแตกต่างระหว่างรอยต่อ p-n และ p-i-n ของ a-Si:H



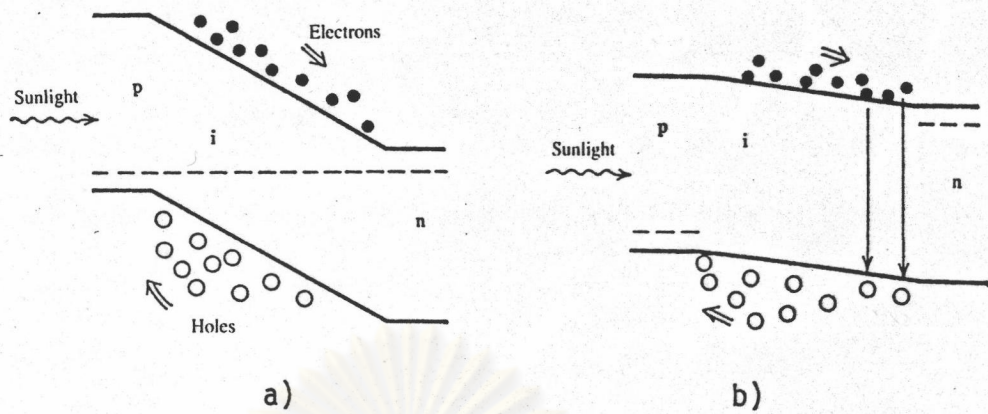
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนผลึกเดี่ยวกับแบบอะมอร์ฟัสซิลิคอน ที่ AM1, 100 mW/cm² (10)

2. ลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

รูป 4.7 แสดงถึงลักษณะสมบัติ J/V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ AM 1 ค่ากระแสลัดวงจร ($\sim 15 \text{ mA/cm}^2$) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน จะเป็นครึ่งหนึ่งของเซลล์ฯ ชนิดผลึกเดี่ยว แต่ค่าแรงดันเปิดวงจรกลับมีค่ามากกว่า

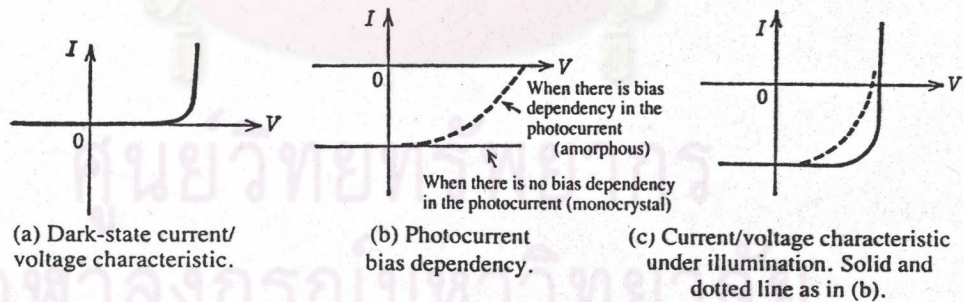
โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่มีช่องว่างพลังงานกว้างจะมีค่า intrinsic carrier density ($n_i \propto \exp(-E_g/2kT)$) ต่ำ ค่ากระแสลัดในเซลล์ฯที่ทำจากวัสดุเหล่านี้จะลดลง และค่าแรงดันเปิดวงจรจะสูงขึ้น และเนื่องจากปริมาณแสงที่ทะลุผ่านมีค่ามากขึ้น เมื่อช่องว่างพลังงานกว้างขึ้น จึงทำให้ค่ากระแสลัดวงจรลดลง ค่าแรงดันเปิดวงจรถูกกำหนดโดยค่า built-in-potential ของรอยต่อ ในกรณีของอะมอร์ฟัสซิลิคอน ระดับพลังงานเฟอร์มิของชั้น p และ n ประมาณ 0.2-0.3 eV (7,10) ค่า built-in-potential จะมีค่าประมาณ 1.1-1.2 eV (10) ถ้ามีการออกแบบเพื่อให้ค่า built-in-potential (V_{bi}) มีค่ามากขึ้นแล้ว ค่า V_{oc} ก็เพิ่มขึ้น

ความแตกต่างอีกประการหนึ่งคือ ค่า fill factor (FF) ในขณะที่เซลล์ฯ ชนิดผลึกเดี่ยว มีค่า FF $\sim 0.7-0.8$ เซลล์ฯ ชนิดอะมอร์ฟัสจะมี FF $\sim 0.6-0.7$ ค่า fill factor นี้ได้รับอิทธิพลจาก parameter หลายตัวเช่น ความต้านทานภายใน และ diode factor แต่โดยพื้นฐานแล้ว ค่า FF ของเซลล์ฯ ชนิดอะมอร์ฟัสเกิดจากการขึ้นกับการไบแอสของ photo current สำหรับเซลล์ฯ ชนิดผลึกเดี่ยว ค่าความยาวการแพร่ซึมของพาหะส่วนน้อยมีค่ามาก และกระแส photocurrent เกิดจากพาหะซึ่งเกิดที่บริเวณเนื้อพี หรือเอ็น นอกเขตปลอดพาหะ(ที่สร้างสนามไฟฟ้า) ส่วนเซลล์ฯ ชนิดอะมอร์ฟัส ค่าความยาวการแพร่ซึมของพาหะส่วนน้อยสั้นกระแส photocurrent ที่เกิดจากภายนอกเขตสนามไฟฟ้าจะมีน้อย กระแสส่วนใหญ่เกิดจากพาหะที่เกิดขึ้นในเขตปลอดพาหะ และถูกกวาดออกมาสู่ภายนอกด้วยสนามไฟฟ้า ดังนั้น ถ้ามีการไบแอสตาม สนามไฟฟ้าในชั้น i จะมีค่าน้อยลง และชั้นปลอดพาหะจะแคบลง ทำให้กระแส photocurrent ลดลง กลไกในการสร้าง photocurrent ขณะที่มีการไบแอสตาม แสดงในรูป 4.8



รูปที่ 4.8 กลไกการเกิด photocurrent ขณะที่มี และไม่มี การไบแอส

- a) ในสภาวะลึดวงจร: สนามไฟฟ้าภายในมีค่าสูง, โยลที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง ส่วนใหญ่ไปถึงรอยต่อ p-i
- b) ในสภาวะเปิดวงจร: เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในมีค่าน้อย โยลที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงที่อยู่ถัดจากรอยต่อ p-i จะรวมตัวกับอิเล็กตรอนและหายไป



รูปที่ 4.9 ลักษณะสมบัติ J/V ของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะมืด และเมื่อได้รับแสง ซึ่งได้รับผลจาก การขึ้นกับการไบแอสของ photocurrent

รูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าลักษณะสมบัติ J/V ของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับแสงมาจากการรวมกันของลักษณะของสมบัติ J/V ในสภาพมืด กับกระแส photocurrent เราจะได้เห็นว่า fill factor จะลดน้อยลง ถ้า photocurrent แปรเปลี่ยนตามการไบแอสมากขึ้น

นอกจากนี้แล้วค่า fill factor ของเซลล์ชนิดอะมอร์ฟัส ยังขึ้นอยู่กับสเปกตรัมของแสงที่ตกกระทบ และค่าความยาวของการแพร่ซึมของพาหะส่วนน้อย (คือ hole) เป็นอย่างมากด้วย (10)

วิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ดังได้กล่าวในหัวข้อที่แล้วว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H ประกอบด้วยแผ่นฐานแก้วและฟิล์มบางของชั้นต่างๆ หลายชั้นปลูกซ้อนทับกัน คือ

1. ชั้นโปร่งแสง
2. ชั้น p-, i- และ n-
3. ชั้นโลหะ

คุณสมบัติ ตลอดจนความหนาของชั้นต่างๆ นั้น มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์อย่างมาก ดังจะได้กล่าวต่อไปนี้ (11)

1. ชั้นโปร่งแสง ไม่ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H จะมีแผ่นฐานเป็นแผ่นแก้วหรือแผ่นสแตนเลส ก็ย่อมจะต้องมีชั้นโปร่งแสงเสมอ

ในกรณีที่แผ่นแก้วเป็นแผ่นฐาน ตามปกติจะใช้ SnO_2/ITO เป็นชั้นโปร่งแสง SnO_2 มีราคาถูกแต่มีสภาพต้านทานสูงกว่า ITO ITO นี้เป็นสารประกอบของ SnO_2 และ In_2O_3 โดยมีอัตราส่วนของ Sn:In เท่ากับ 5:95 โดยประมาณ ITO มีสภาพความต้านทานต่ำกว่า SnO_2 แต่ราคาแพง ลำดับการปลูกบนแผ่นแก้วคือ แก้ว/ITO/ SnO_2 /a-Si:H/Al การที่ต้องใช้ชั้นโปร่งแสงถึงสองชั้นเช่นนี้มีเหตุผลคือ ถ้า SnO_2 มีความหนามากกว่า

20 nm จะช่วยกันไม่ให้อะตอมของ In จาก ITO หลุดออกแล้วแพร่เข้ามาในชั้น a-Si:H เพราะการแพร่ของ In เข้าสู่ชั้น a-Si:H จะทำให้ประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง V_{oc} ลดลง คุณสมบัติพื้นฐานของชั้นโปร่งแสงเหล่านี้ที่จำเป็นคือ ควรโปร่งแสงมาก ๆ และนำไฟฟ้าได้ดี และในขณะเดียวกันก็ควรเป็นชั้นกันการสะท้อนแสงด้วย (antireflection) ในการใช้งานก็ต้องเลือกความหนาที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง เนื่องจากความสามารถสูงสุดในการผลิตและกวาดเก็บพาหะของเซลล์ฯ อยู่ในช่วง 500~550 nm ดังนั้นชั้นโปร่งแสงควรหนาเป็น 1/4 หรือ 3/4 ของความยาวคลื่น คือ 70 nm หรือ 200 nm ตัวอย่างเช่นให้ SnO_2 หนา 20 nm และ ITO หนา 50 nm ซึ่งจะให้ sheet resistance ค่า 40~50 Ω/\square หรือถ้า SnO_2 หนา 20 nm และ ITO หนา 180 nm จะได้ sheet resistance น้อยกว่า 10 Ω/\square (11)

ในปัจจุบันเนื่องจากมักนิยมใช้ชั้น p เป็น microcrystalline Si หรือ a-SiC:H ซึ่งดัชนีหักเหแสงมีค่าอยู่ระหว่าง ดัชนีหักเหแสงของชั้นโปร่งแสง และ a-Si:H พอดี ดังนั้นจึงช่วยลดการสะท้อนแสงที่ผิวของ i a-Si:H ได้ (3)

นอกจากนี้การทำให้ผิวของแผ่นแก้วเป็นผิวขรุขระ (textured) ด้วยวิธีทางเคมี และทำให้ผิวของ ITO/ SnO_2 ขรุขระในขณะเคลือบ ก็จะช่วยทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการกักแสง ให้เข้าสู่ชั้นอะมอร์ฟัสและเดินทางในชั้นอะมอร์ฟัสได้ไกล จะช่วยเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้นได้

2. ชั้น p ทำหน้าที่เป็นชั้นสร้าง built-in potential เช่นเดียวกันชั้น n และมีค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงที่ต่ำมาก จึงเปรียบเสมือนเป็น dead layer ในทางปฏิบัติ ต้องเลือกความเหมาะสมของสภาพนำไฟฟ้า ความหนา และขนาดของช่องว่างพลังงาน a-Si:H ที่โด๊ปด้วย B จะมีค่าสภาพนำไฟฟ้าแสงต่ำ และช่องว่างพลังงานจะแคบลง ดังนั้นชั้น p a-Si:H จึงควรทำให้บางที่สุด แต่อย่างไรก็ตามถ้าชั้น p บางมาก ๆ ก็จะทำให้แรงดันวงจรเปิดลดลงด้วย

ในปัจจุบันนิยมใช้ p a-SiC:H ที่มีช่องว่างพลังงาน 2 eV หรือ p microcrystalline Si:H เป็นหน้าต่างกว้างรับแสง ซึ่งจะช่วยเพิ่มทั้งกระแสไฟฟ้าลดวงจร แรงดัน

วงจรเปิด และฟิล์มแพคเตอร์ (13) ตามปกติความหนาของ p a-SiC:H คือ 150 อังสตรอม (12)

3. ชั้น i คุณสมบัติพื้นฐานของ a-SiC:H ชนิด i (undoped) นี้ จะมีกัทธิพลหรือผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ฯมาก จากประสพการณ์ เงื่อนไขการผลิต i a-Si:H ที่มี gap states น้อยคือ ใช้ RF power ต่ำ ๆ ปล่อยก๊าซไซเลนมาก ๆ เพื่อให้ได้ deposition rate ประมาณ 1 ไมครอนต่อชั่วโมง ถ้า gap states มีค่าสูงจะทำให้ collection efficiency ลดลงและสเปกตรัมเคลื่อนไปทางความยาวคลื่นสั้น เพราะถ้า gap states มีค่าสูงขึ้น จะทำให้ built-in potential ลดลง เป็นเหตุให้การ recombination ของพาหะมีค่ามากขึ้น จึงทำให้ photocurrent ลด ความต้านทานอนุกรมเพิ่ม และฟิล์มแพคเตอร์ลด ดังนั้นก่อนปลูกเซลล์ฯ จึงควรต้องทดลองหาเงื่อนไขการผลิตฟิล์ม a-Si:H ที่มีสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงสูงสุด อุณหภูมิแผ่นฐานที่เหมาะสมตามปกติคือ 200-250 °C

a-Si:H ที่ไม่ได้โด๊ปโดยทั่วไปแสดงคุณสมบัติเป็นชนิด n แบบอ่อนเพราะระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ค่อนข้างไปทางแถบคอนดักชัน (7) การเติม B น้อย ๆ (ประมาณ 11 ppm) จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิเคลื่อนมาที่ตรงกลางช่องว่างพลังงานพอดี (10) ซึ่งจะทำให้สนามไฟฟ้าในชั้น i มีค่าเพิ่มขึ้น

4. ชั้น n การใช้ microcrystalline Si:H ชนิด n จะช่วยเพิ่ม built-in potential ด้วย ระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ใกล้แถบคอนดักชันมาก สภาพนำไฟฟ้าก็มีค่าสูงมาก ($1\sim 10 \text{ S.cm}^{-1}$) จึงทำให้อิทธิพลของข้อบกพร่อง และช่องว่างพลังงานก็กว้างด้วย จึงอาจช่วยผ่านให้แสงที่สะท้อนจากผิว โลหะด้านหลังกลับเข้าสู่ชั้น i ได้ดีขึ้น

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยนี้ มีโครงสร้างตามที่แสดงในรูปที่ 4.4(a) อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการผลิตฟิล์มชั้น a-Si:H คือเครื่อง glow discharge plasma CVD (รายละเอียดดูที่ 2) เงื่อนไขในการปลูก ชั้น p, i, n แสดงอยู่ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขในการปลูกฟิล์ม a-Si:H ชั้นต่างๆ ในการผลิตเซลล์ฯ

ชั้น	ชนิด	ก๊าซ	RF W	T _s °C	ความหนา Å
p	a-Si:H	$B_2H_6/SiH_4 = 0.6\%$ $B_2H_6 = 50 \text{ sccm}$ $SiH_4 = 40 \text{ sccm}$	40	190	120
	a-SiC:H	$CH_4/SiH_4+CH_4 = 70.0\%$ $B_2H_6/SiH_4+CH_4 = 0.6\%$ $B_2H_6 = 60 \text{ sccm}$ $CH_4 = 35 \text{ sccm}$ $SiH_4 = 15 \text{ sccm}$	40	190	150-220
i	a-Si:H	$SiH_4 = 40-60 \text{ sccm}$	40	190	5000-7000
n	μ C-Si	$PH_3/SiH_4 = 2.6\%$ $PH_3 = 80 \text{ sccm}$ $SiH_4 = 15 \text{ sccm}$	148	190	200-1000

ขั้นตอนการผลิตเซลล์ฯ อธิบายได้ด้วยแผนภูมिरูปที่ 4.10 รูปที่ 4.11 แสดงรูปถ่ายแผ่น mask ที่ทำจากสแตนเลสสำหรับใช้เคลือบอะลูมิเนียมเป็นขั้วด้านหลังของเซลล์ฯ แต่ละช่องมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 mm ดังนั้นเซลล์ฯ 1 ตัวจะมี พ.ท. 0.03 cm^2 รูปที่ 4.12 แสดงรูปถ่ายเซลล์ฯ ที่ผลิตได้ ซึ่งเป็นเซลล์ฯ ชนิดรอยต่อโฮโม จากการวัดลักษณะสมบัติเอาท์พุทได้ผลดังนี้

$$\text{กระแสลัดวงจร } J_{sc} = 8.5 \text{ mA/cm}^2$$

$$\text{แรงดันเปิดวงจร } V_{oc} = 0.82 \text{ V}$$

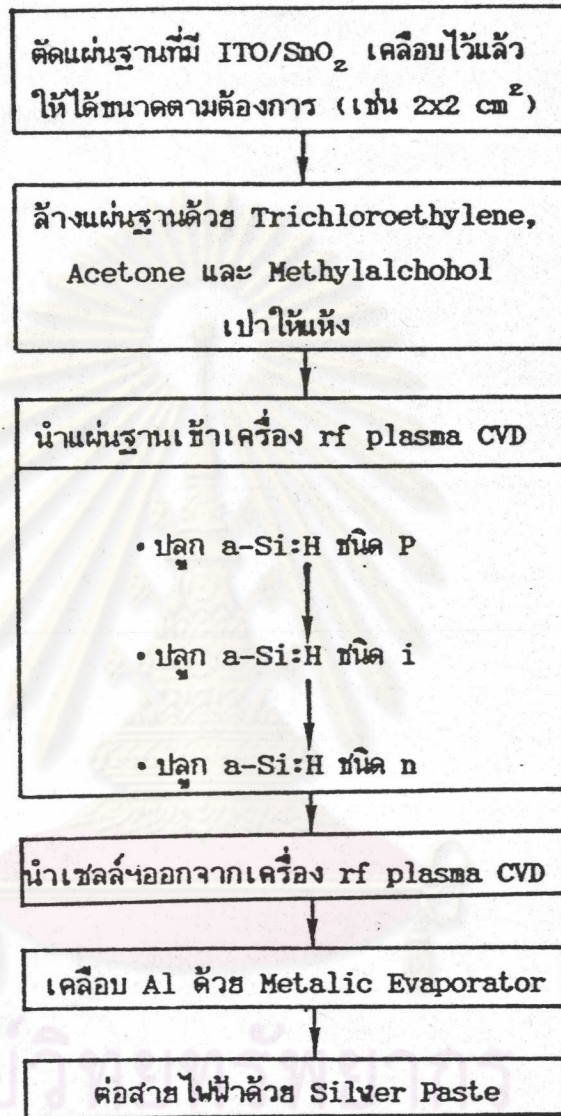
$$\text{ฟิลล์แฟคเตอร์ } FF = 59.8 \%$$

$$\text{ประสิทธิภาพ } \eta = 4.12 \%$$

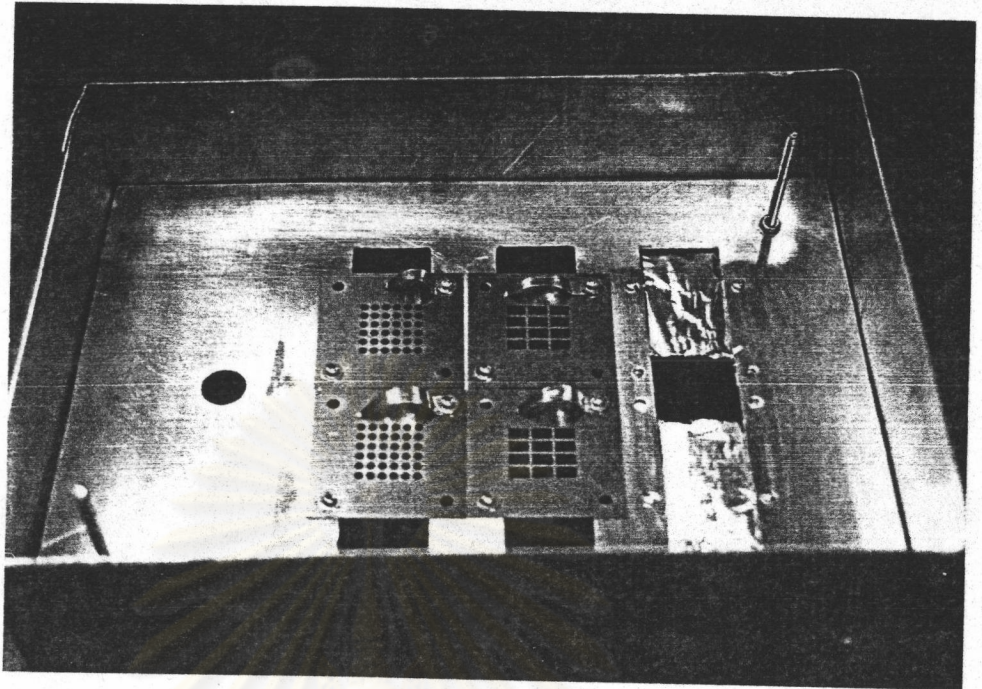
สรุปและวิจารณ์

ได้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเป็นผลสำเร็จ ลักษณะโครงสร้างของเซลล์ฯ คือ glass / ITO/SnO₂ / p a-Si:H / i a-Si:H / n μ C-Si / Al มีการศึกษาข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับชั้นต่าง ๆ อาทิเช่น ความหนาของชั้นต่าง ๆ ข้อมูลพื้นฐานเหล่านี้จะเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยเพื่อผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีคุณภาพสูงสุดในขั้นต่อไป ดังจะได้กล่าวถึงในบทที่ 5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 แผนภูมิขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายแผ่น Mask สแตนเลส สำหรับใช้เคลือบอะลูมิเนียมเป็นชั้นด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ในขั้นตอนต่างๆ