

การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของอะมอร์ฟัสซิลิคอน  
และผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอน



นางสาววิภากร จีวะสุวรรณ

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-7149-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FABRICATION OF AMORPHOUS SILICON AND MULTICRYSTALLINE SILICON  
HETEROJUNCTION SOLAR CELLS



Miss Wipakorn Jevasuwan

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-7149-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของอะมอร์ฟัสซิลิคอน  
และผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอน  
โดย นางสาววิภากร จีวะสุวรรณ  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. ดุสิต เครืองาม

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ติเรก ลาวัญย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดุสิต เครืองาม)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์รี สวัสดิ์ศฤงฆาร)

..... กรรมการ  
(ดร. ภาววัน สยามชัย)

วิทยากร จีวะสุวรรณ : การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของอะมอร์ฟัสซิลิคอน และผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอน (FABRICATION OF AMORPHOUS SILICON AND MULTICRYSTALLINE SILICON HETEROJUNCTION SOLAR CELLS) อาจารย์ที่ปรึกษา: ศาสตราจารย์ ดร. ดุสิต เครืองาม, จำนวนหน้า 57 หน้า. ISBN 974-17-7149-5.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้รายงานผลการศึกษาค้นคว้าการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนและผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอน เพื่อพัฒนาให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนการผลิตต่ำและมีประสิทธิภาพสูง แผ่นฐานชนิดผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอนชนิดพี (p-mc-Si) มีความหนาประมาณ 0.3 มิลลิเมตร ฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) ปลูกด้วยวิธีการแยกสลายก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีพลาสมาซีวีดี โครงสร้างพื้นฐานที่ออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้มี 2 แบบ คือ 1) ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al และ ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al โดยที่ในเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบที่ 1) ชั้น p-mc-Si ทำหน้าที่เป็นชั้นผลิตพาหะด้วยแสง และในเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบที่ 2) ทั้งชั้น i-a-Si:H และ p-mc-Si ทำหน้าที่เป็นชั้นผลิตพาหะด้วยแสง

ในการศึกษาดังกล่าว ได้มีการเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ เพื่อหาเงื่อนไขความเหมาะสมต่างๆ ที่จะทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เช่น กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกสลายก๊าซไฮโดรเจน ความหนาของฟิล์ม a-Si:H เงื่อนไขทางเคมีสำหรับการกัดแผ่นฐาน และเงื่อนไขกรรมวิธีการปลูกฟิล์มบาง ITO เป็นต้น

ผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างแบบที่ 1) ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al ได้ประสิทธิภาพสูงสุด 6.52% และโครงสร้างแบบที่ 2) ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al ได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด 8.22% ผลการวัดสเปกตรัมตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่ 2) มีความกว้างของสเปกตรัมมากกว่าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบที่ 1) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในเซลล์แบบที่ 2 นั้น ทั้งฟิล์มบางชนิด i-a-Si:H และ ชั้น p-mc-Si ทำหน้าที่เป็นชั้นผลิตพาหะตามที่ออกแบบไว้

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ปีการศึกษา.....2547.....

# # 4670579221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: AMORPHOUS SILICON/MULTICRYSTALLINE SILICON/SOLAR CELLS/  
HETEROJUNCTION

WIPAKORN JEWASUWAN: FABRICATION OF AMORPHOUS SILICON AND  
MULTICRYSTALLINE SILICON HETEROJUNCTION SOLAR CELLS. THESIS

ADVISOR: PROF. DUSIT KRUANGAM, D. Eng., 57 pp. ISBN 974-17-7149-5.

This thesis reports the study on fabrication of a-Si:H and mc-Si heterojunction solar cells. The purpose is to improve solar cells that have low production cost and higher efficiency. The thickness of the p-mc-Si substrates is 0.3 mm. The a-Si:H film was grown by glow discharge plasma CVD method. There are two fundamental structures in this thesis: 1) ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al and 2) ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al. In the first structure, the p-mc-Si layer plays a role as the carrier-generating layer with incident light. In the second structure, both of the i-a-Si:H and the p-mc-Si are carrier-generating layers.

Various fabrication parameters were varied to find the optimal condition for the highest efficiency solar cells such as the  $\text{SiH}_4$  discharging power, the a-Si:H thickness, the chemical condition for wafer etching and the condition for the growth of the ITO film.

The results show that the highest efficiencies of the ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al and the ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al structures are 6.52% and 8.22%, respectively. The spectral response of the second structure is wider than that of the other, which implies that both the i-a-Si:H film and the p-mc-Si layer in the second structure are carrier-generating layers.

Department... Electrical Engineering ... Student's signature .....

Field of study... Electrical Engineering ... Advisor's signature .....

Academic year... 2004 .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนทางด้านอุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ จากห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศ. ดร. ดุสิต เครื่องงาม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความกรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ที่มีค่าอย่างยิ่งต่อเนื่อง ตั้งแต่เริ่มต้นการทำวิทยานิพนธ์จนกระทั่งวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งได้แก่ ศ. ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ. ดร. มนต์รี สวัสดิ์ศฤงฆาร ศ. ดร. ดุสิต เครื่องงาม และ ดร. ภาวัน สยามชัย ที่ให้คำแนะนำข้อคิดเห็น และข้อวิจารณ์ต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำซึ่งได้แก่ ศ. ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ. ดร. มนต์รี สวัสดิ์ศฤงฆาร รศ. ดร. บรรยง โตประเสริฐพงศ์ รศ. ดร. ชุมพล อันตรเสน ศ. ดร. ดุสิต เครื่องงาม รศ. ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ ผศ. ดร. ทงพล กาญจนชูชัย และ อ. ดร. ชรินทร์ ละลิว

ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณคุณบัณฑิตา รัฐวิเศษ คุณเกษร สุขทรัพย์ศรี คุณศุภาโชค ไทยน้อย คุณพรชัย ช่างม่วง คุณพัฒนา พันธุวงศ์ คุณขวัญเรือน ไทยน้อย และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านเทคนิคและงานทางด้านธุรการต่างๆ

ขอขอบคุณคุณจักรพันธ์ จันทนา รุ่นพี่ปริญญาเอก คุณหัสเนตร โสดาบวรล คุณสุนทร ชาวหนองหิน และคุณณัฐพล ช่างสุนิช รุ่นพี่ปริญญาโทที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในงานวิจัยเป็นอย่างดี รวมทั้งขอขอบคุณกำลังใจและความช่วยเหลือจากเพื่อนๆน้องๆ นิสิตสังกัดห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทุกท่าน

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลรอบข้างทุกท่านที่ให้ความห่วงใยและเป็นกำลังใจในการทำวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คุณประโยชน์อันจะเกิดจากผลงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบูรพาจารย์ ตลอดจนคุณบิดามารดาที่ได้มีส่วนช่วยวางรากฐานการศึกษาแก่ผู้วิจัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายคำย่อ.....	ท

บทที่

1. พื้นฐานและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 พื้นฐานและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2.1 คุณสมบัติของผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอน.....	2
1.2.2 คุณสมบัติของอะมอร์ฟัสซิลิคอน.....	3
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	5
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	5
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	5
2. โครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของอะมอร์ฟัสซิลิคอน และผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอน.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 โครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโร แบบที่ 1 (ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al).....	6
2.3 โครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโร แบบที่ 2 (ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al).....	9
2.4 สรุป.....	9

3. การประดิษฐ์และการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโร ของอะมอร์ฟัสซิลิคอนและผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอน.....	10
3.1 บทนำ.....	10
3.2 กระบวนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของอะมอร์ฟัสซิลิคอน และผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอน.....	10
3.2.1 การเตรียมแผ่นฐาน.....	12
3.2.2 การเคลือบชั้นอะลูมิเนียม.....	14
3.2.3 การปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน.....	15
3.2.3.1 โครงสร้างของระบบ Glow Discharge Plasma CVD.....	15
3.2.3.2 การเกิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน.....	19
3.2.4 การปลูกฟิล์มบางซัลไฟฟอสฟอรัส.....	20
3.3 การวัดและการพัฒนาโปรแกรมการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์.....	25
3.4 การวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.....	28
3.5 สรุป.....	29
4. ผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 1 โครงสร้าง ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al.....	30
4.1 บทนำ.....	30
4.2 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อทำการเปลี่ยน ค่ากำลังไฟในการแยกสลายก๊าซของการปลูกฟิล์มบาง n-a-Si:H.....	30
4.3 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อทำการเปลี่ยน ค่าความหนาของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H.....	34
4.4 สรุป.....	39
5. ผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 2 โครงสร้าง ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al.....	40
5.1 บทนำ.....	40
5.2 ผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 2 และอิทธิพลของความหนา ของชั้นฟิล์มบาง i-a-Si:H.....	40



5.3 สรุป.....	46
6. สรุป.....	47
รายการอ้างอิง.....	48
ภาคผนวก.....	49
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	57



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ชนิดและวัตถุประสงค์ในการใช้แผ่นฐานแบบต่างๆ.....	12
3.2 เงื่อนไขโดยสรุปสำหรับการปลูกฟิล์ม a-Si:H ในงานวิทยานิพนธ์นี้.....	19
3.3 เงื่อนไขในการปลูกฟิล์ม ITO.....	22



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 (ก) ตัวอย่างโครงสร้างของผลึก mc-Si	
(ข) แผ่นเวเฟอร์ของผลึก mc-Si ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้.....	2
1.2 ตัวอย่างโครงสร้างการเรียงตัวของอะตอมซิลิคอนใน a-Si:H.....	3
1.3 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	4
2.1 โครงสร้างและลักษณะแผนภูมิแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ	
เฮเทอโรแบบที่ 1 (ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al).....	7
2.2 โครงสร้างและลักษณะแผนภูมิแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ	
เฮเทอโรแบบที่ 2 (ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al).....	8
3.1 ขั้นตอนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของ a-Si:H และ mc-Si.....	11
3.2 การเตรียมแผ่นเวเฟอร์ของผลึก mc-Si.....	12
3.3 การเตรียมแผ่นกระจกใส Corning # 7059.....	13
3.4 แผ่นเวเฟอร์ของผลึก mc-Si ที่ทำการกัดผิวด้วยวิธี Mirror Etching ที่เวลาต่างๆ.....	13
3.5 (ก) ส่วนประกอบต่างๆของเครื่อง Metallic Evaporator	
(ข) เครื่อง Metallic Evaporator ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้.....	14
3.6 แผนผังของระบบ Glow Discharge Plasma CVD สำหรับปลูกฟิล์มบาง a-Si:H.....	17
3.7 ระบบ Glow Discharge Plasma CVD ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์.....	17
3.8 ครอบแก้วสุญญากาศสำหรับปลูกฟิล์มบาง a-Si:H.....	18
3.9 ลักษณะการติดตั้งถังก๊าซและก๊าซเรกูเลเตอร์.....	18
3.10 เม็ด pellet ของ ITO.....	20
3.11 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่อง Electron Beam Evaporator.....	21
3.12 เครื่อง Electron Beam Evaporator ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้.....	21
3.13 ลักษณะของฟิล์ม ITO ที่ปลูกได้ที่อุณหภูมิแผ่นฐานต่างๆกัน.....	22
3.14 เครื่อง UV Spectrophotometer สำหรับวัดสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง.....	23
3.15 ผลการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านแสงของฟิล์ม ITO	
ความหนา 2,000 Å พารามิเตอร์คือ อุณหภูมิแผ่นฐาน.....	24
3.16 ผลการวัดออปติคัลของอุณหภูมิแผ่นฐานที่มีต่อความต้านทานของฟิล์ม ITO และ การ	
ทะลุผ่านของแสง (วัดที่ความยาวคลื่น 810 nm) โดยที่ฟิล์ม ITO หนา 1,500 Å.....	24

3.17 แผนภาพของระบบการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยแสงอาทิตย์เทียมและคอมพิวเตอร์.....	25
3.18 วงจรสมมูลของการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์.....	26
3.19 เครื่องวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้.....	26
3.20 แผนผังการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.....	28
3.21 ระบบการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.....	28
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดของเซลล์แสงอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกสลายก๊าซ (RF Power).....	31
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกสลายก๊าซ (RF Power).....	31
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลล์แพกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกสลายก๊าซ (RF Power).....	32
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกสลายก๊าซ (RF Power).....	32
4.5 สเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำลังไฟฟ้า ในการแยกสลายก๊าซเท่ากับ 6 W, 10 W, 15 W และ 20 W ตามลำดับ.....	34
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดของเซลล์แสงอาทิตย์ และความหนาของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H.....	35
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ และความหนาของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H.....	35
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลล์แพกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ และความหนาของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H.....	36
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และความหนาของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H.....	36
4.10 สเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความหนา ของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H เท่ากับ 100 Å, 250 Å, 500 Å และ 750 Å.....	38
4.11 ตัวอย่างผลการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ITO-n-a-Si:H/p-mc-Si/Al ที่ความเข้มแสง AM1.....	38

5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์และความหนา ของชั้นฟิล์มบาง i-a-Si:H เท่ากับ 500 Å, 1,000 Å, 2,000 Å และ 3,000 Å.....	41
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์และความหนา ของชั้นฟิล์มบาง i-a-Si:H เท่ากับ 500 Å, 1,000 Å, 2,000 Å และ 3,000 Å.....	41
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลล์แพกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์และความหนา ของชั้นฟิล์มบาง i-a-Si:H เท่ากับ 500 Å, 1,000 Å, 2,000 Å และ 3,000 Å.....	42
5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และความหนา ของชั้นฟิล์มบาง i-a-Si:H เท่ากับ 500 Å, 1,000 Å, 2,000 Å และ 3,000 Å.....	42
5.5 สเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความหนาของ ชั้นฟิล์มบาง i-a-Si:H เท่ากับ 500 Å, 1,000 Å, 2000 Å และ 3,000 Å.....	44
5.6 ตัวอย่างผลการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง ชั้นไฟฟ้าโปร่งแสง ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al ที่ความเข้มแสง AM1.....	44
5.7 เปรียบเทียบสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แบบ คือ โครงสร้าง ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al (กราฟเส้นสีดำ) และ ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al (กราฟเส้นสีน้ำเงิน) .....	45

## คำอธิบายคำย่อ

Al	:	Aluminum
a-Si:H	:	Hydrogenated Amorphous Silicon
c-Si	:	Crystalline Silicon
DI Water	:	De-ionized Water
FF	:	Fill Factor (%)
ITO	:	Indium Tin Oxide
$J_{\max}$	:	Maximum Current ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )
$J_{\text{sc}}$	:	Short Circuit Current ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )
mc-Si	:	Multicrystalline Silicon
$P_{\text{input}}$	:	Light Power Input (Watt)
Glow Discharge Plasma CVD	:	Glow Discharge Plasma Chemical Vapor Deposition
$P_{\max}$	:	Maximum Power Output (Watt)
Si	:	Silicon
$V_{\max}$	:	Maximum Voltage (V)
$V_{\text{oc}}$	:	Open Circuit Voltage (V)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## พื้นฐานและที่มาของวิทยานิพนธ์

### 1.1 บทนำ

เมื่อความต้องการใช้พลังงานในปัจจุบันมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่แหล่งพลังงานบนโลกมีอยู่อย่างจำกัด จึงมีการนำพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ มาใช้มากขึ้นเพื่อช่วยแก้ไขปัญหาด้านพลังงานในอนาคต พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด มีอยู่ทั่วไปและมีอยู่อย่างไม่จำกัด นอกจากนี้การนำแสงอาทิตย์มาใช้โดยเซลล์แสงอาทิตย์นั้นก็ไม่สร้างมลภาวะเป็นพิษใดๆ ขณะใช้งาน เช่น มลพิษทางอากาศ ฝุ่นกรด และสภาวะเรือนกระจก จึงไม่ทำลายสภาพแวดล้อม ไม่ส่งผลกระทบต่อทั้งระบบนิเวศทางธรรมชาติและความเป็นอยู่ของมนุษย์ ต่างจากแหล่งพลังงานจากฟอสซิลอันได้แก่ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหินที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามการจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีการใช้งานแพร่หลายมากยิ่งขึ้นนั้น เราก็จำเป็นต้องพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์มีต้นทุนการผลิตลดลง และมีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น

### 1.2 พื้นฐานและที่มาของวิทยานิพนธ์

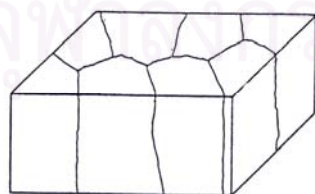
จากเหตุผลดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นถึงข้อดีของการนำพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้ ในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงให้ความสนใจไปที่การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีต้นทุนการผลิตต่ำ และมีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเลือกใช้สารกึ่งตัวนำซิลิคอนเป็นวัสดุหลัก เพราะเป็นธาตุที่มีมากและราคาถูก มาทำการทดลองประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากการนำเทคโนโลยีฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Hydrogenated Amorphous Silicon ย่อว่า a-Si:H) ผสมผสานเข้ากับเทคโนโลยีผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอน (Multicrystalline Silicon ย่อว่า mc-Si) เนื่องจากทั้ง a-Si:H และ mc-Si มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการเหมาะแก่การนำมาประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกัน โดยเคลือบฟิล์มบาง a-Si:H ด้วยวิธีการแยกสลายด้วยประจุเรืองแสงซึ่งเป็นวิธีพลาสมาซีวีดีวิธีการหนึ่ง (Glow Discharge Plasma Chemical Vapor Deposition ย่อว่า Glow Discharge Plasma CVD) ที่มีต้นทุนถูกให้ทับลงบนแผ่นเวเฟอร์ของผลึก mc-Si สร้างเป็นชั้นรอยต่อเฮเทอโรเนื่องจาก a-Si:H มีค่าของช่องว่างพลังงานอยู่ประมาณ 1.7-1.8 eV ในขณะที่ช่องว่างพลังงานของ mc-Si มีค่าเท่ากับ 1.1 eV เพื่อให้ชั้น a-Si:H ทำหน้าที่เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงชักนำให้

แสงอาทิตย์ผ่านเข้าสู่ผลึก mc-Si ได้ดี และสร้างสนามไฟฟ้าภายในให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ ในขณะที่ชั้น mc-Si จะทำหน้าที่เป็นชั้นทำงาน นอกจากนี้ในงานวิทยานิพนธ์ได้ทำการทดลองเพิ่มชั้นทำงานที่เป็นชั้น a-Si:H เข้าไปอีกด้วย ซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ได้มากยิ่งขึ้น

### 1.2.1 คุณสมบัติของผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอน

ผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอน (mc-Si) คือผลึกที่มีระนาบของผลึก (Crystalline Plane) หลายชนิดปนกันอยู่ในระนาบเดียวกัน ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ตัวอย่างโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 1.1 (ก) และรูปที่ 1.1 (ข) แสดงแผ่นเวเฟอร์ของผลึก mc-Si ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ อาณาเขตของผลึกแต่ละระนาบนั้นเรียกว่า เกรน ซึ่งเกรนเหล่านี้จะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง [1-2] เมื่อนำผลึก mc-Si มาประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นเพื่อลดอิทธิพลดังกล่าว ผลึก mc-Si ที่นำมาใช้จึงต้องมีเกรนขนาดใหญ่กว่าความหนาของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้พาหะที่เกิดจากแสงสามารถเดินทางผ่านรอยต่อออกสู่ภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ คุณสมบัติเด่นของผลึก mc-Si มีดังนี้คือ

- 1) ผลึก mc-Si มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าผลึกซิลิคอน (Crystalline Silicon ย่อว่า c-Si) จึงเหมาะที่จะนำมาประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนต่ำ
- 2) ผลึก mc-Si มีค่าช่องว่างพลังงานอยู่ระหว่าง 1.1 eV ซึ่งตอบสนองต่อแสงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นยาวได้ดี
- 3) ผลึก mc-Si มีค่าเวลาอายุพาหะที่ยาวนานมากกว่า a-Si:H
- 4) ผลึก mc-Si มีค่าความคล่องตัวพาหะสูงกว่า a-Si:H
- 5) ผลึก mc-Si ให้ค่ากระแสไฟฟ้าเอาต์พุตสูงกว่า a-Si:H



(ก)



(ข)

รูปที่ 1.1 (ก) ตัวอย่างโครงสร้างของผลึก mc-Si

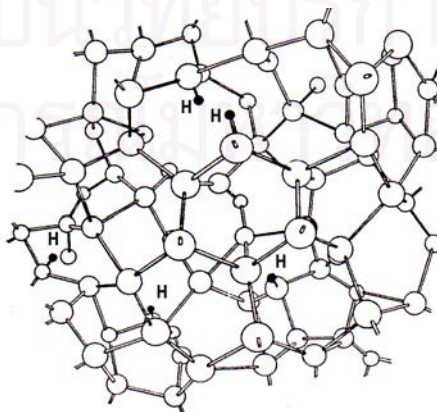
(ข) แผ่นเวเฟอร์ของผลึก mc-Si ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้



### 1.2.2 คุณสมบัติของอะมอร์ฟัสซิลิคอน

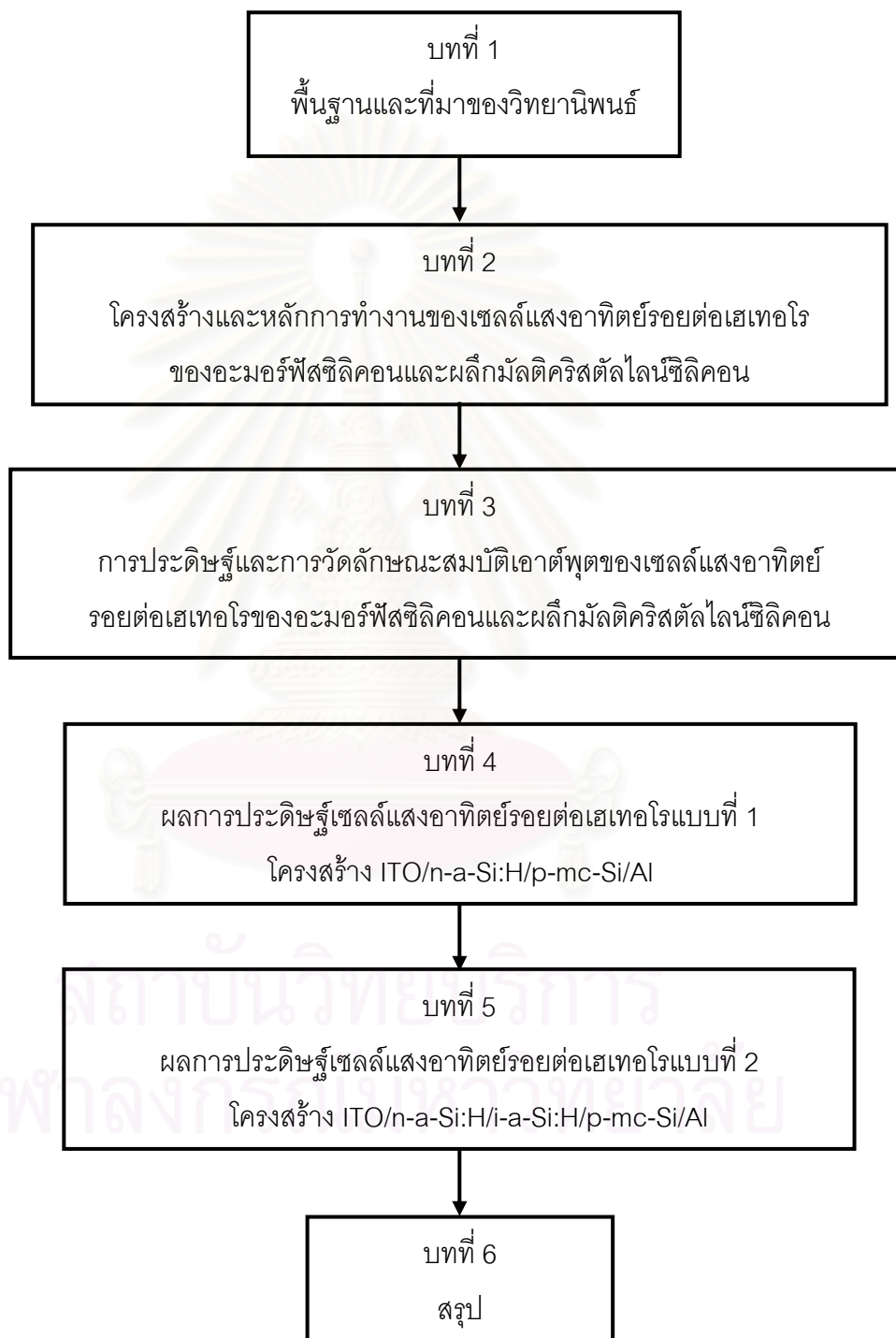
ความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้างเป็นข้อแตกต่างระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) และชนิดผลึก โดยที่ a-Si:H นั้นจะไม่มีระเบียบของอะตอมที่แน่นอนและมีการเรียงตัวของพันธะระหว่างอะตอมที่เป็นระเบียบในระยะสั้นคือ ช่วงระยะของอะตอมสองสามอะตอม ดังแสดงในตัวอย่างโครงสร้างของ a-Si:H รูปที่ 1.2 ทำให้ a-Si:H มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากผลึก c-Si หลายด้านดังต่อไปนี้

- 1) a-Si:H มีค่าช่องว่างพลังงานอยู่ระหว่าง 1.7–1.8 eV ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมกับสเปกตรัมของแสงอาทิตย์
- 2) a-Si:H มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงกว่าผลึก c-Si ถึง 10 เท่า ทำให้ใช้วัสดุคืบน้อย ซึ่งเป็นการประหยัดวัสดุคืบลงไปมาก
- 3) a-Si:H มีลักษณะเป็นฟิล์มบางและเป็นเนื้อเดียวกันตลอดจึงสามารถปลูกติดบนแผ่นฐานได้หลายชนิด เช่น แผ่นเวเฟอร์ของผลึก mc-Si แผ่นแก้ว แผ่นกระจก เป็นต้น และสามารถผลิตให้มีพื้นที่ขนาดใหญ่ได้ง่าย
- 4) a-Si:H สามารถผลิตเป็นฟิล์มบางหลายชั้นได้ง่ายเนื่องจากผลิตจากก๊าซที่อุณหภูมิต่ำและง่ายในการต่อเชื่อมสิ่งประดิษฐ์เข้าด้วยกันบนแผ่นฐานเดียวกัน
- 5) a-Si:H ประดิษฐ์ด้วยกระบวนการ Glow Discharge Plasma CVD ที่ใช้อุณหภูมิเพียง 150-200 °C และสามารถเติมสารเจือปนโดยการเติมก๊าซเข้าไปพร้อมกันในขณะปลูกได้ ทำให้สามารถลดพลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้ในการประดิษฐ์ลง เมื่อเทียบกับการปลูกผลึก c-Si ที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,400 °C และการแพร่ซึมสารเจือปนที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 800 - 1,200 °C



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างโครงสร้างการเรียงตัวของอะตอมซิลิคอนใน a-Si:H

จากคุณสมบัติเด่นของผลึก mc-Si และ a-Si:H [3] ดังกล่าว ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ขึ้นในงานวิทยานิพนธ์นี้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการรวบรวมเอาคุณสมบัติที่ดีของทั้งสองเข้าไว้ด้วยกัน รูปที่ 1.3 แสดงถึงโครงสร้างของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้



รูปที่ 1.3 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

### 1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของ a-Si:H และผลึก mc-Si
2. ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของ a-Si:H และผลึก mc-Si
3. ศึกษาแนวทางการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงและต้นทุนการผลิตต่ำ

### 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโร ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al และรอยต่อ ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al
2. ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโร ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al และรอยต่อ ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al
3. วัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ขึ้น
4. วัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ขึ้น
5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้ข้อมูลทางวิชาการเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อเฮเทอโรของ a-Si:H และผลึก mc-Si
2. ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนต่ำและประสิทธิภาพสูง
3. ได้ต้นแบบโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถนำไปพัฒนาผลิตในเชิงพาณิชย์
4. ช่วยแก้ปัญหาด้านพลังงานให้กับประเทศโดยการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกระแสไฟฟ้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

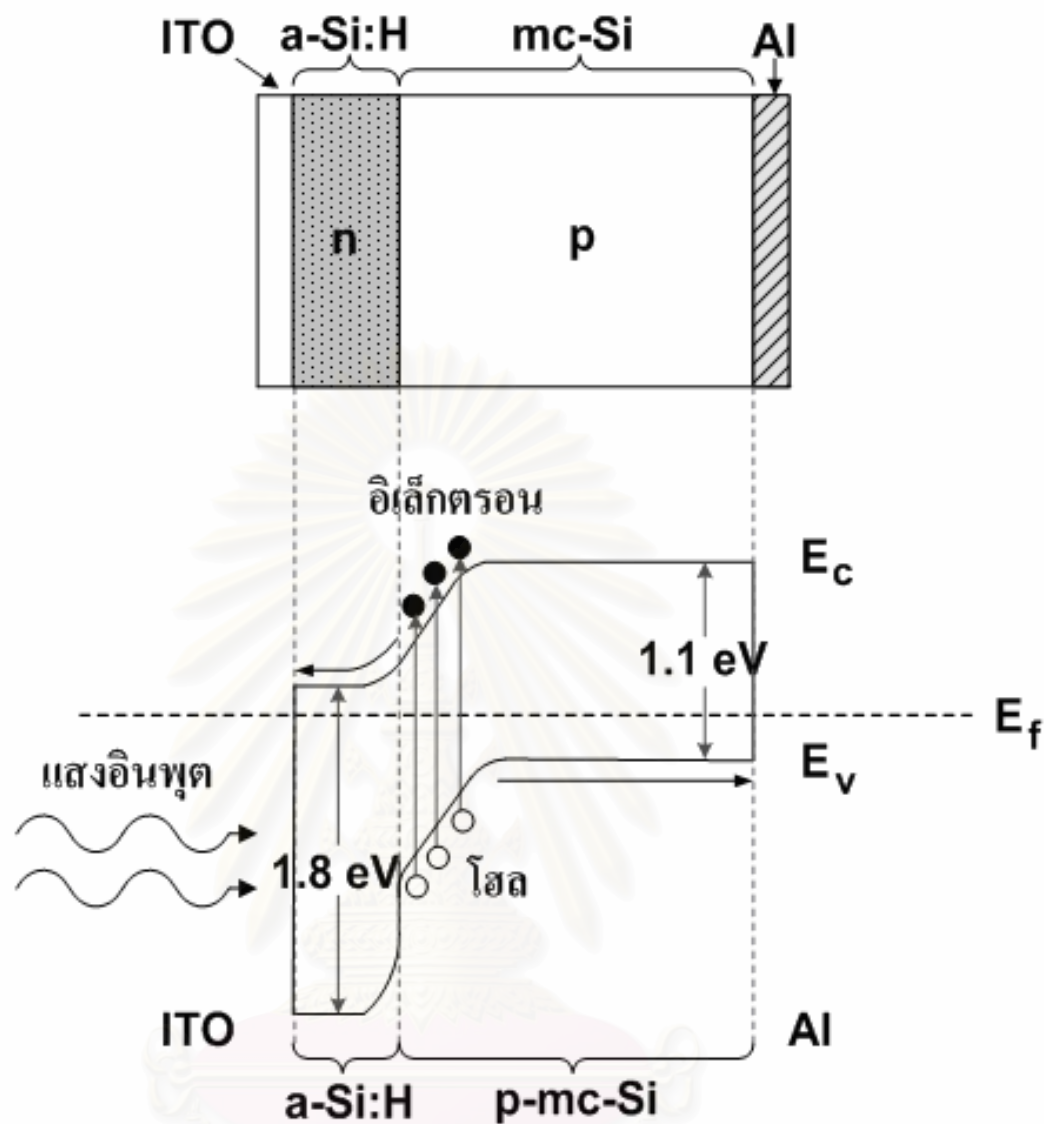
### โครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโร ของอะมอร์ฟัสซิลิคอนและผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอน

#### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้างแรกคือโครงสร้างพื้นฐานรอยต่อพี-เอ็นของ n-a-Si:H และผลึก p-mc-Si โครงสร้างที่สองคือ โครงสร้างที่มีการแทรกชั้น i-a-Si:H เพิ่มเข้าไปตรงกลางในโครงสร้างพื้นฐานระหว่างชั้นของ n-a-Si:H และผลึก p-mc-Si เพื่อเพิ่มบริเวณชั้นทำงานให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ โดยที่โครงสร้างทั้งสองจะมีชั้นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงอินเดียมดีบุกออกไซด์ (Indium Tin Oxide ย่อว่า ITO) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าในด้านรับแสงและชั้นอะลูมิเนียม (Aluminum ย่อว่า Al) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์

#### 2.2 โครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 1 (ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al)

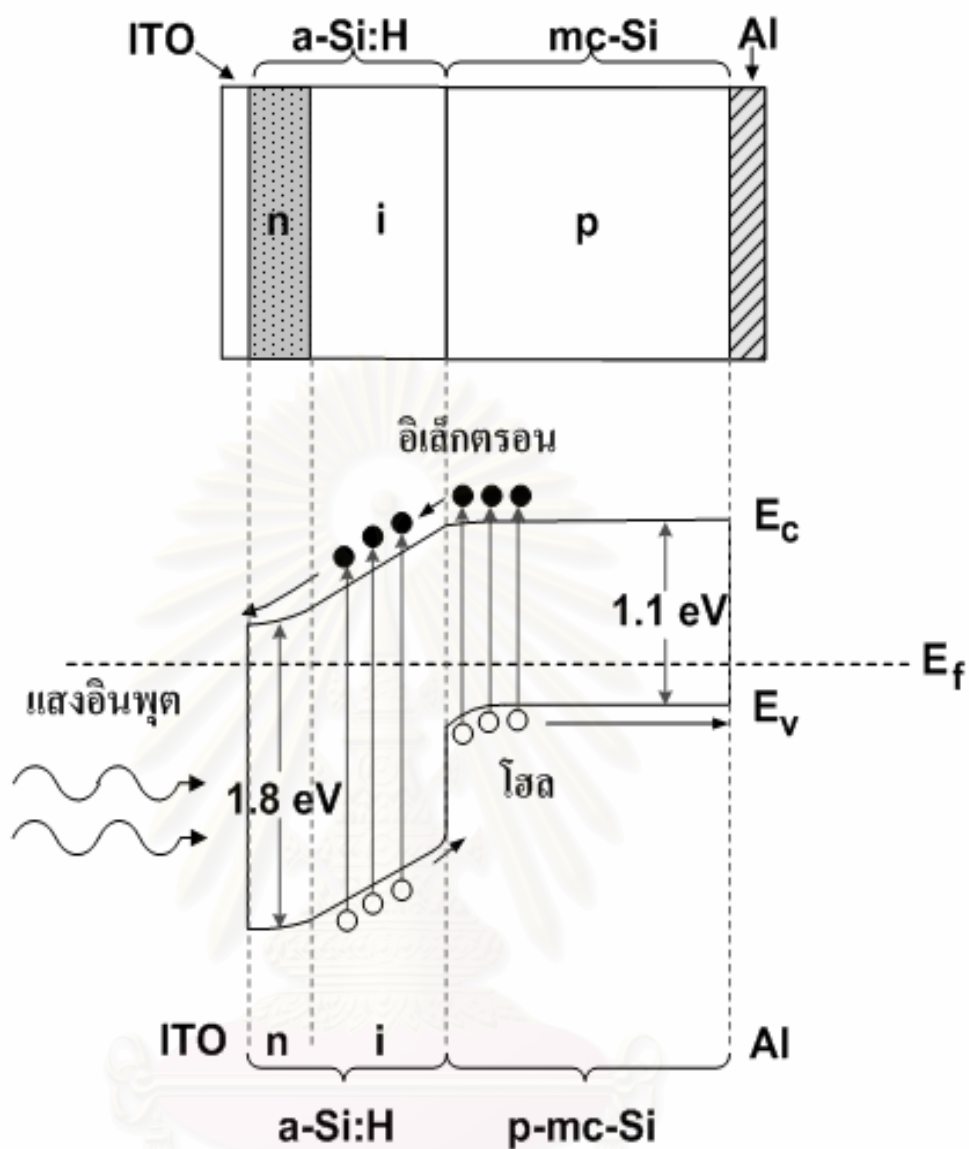
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ขึ้นในงานวิทยานิพนธ์นี้จะเริ่มต้นด้วยโครงสร้างพื้นฐานคือ ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al ดังแสดงในรูปที่ 2.1 พร้อมด้วยลักษณะแผนภูมิแถบพลังงาน ในการใช้งานแสงจะส่องเข้าทางด้านขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ITO เข้าสู่ชั้น n-a-Si:H และแผ่นฐานซึ่งเป็นผลึก p-mc-Si ตามลำดับ เมื่อแสงเดินทางเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ แสงส่วนใหญ่จะเดินทางทะลุชั้น n-a-Si:H เข้าไป เนื่องจากชั้น n-a-Si:H มีค่าของช่องว่างพลังงานกว้างกว่าชั้น p-mc-Si ดังนั้นชั้น n-a-Si:H จึงทำหน้าที่เสมือนชั้นหน้าต่างและสร้างแรงดันไฟฟ้าภายใน (Built-in Potential) ให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ และแสงจะถูกดูดกลืนโดยชั้น p-mc-Si ซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นทำงาน ทำให้เกิดเป็นคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลขึ้น จากนั้นอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกสนามไฟฟ้าภายในแยกให้ไหลออกสู่ภายนอกผ่านทางด้านชั้น n-a-Si:H และขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ITO ส่วนโฮลจะไหลไปทางด้านชั้น p-mc-Si และขั้ว Al



รูปที่ 2.1 โครงสร้างและลักษณะแผนภูมิแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์

รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 1 (ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al)

สถาบันวิจัยและพัฒนา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 โครงสร้างและลักษณะแผนภูมิแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์

รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 2 (ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.3 โครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 2 (ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al)

นอกจากโครงสร้างแบบที่ 1 แล้ว ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบและประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเพิ่มชั้น i-a-Si:H เข้าไป เป็นโครงสร้างขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งคาดว่าโครงสร้างนี้จะให้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากชั้น i-a-Si:H จะช่วยลดการสูญเสียแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นได้มากขึ้นเป็นการเพิ่มบริเวณชั้นทำงานในเซลล์แสงอาทิตย์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีเพิ่มมากขึ้นด้วย เมื่อแสงเดินทางเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ แสงส่วนใหญ่จะเดินทางทะลุชั้น n-a-Si:H ซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นหน้าต่างและสร้างแรงดันไฟฟ้าภายใน แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นจะถูกดูดกลืนโดยชั้น i-a-Si:H ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลในชั้น i-a-Si:H ชั้น ส่วนแสงที่มีความยาวคลื่นยาวจะเดินทางต่อเข้าไปในชั้น p-mc-Si และแสงที่มีความยาวคลื่นยาวดังกล่าวจะถูกดูดกลืนโดยชั้น p-mc-Si ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้นในชั้น p-mc-Si ต่อจากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกสนามไฟฟ้าภายในแยกให้ไหลออกสู่ภายนอกผ่านทางด้านชั้น n-a-Si:H และขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ITO ส่วนโฮลจะไหลไปทางด้านชั้น p-mc-Si และชั้น Al

## 2.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงโครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของอะมอร์ฟัสซิลิคอนและผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอนทั้งสิ้น 2 แบบด้วยกันคือ

1. โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al และ
2. โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al

โดยแสดงลักษณะแผนภูมิแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละโครงสร้างประกอบสำหรับโครงสร้างทั้งสองที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ จะเห็นว่าเป็นโครงสร้างที่ไม่มีความซับซ้อนมากนัก จึงมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนต่ำ และให้ประสิทธิภาพสูงเป็นอย่างมาก

## บทที่ 3

### การประดิษฐ์และการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ รอยต่อเฮเทอโรของอะมอร์ฟัสซิลิคอนและผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอน

#### 3.1 บทนำ

ในบทนี้ จะกล่าวถึงรายละเอียดของกระบวนการประดิษฐ์และการวัดลักษณะสมบัติเอาต์-  
พุตของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของอะมอร์ฟัสซิลิคอนและผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอนซึ่ง  
ครอบคลุมตั้งแต่การเตรียมแผ่นฐาน การปลูกฟิล์มชั้นต่างๆ และการใช้แสงอาทิตย์เทียมในการวัด  
ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งแต่ละขั้นก็จะใช้เครื่องมือแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน  
ออกไป

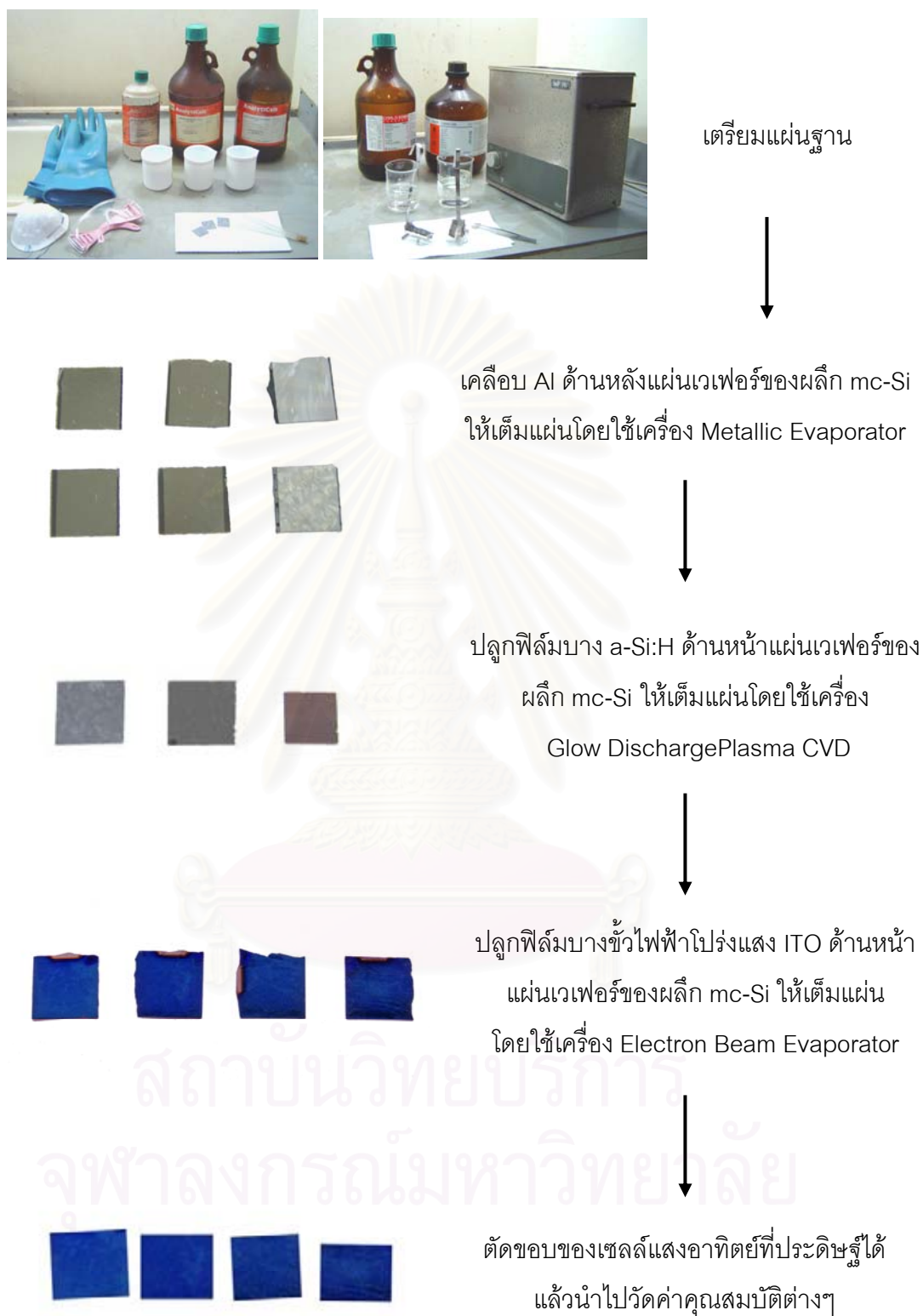
นอกจากนี้ จะอธิบายถึงการหาเงื่อนไขของการปลูกฟิล์มชั้นซิลิคอนไปเร่งแสง ITO โดย  
อาศัยการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มด้วยการเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น อุณหภูมิของแผ่น  
ฐาน และใช้การวัดค่าการทะลุผ่านของแสงของชั้นซิลิคอนไปเร่งแสง ITO ด้วยเครื่อง UV  
Spectrophotometer, การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นซิลิคอนไปเร่งแสง ITO แบบง่ายด้วย  
Multimeter เพื่อหาเงื่อนไขของการปลูกที่ดีที่สุดในการนำมาใช้ประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

สุดท้ายจะกล่าวถึงการวัดและการพัฒนาโปรแกรมการวัดคุณสมบัติเอาต์พุตของ  
เซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแสงอาทิตย์เทียม และการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์  
แสงอาทิตย์ โดยในบทนี้จะได้อธิบายถึงรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ และหลักการทำงานของ  
ของเครื่องมือที่ใช้ พร้อมทั้งแสดงภาพถ่ายของเครื่องมือที่ใช้จริงในงานวิทยานิพนธ์นี้ด้วย

#### 3.2 กระบวนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของอะมอร์ฟัสซิลิคอนและ ผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอน

การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของ a-Si:H และผลึก mc-Si มีขั้นตอนต่างๆ  
โดยสรุปแสดงดังรูปที่ 3.1





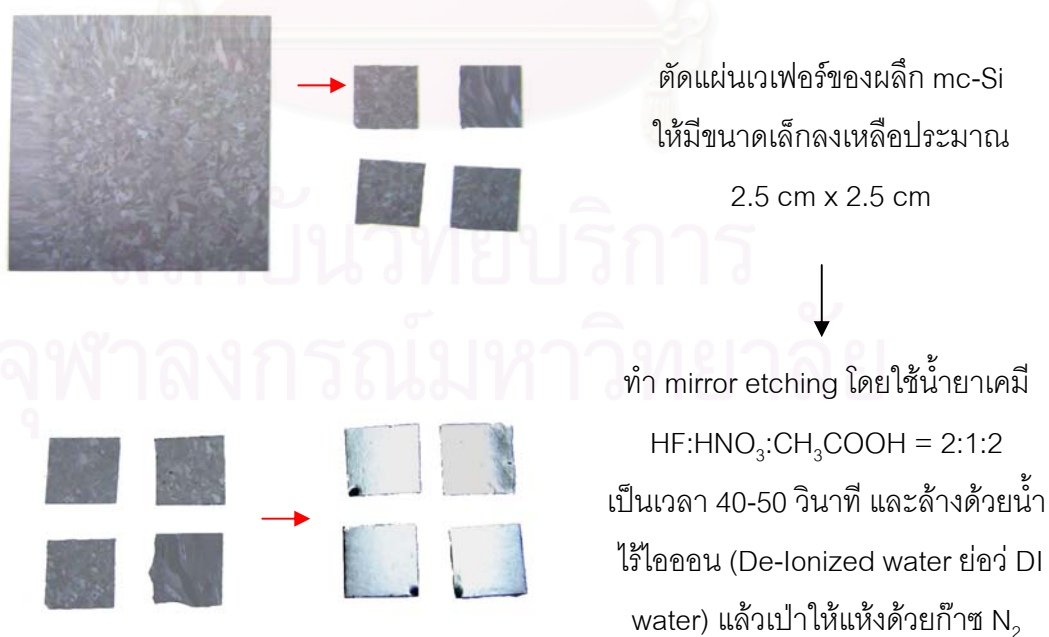
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของ a-Si:H และ mc-Si

### 3.2.1 การเตรียมแผ่นฐาน

แผ่นฐานที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้แสดงดังตารางที่ 3.1 พร้อมกับแสดงวัตถุประสงค์ของการใช้แผ่นฐานแต่ละชนิด รูปที่ 3.2 แสดงภาพการเตรียมแผ่นเวเฟอร์ของผลึก mc-Si และรูปที่ 3.3 แสดงการเตรียมแผ่นกระจกใส Corning # 7059 ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้

ตารางที่ 3.1 ชนิดและวัตถุประสงค์ในการใช้แผ่นฐานแบบต่างๆ

แผ่นฐาน	วัตถุประสงค์
แผ่นเวเฟอร์ของผลึก mc-Si ชนิด p ของบริษัท Wacker (10 cm x 10 cm x 450 $\mu$ m)	เพื่อประดิษฐ์และวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์
แผ่นกระจกใส # 7059 ของบริษัท Corning (2 cm x 2 cm x 1 mm)	เพื่อวัดการทะลุผ่านของแสง, ความหนาของฟิล์ม, อัตราการปลูกฟิล์ม, ช่องว่างพลังงาน และการนำไฟฟ้า



รูปที่ 3.2 การเตรียมแผ่นเวเฟอร์ของผลึก mc-Si [4]



ล้างใน Acetone โดยใช้  
เครื่อง Ultrasound เป็น  
เวลา 20 นาที

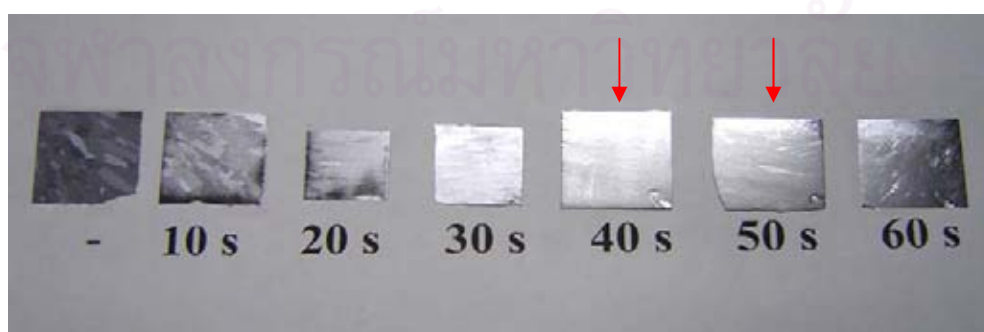


ล้างใน Methyl Alcohol  
โดยใช้เครื่อง Ultrasound  
เป็นเวลา 20 นาที แล้ว  
เป่าให้แห้งด้วยก๊าซ  $N_2$

รูปที่ 3.3 การเตรียมแผ่นกระจกใส Corning # 7059 [4]

สำหรับการเตรียมแผ่นเวเฟอร์ของผลึก mc-Si นั้นการควบคุมเวลาในการทำ Mirror Etching ให้มีความเหมาะสมที่ประมาณ 40-50 วินาทีเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากถ้าใช้เวลาในการกัดสั้นกว่านี้ผิวแผ่นเวเฟอร์ของผลึก mc-Si จะยังมีลักษณะที่หยาบเกินไป แต่ถ้าเวลาที่ใช้ในการกัดนานกว่านี้ผิวแผ่นเวเฟอร์ของผลึก mc-Si ก็จะถูกกัดมากจนบางเกินไป และมีลักษณะหยาบตามรอยเกรนอีกครั้งดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งรอยเกรนดังกล่าวจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นมีกระแสรั่วมากที่บริเวณรอยต่อ และมีประสิทธิภาพต่ำ

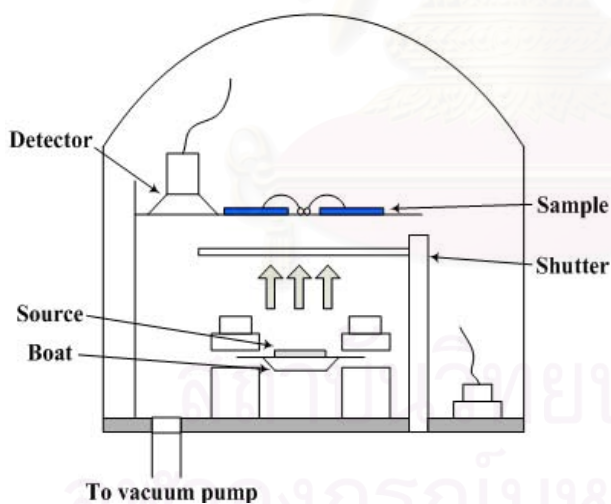
นอกจากนี้ก่อนนำแผ่นเวเฟอร์ของผลึก mc-Si ที่เตรียมไว้แล้วมาใช้งานจะต้องทำการกัดผิวออกไซด์ออกก่อนด้วยวิธี Slight Etching ด้วยน้ำยาเคมี HF:DI water = 1:10 เป็นเวลา 2 นาที และล้างด้วย DI water แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซ  $N_2$



รูปที่ 3.4 แผ่นเวเฟอร์ของผลึก mc-Si ที่ทำการกัดผิวด้วยวิธี Mirror Etching ที่เวลาต่างๆ

### 3.2.2 การเคลือบชั้นอะลูมิเนียม

การเคลือบชั้น Al ในงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีไอระเหยในสุญญากาศด้วยเครื่อง Metallic Evaporator ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันมากและราคาถูก รูปที่ 3.5 (ก) แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่อง และรูปที่ 3.5 (ข) แสดงเครื่อง Metallic Evaporator ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ โดยหลักการการทำงานของเครื่องมีดังนี้ [5] คือ โลหะที่ถูกใช้เป็นตัว Evaporant (Source) จะถูกใส่เอาไว้ใน Boat ที่ทำจากทังสเตน และทั้ง Source, Boat และแผ่นฐาน จะอยู่ภายในแชมเบอร์ที่ถูกดูดอากาศออกด้วยปั๊มสุญญากาศ Oil Diffusion Pump จนมีความดันเหลือประมาณ  $10^{-6}$  Torr หลังจากนั้นจึงทำการปล่อยกระแสที่มีค่าสูงผ่าน Boat เมื่ออุณหภูมิของ Boat สูงเกินกว่าจุดกลายเป็นไอของโลหะที่เป็น Source ที่ความดันดังกล่าว โลหะก็จะกลายเป็นไอพุ่งออกไปด้วยพลังงานจลน์ไปเกาะติดอยู่บนแผ่นฐาน ซึ่งโดยทั่วไปจะมี Shutter คั่นอยู่ระหว่าง Source กับแผ่นฐาน และมี Detector ทำหน้าที่วัดความหนาของชั้นโลหะที่เคลือบขึ้นด้วย



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 (ก) ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่อง Metallic Evaporator  
(ข) เครื่อง Metallic Evaporator ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้

### 3.2.3 การปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน

ฟิล์มบาง a-Si:H สามารถผลิตได้หลายวิธีจากวัตถุดิบชนิดของแข็งและก๊าซ ในอดีตฟิล์มบาง a-Si:H เคยถูกผลิตด้วยวิธี Thermal Evaporation และ Sputtering จากวัตถุดิบของแข็ง แต่ในปัจจุบันวิธี Glow Discharge Plasma CVD เป็นวิธีที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุด เพราะสามารถผลิตฟิล์มบาง a-Si:H ได้จากวัตถุดิบที่เป็นก๊าซให้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ได้ดี ดังนั้น การปลูกฟิล์มบาง a-Si:H ในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วิธี Glow Discharge Plasma CVD ที่มีโครงสร้างของระบบและรายละเอียดต่างๆ ในการปลูกฟิล์มดังต่อไปนี้ [6] คือ

#### 3.2.3.1 โครงสร้างของระบบ Glow Discharge Plasma CVD

ในการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H ในงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้เครื่อง Glow Discharge Plasma CVD ที่ใช้สนามไฟฟ้าความถี่คลื่นวิทยุที่ 13.56 MHz (Radio Frequency) โดยมีหลักการทำงานคือ ก๊าซชนิดต่างๆ จะถูกส่งเข้าแชมเบอร์และก๊าซชนิดเหล่านี้จะถูกสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุคลื่นวิทยุ กระตุ้นให้แตกตัวเป็นพลาสมา ทำให้อะตอมของธาตุต่าง ๆ ถูกแยกให้ไปเกาะติดเป็นฟิล์มบางบนแผ่นฐานที่วางอยู่บนฐานร้อนโดยมีเงื่อนไขต่าง ๆ ที่จะต้องควบคุมดังนี้คือ ปริมาณการไหลของก๊าซ ความดันภายในแชมเบอร์ กำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซ และอุณหภูมิของแผ่นฐาน รูปที่ 3.6 แสดงแผนผังของระบบ Glow Discharge Plasma CVD สำหรับปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และรูปที่ 3.7 แสดงระบบ Glow Discharge Plasma CVD ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ

##### 1) เครื่องซีวีดี

เครื่องซีวีดี ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ดังต่อไปนี้

1. แชมเบอร์ชนิดแก้วไพเรกซ์ (Pyrex Chamber) มีลักษณะเป็นครอบแก้วทรงกระบอกสูงประมาณ 40 cm หนา 5 mm มีเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนด้านล่าง 22 cm และเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนด้านบน 12 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ทำหน้าที่เป็นภาชนะสุญญากาศ โดยวางคว่ำประกบอยู่บนฐานเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel Flange) และมียางแพ็กกิง (L Type Packing Rubber) เป็นตัวเก็บสุญญากาศ ภายในของแชมเบอร์มีจานโลหะกลมทำจากผลึกโพลีซิลิคอนคาร์ไบด์ซึ่งสามารถหมุนรอบตัวเองได้สำหรับวางแผ่นฐานของชิ้นงาน และติดตั้งบนเตาร้อนซึ่งเปลี่ยนอุณหภูมิได้จากอุณหภูมิห้องถึงประมาณ 400°C ด้านล่างสุดของแชมเบอร์มีท่อ

โลหะต่อไปสู่เครื่องสุญญากาศชนิดโรตารี (Rotary Vacuum Pump) และด้านข้างของแชมเบอร์ มีวาล์วสำหรับเปิดปิดควบคุมการปล่อยก๊าซเข้าแชมเบอร์

2. เครื่องกำเนิดสนามไฟฟ้าความถี่คลื่นวิทยุ ทำหน้าที่กำเนิดสนามไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับกระตุ้นให้ก๊าซแยกสลายตัวเป็นพลาสมา โดยต่อเข้าสู่แชมเบอร์ด้วยสายไฟฟ้าชนิดแกนร่วม ก่อนเข้าแชมเบอร์จะมีกล่องแมตชิง (Matching Box) ซึ่งประกอบด้วยขดลวดและตัวเก็บประจุสำหรับปรับให้อิมพีแดนซ์ของเครื่องกำเนิดสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุมีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของโหลด (พลาสมา) ต่อจากกล่องแมตชิงลงมาจะเป็นขั้วไฟฟ้าแอนโนดซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะจานกลม และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm และมีรูพรุนด้านล่างกระจายอยู่ทั่ว ก๊าซจากภายนอกแชมเบอร์จะไหลเข้าสู่ขั้วแอนโนดนี้และไหลผ่านรูพรุนกระจายลงสู่บริเวณที่วางแผ่นฐานในลักษณะคล้ายฝักบัว (Air Shower) ส่วนฐานโลหะที่วางแผ่นฐานจะต่อลงดินและทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิของเตาความร้อนที่ต่อกับขั้วแคโทดใช้วิธีโซลิดสเตตริเลย์

## 2) ระบบการจ่ายก๊าซและควบคุมก๊าซ

ก๊าซดิบที่ใช้ในงานวิทยานพธรณีนี้เป็นก๊าซที่มีความบริสุทธิ์สูงมากระดับ 99.9999 % ขึ้นไป เจือจางด้วยก๊าซไฮโดรเจนด้วยความเข้มข้นตามความเหมาะสม ดังนี้

ก๊าซซิลิโคน  $\text{SiH}_4 / \text{H}_2 = 10 \%$  บรรจุอยู่ในถังก๊าซขนาด 40 ลิตร

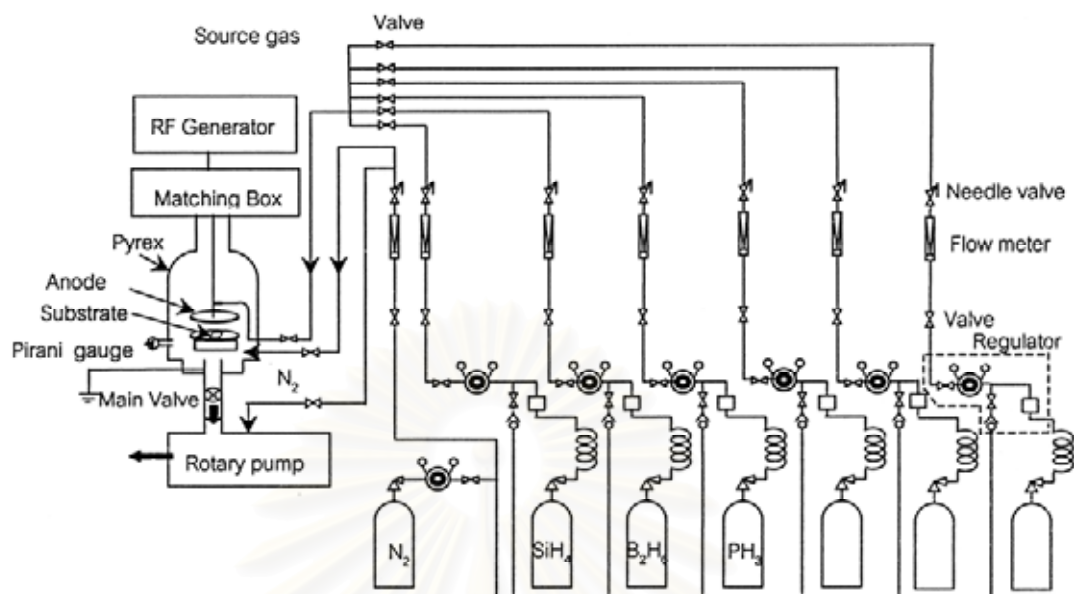
ก๊าซไดโบเรน  $\text{B}_2 \text{H}_6 / \text{H}_2 = 500 \text{ ppm}$  บรรจุอยู่ในถังก๊าซขนาด 10 ลิตร ใช้สำหรับได้ปให้

a-Si:H เป็นชนิด p

ก๊าซฟอสฟีน  $\text{PH}_3 / \text{H}_2 = 500 \text{ ppm}$  บรรจุอยู่ในถังก๊าซขนาด 10 ลิตร ใช้สำหรับได้ปให้

a-Si:H เป็นชนิด n

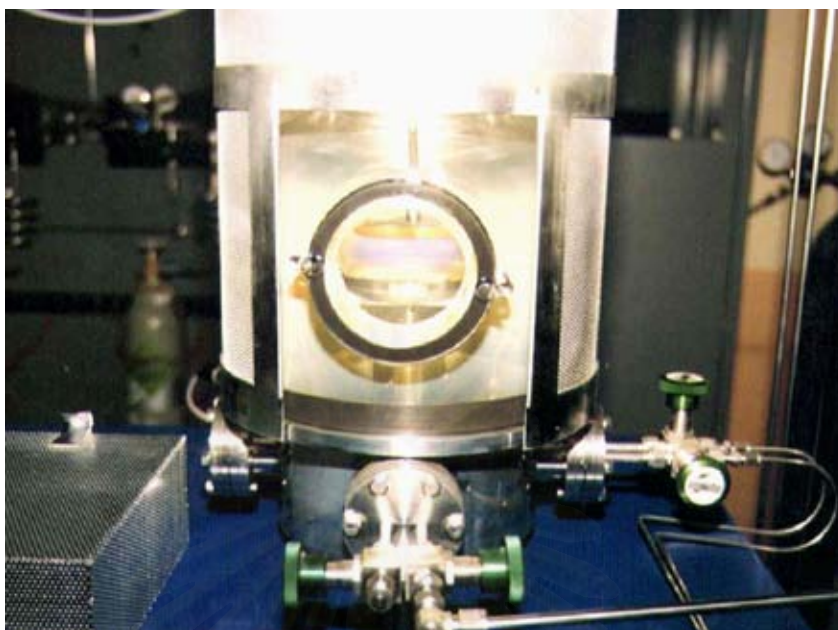
ก๊าซเหล่านี้บรรจุอยู่ในถังก๊าซด้วยความดันสูงประมาณ  $120 \text{ kg/cm}^2$  จากถังก๊าซจะต่อท่อเหล็กกล้าไร้สนิมและฟิลเตอร์กรองฝุ่นขนาด  $50 \mu\text{m}$  แล้วต่อเข้ากับก๊าซเรกูเลเตอร์ (Gas Regulator) ซึ่งเป็นตัวลดความดันก๊าซให้ลดลงเหลือประมาณ  $1-2 \text{ kg/cm}^2$  ต่อจากนั้นจะมีวาล์วและมาตรวัดอัตราการไหลของก๊าซ (0-100 cc/min) โดยอัตราการไหลของก๊าซนี้จะถูกควบคุมด้วยวาล์วชนิดเข็ม (Needle Valve) ก๊าซต่าง ๆ จะไหลไปรวมกันที่วาล์วสามทางและไหลไปสู่แชมเบอร์หรือลงไปสู่เครื่องสุญญากาศแล้วแต่ความต้องการ เนื่องจากก๊าซดิบเหล่านี้เป็นก๊าซพิษอันตรายและบางชนิดไวไฟมาก การใช้งานจึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษว่าต้องไม่มีการรั่วออกสู่ภายนอก (กรณีก๊าซซิลิโคนนั้น นอกจากเป็นก๊าซพิษแล้ว ถ้ารั่วและสัมผัสกับออกซิเจนจะติดไฟทันทีแม้จะไม่มีเปลวไฟจากที่อื่นเป็นต้นเพลิง) รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะการติดตั้งถังก๊าซและก๊าซเรกูเลเตอร์ที่ได้มีการตรวจสอบแล้วว่าไม่มีการรั่วทั้งด้วยวิธีสุญญากาศและวิธีเพิ่มความดัน



รูปที่ 3.6 แผนผังของระบบ Glow Discharge Plasma CVD สำหรับปลูกฟิล์มบาง a-Si:H



รูปที่ 3.7 ระบบ Glow Discharge Plasma CVD ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์



รูปที่ 3.8 ครอบแก้วสุญญากาศสำหรับปลูกฟิล์มบาง a-Si:H



รูปที่ 3.9 ลักษณะการติดตั้งถังก๊าซและก๊าซเรกูเลเตอร์



### 3.2.3.2 การเกิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน

ฟิล์มบาง a-Si:H ที่ผลิตโดยกระบวนการ Glow Discharge Plasma CVD นั้น พลาสมาของก๊าซภายในแชมเบอร์ สามารถเกิดขึ้นได้จากอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งความเร็วภายใต้สนามไฟฟ้าวิ่งชนกับโมเลกุลของก๊าซ ทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) โดยพลังงานที่ใช้ในการแตกตัวเป็นไอออน จะมีค่าประมาณ 10 - 20 eV หลังจากนั้นที่บริเวณผิวของแผ่นฐานก็จะทำการดูดซับไอออนและโมเลกุลของก๊าซเอาไว้เกิดเป็นฟิล์มบาง a-Si:H ขึ้น

สำหรับการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H ในงานวิทยานิพนธ์นี้เริ่มต้นด้วยการติดตั้งแผ่นฐาน และทำการเพิ่มอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานสูงตามต้องการแล้ว จึงเริ่มปล่อยก๊าซดิบต่าง ๆ ที่เปิดช่องไว้ในท่อให้ไหลเข้าแชมเบอร์ด้วยอัตราที่กำหนดและควบคุมความดันภายในแชมเบอร์ให้คงที่ตามค่าที่กำหนด ต่อจากนั้นก็เริ่มป้อนสนามไฟฟ้าความถี่คลื่นวิทยุเพื่อทำให้ก๊าซแตกตัวเป็นไอออน โดยใช้กำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซที่เหมาะสม ตารางที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขโดยสรุปสำหรับการปลูกฟิล์ม a-Si:H ในงานวิทยานิพนธ์นี้

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขโดยสรุปสำหรับการปลูกฟิล์ม a-Si:H ในงานวิทยานิพนธ์นี้

การทำดิสชาร์จ	แบบคาปาซิเตอร์ ที่ความถี่ 13.56 MHz
กำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซ	5-20 W
อุณหภูมิแผ่นฐาน	190°C
ความดันก่อนการปลูกฟิล์ม	<0.01 Torr
ความดันขณะปลูกฟิล์ม	0.3-1.1 Torr
ความสูงของขั้ว	10 cm
ปริมาณการไหลของก๊าซแต่ละชนิด	15-60 cc/min
ชนิดของก๊าซในถัง	SiH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> = 10% PH <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> = 500 ppm B <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /H <sub>2</sub> = 500 ppm

เมื่อปลูกฟิล์มได้ความหนาตามต้องการแล้ว ก็ปิดสนามไฟฟ้าคลื่นวิทยุ แล้วจึงลดอุณหภูมิของแผ่นฐานให้ถึงอุณหภูมิต่ำ โดยจะใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ส่วนก๊าซดิบที่เหลือในท่อก็ต้องระบายทิ้งให้หมด เมื่อก๊าซดิบหมดแล้วให้ไล่ (Purge) ก๊าซดิบที่ตกค้างอีกครั้งด้วยก๊าซ N<sub>2</sub> จากนั้น

เมื่ออุณหภูมิของแผ่นฐานลดถึงอุณหภูมิห้องแล้วจึงปรับความดันภายในแชมเบอร์ให้สูงขึ้นถึงสภาพบรรยากาศด้วยก๊าซ  $N_2$  และนำฟิล์มที่ได้ออกจากแชมเบอร์

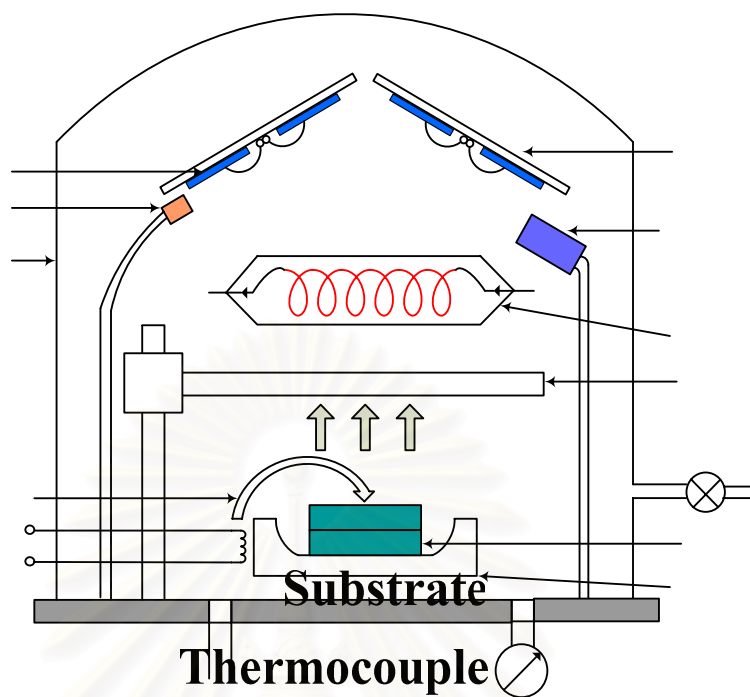
### 3.2.4 การปลูกฟิล์มบางชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงอินเดียมดีบุกออกไซด์

ชั้นไฟฟ้าโปร่งแสง ITO มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี และยอมให้แสงทะลุผ่านดี ในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ฟิล์ม ITO เป็นชั้นไฟฟ้าด้านรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งวัสดุเริ่มต้นของ ITO คือ สารประกอบของ  $In_2O_3$  และ  $SnO_2$  ที่มีอัตราส่วนน้ำหนักของ In:Sn = 95:5 โดยประมาณ นำมาอัดเป็นเม็ด Pellet มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 3.10 และวิธีที่ใช้ในการปลูกฟิล์มคือวิธี Electron Beam Evaporator ซึ่งมีข้อดีคือเป็นกระบวนการที่สะอาด ปราศจากสารเจือปน มีพารามิเตอร์เงื่อนไขในการควบคุมน้อย และสะดวกในการทำงาน



รูปที่ 3.10 เม็ด pellet ของ ITO

เครื่อง Electron Beam Evaporator นี้ประกอบด้วยแชมเบอร์ที่ถูกทำให้เป็นสุญญากาศด้วย Oil diffusion Pump, ตัวยึดแผ่นฐาน (Holder) สำหรับติดตั้งแผ่นฐาน, แผ่นฐาน (Substrate) ที่ถูกติดตั้งเหนือเป้า (Crucible) สำหรับติดตั้งเป้า (Target) ประมาณ 30 cm, Vibrating Quartz Microbalance ซึ่งทำหน้าที่วัดอัตราการปลูกฟิล์ม, Heater (Tungsten Lamp) ทำหน้าที่เพิ่มอุณหภูมิให้กับแผ่นฐาน, Thermocouple ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิของแผ่นฐาน, แหล่งจ่ายลำแสงอิเล็กตรอน (Electron Beam) และ Shutter ทำหน้าที่บังแผ่นฐานไว้ในขณะที่ยังไม่ต้องการปลูกฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12 แสดงเครื่อง Electron Beam Evaporator ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้



### Chamber

รูปที่ 3.11 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่อง Electron Beam Evaporator



To vacuum pur

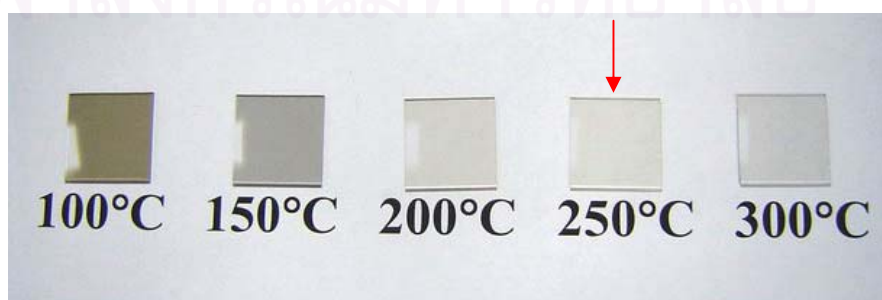
รูปที่ 3.12 เครื่อง Electron Beam Evaporator ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดลองปลูกฟิล์ม ITO เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง โดยใช้แผ่นกระจกใส Corning # 7059 เป็นแผ่นฐานที่ใช้ในการทดลอง และทำการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิของแผ่นฐานค่าต่าง ๆ คือ  $100^{\circ}\text{C}$   $150^{\circ}\text{C}$   $200^{\circ}\text{C}$   $250^{\circ}\text{C}$  และ  $300^{\circ}\text{C}$  เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้คุณสมบัติของฟิล์ม ITO ที่ดีที่สุดในการนำไปใช้ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป โดยมีเงื่อนไขที่สำคัญอื่นๆ ซึ่งคงค่าไว้ในการทดลองนี้คือ อัตราการปลูกฟิล์ม, ความดันออกซิเจน, ความหนาของฟิล์ม และความเร็วในการหมุนตัวยึดแผ่นฐาน [7] แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขในการปลูกฟิล์ม ITO

Target	$\text{In}_2\text{O}_3:\text{SnO}_2$
อัตราการปลูกฟิล์ม	1-2 Å/sec
ความดันก่อนการปลูก	$< 7 \times 10^{-6}$ Torr
ความดันออกซิเจน	$5 \times 10^{-4}$ Torr
ความหนาของฟิล์ม	2,000 Å
ความเร็วในการหมุนตัวยึดแผ่นฐาน	5 rpm.

สำหรับการปลูกฟิล์ม ITO จะเริ่มต้นจากการติดตั้งแผ่นฐานที่จะเคลือบฟิล์ม ITO และเม็ด pellet ของ ITO ลงไปในแชมเบอร์ แล้วปิดแชมเบอร์ตั้งค่าอุณหภูมิของแผ่นฐาน และความเร็วในการหมุนตัวยึดแผ่นฐานตามต้องการ แล้วดูให้เป็นสุญญากาศที่ความดันต่ำกว่าประมาณ  $7 \times 10^{-6}$  Torr จากนั้นก่อนที่จะทำยิงลำแสงอิเล็กตรอนไปยังเม็ด Pellet ของ ITO จึงทำการปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าไปในแชมเบอร์ให้มีความดันประมาณ  $5 \times 10^{-4}$  Torr และใช้ลำแสงอิเล็กตรอนยิงเม็ด Pellet ของ ITO ให้ระเหยกกลายเป็นไอ เมื่อเปิด Shutter ก็จะมีการเคลือบของฟิล์ม ITO ลงบนแผ่นฐานรูปที่ 3.13 แสดงลักษณะของฟิล์ม ITO ที่ปลูกได้ที่อุณหภูมิแผ่นฐานต่างๆกัน



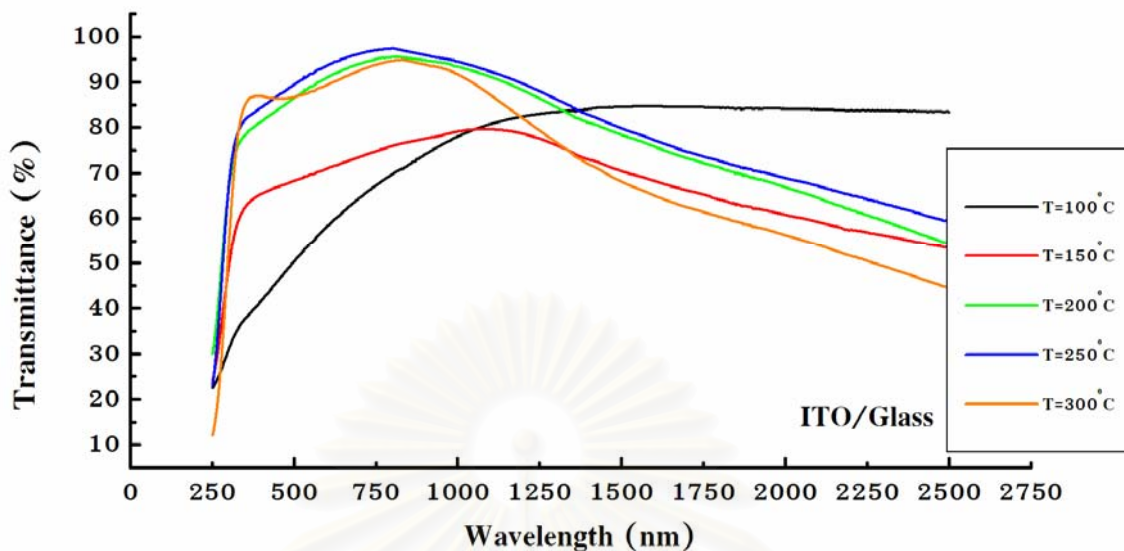
รูปที่ 3.13 ลักษณะของฟิล์ม ITO ที่ปลูกได้ที่อุณหภูมิแผ่นฐานต่างๆกัน

หลังจากที่ได้ฟิล์มบางของ ITO แล้วจึงนำไปวัดคุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้า สำหรับการวัดคุณสมบัติทางแสงทำการวัดการทะลุผ่านของแสง โดยใช้ช่วงสเปกตรัมของแสงที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 250-2,500 nm ด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer รุ่น Shimadzu UV210 ดังแสดงในรูปที่ 3.14 และผลการวัดที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.15 ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิแผ่นฐาน  $250^{\circ}\text{C}$  จะมีการทะลุผ่านของแสงดีที่สุด และที่อุณหภูมิแผ่นฐานต่ำกว่า  $250^{\circ}\text{C}$  การทะลุผ่านของแสงจะมีค่าต่ำเนื่องมาจากฟิล์มมีสีน้ำตาลมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานลดลง

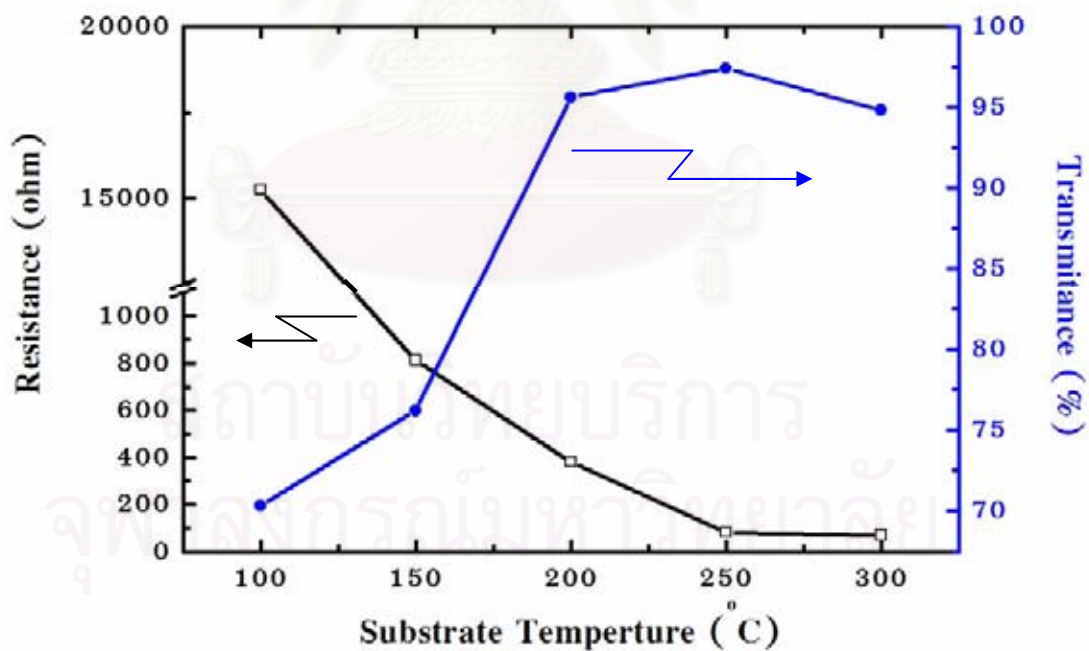
ส่วนการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มทำโดยใช้เครื่อง Multimeter ซึ่งเป็นการวัดค่าความต้านทานของฟิล์ม ITO เพื่อศึกษาแนวโน้มอย่างคร่าวๆ ผลการวัดที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.16 พบว่าที่อุณหภูมิแผ่นฐานต่ำค่าความต้านทานมีค่าสูง แต่เมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานสูงขึ้นตั้งแต่  $150^{\circ}\text{C}$  เป็นต้นไปค่าความต้านทานจะมีค่าต่ำลงและมีค่าต่ำที่สุดเมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานเท่ากับ  $250^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าที่อุณหภูมิแผ่นฐานเท่ากับ  $250^{\circ}\text{C}$  เป็นอุณหภูมิที่มีความเหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด



รูปที่ 3.14 เครื่อง UV Spectrophotometer สำหรับวัดสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง



รูปที่ 3.15 ผลการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านแสงของฟิล์ม ITO ความหนา 2,000 Å พารามิเตอร์คือ อุณหภูมิแผ่นฐาน

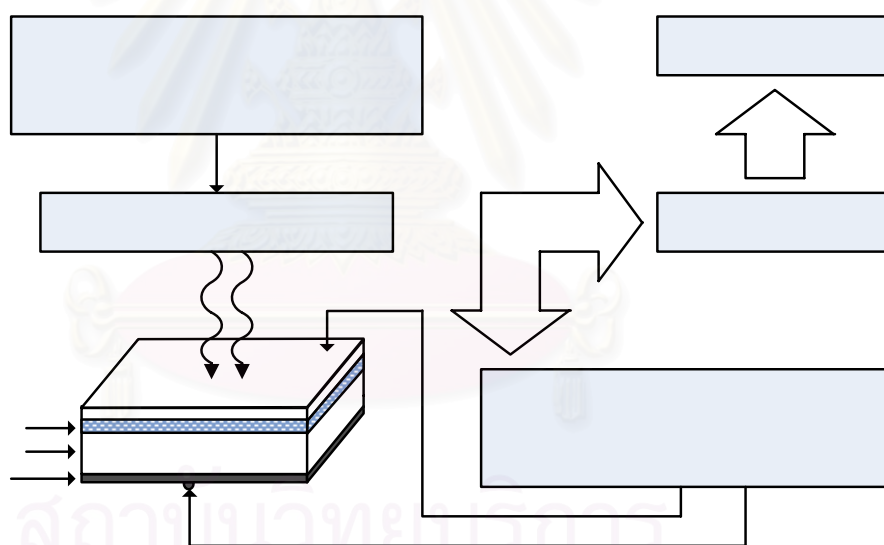


รูปที่ 3.16 ผลการวัดอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นฐานที่มีต่อความต้านทานของฟิล์ม ITO และ การทะลุผ่านของแสง (วัดที่ความยาวคลื่น 810 nm) โดยที่ฟิล์ม ITO หนา 1,500 Å

### 3.3 การวัดและการพัฒนาโปรแกรมการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์

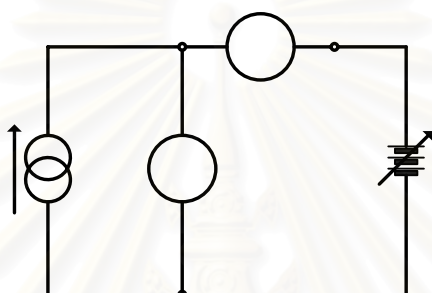
การวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแสงอาทิตย์เทียม มีแผนภาพของระบบการวัดแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนดังนี้คือ

- 1) ต้นกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม เป็นหลอดไฟชนิด High Pressure Xe Arc Lamp ของบริษัท Kratos ประเทศเยอรมัน ซึ่งมีฟิลเตอร์ซึ่งสามารถทำให้ได้แสงเอาต์พุตที่มีความเข้มเท่ากับ AM1 AM1.5 และ AM2 โดยลำแสงมีรูปเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 cm
- 2) เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและวัดกระแสไฟฟ้า
- 3) คอมพิวเตอร์
- 4) เซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานชนิดผลึกเดี่ยว Si เพื่อใช้ปรับและเทียบค่าความเข้มแสงตามต้องการ



รูปที่ 3.17 แผนภาพของระบบการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแสงอาทิตย์เทียมและคอมพิวเตอร์

รูปที่ 3.18 แสดงวงจรสมมูลของการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์โดยหลักการวัดคือ ใช้การไบแอสแรงดันแบบตาม (Forward Bias) ให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ขณะรับแสง และเปลี่ยนค่าของแรงดันตั้งแต่ 0 โวลต์ (Short Circuit) จนถึงค่าที่ทำให้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตจากเซลล์แสงอาทิตย์กลายเป็นศูนย์ (Open Circuit) การไบแอสตามจากภายนอกเข้าไปยังเซลล์แสงอาทิตย์เช่นนี้ จะทำให้แถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนสภาพเป็นแนวราบ (Flat Band) ทำให้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตลดลงตามค่าแรงดันไฟฟ้าจนกลายเป็น 0 ในที่สุด ซึ่งผลการวัดที่ได้ทั้งหมดจะถูกนำไปเขียนกราฟและใช้คำนวณหาพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ต่อไป รูปที่ 3.19 แสดงเครื่องวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้



รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลของการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 3.19 เครื่องวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้



ข้อมูลที่ได้จากการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นผลการทดลองที่มีความสำคัญมาก นอกจากต้องใช้ระบบวัดที่มีประสิทธิภาพแล้ว การจัดการข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์และสรุปผลก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพต่อไป ในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อเขียนโปรแกรมสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆจากข้อมูลที่ได้จากการวัด เช่น

- 1) แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Voltage ย่อว่า  $V_{MAX}$ )
- 2) กระแสไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Current ย่อว่า  $J_{MAX}$ )
- 3) กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum Power ย่อว่า  $P_{MAX}$ ) ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและกระแสไฟฟ้าสูงสุด

$$P_{MAX} = V_{MAX} \times J_{MAX}$$

- 4) ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรมีเปิด (Open Circuit Voltage ย่อว่า  $V_{OC}$ ) ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์
- 5) ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short Circuit Current ย่อว่า  $J_{SC}$ ) ซึ่งเป็นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ของเซลล์แสงอาทิตย์
- 6) ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill Factor ย่อว่า FF) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดต่อผลคูณของแรงดันไฟฟ้าวงจรมีเปิดและกระแสไฟฟ้าลัดวงจร

$$F.F. = \frac{V_{MAX} \times J_{MAX}}{V_{OC} \times J_{SC}} \times 100 \%$$

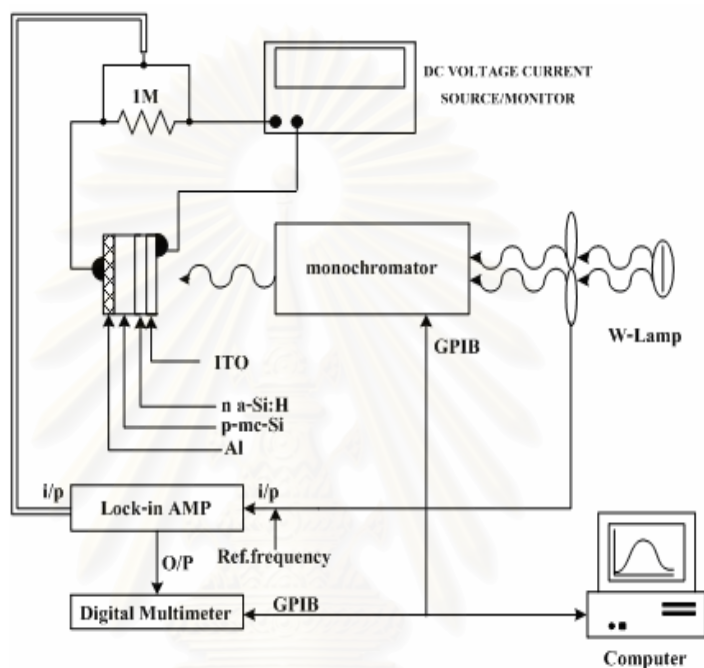
- 7) ประสิทธิภาพในการแปรพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ (Efficiency)

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{P_{IN}} \times 100 \%$$

โดยรายละเอียดของโปรแกรมที่เขียนขึ้นทั้งหมดจะแนบอยู่ในส่วนภาคผนวกของวิทยานิพนธ์นี้

### 3.4 การวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 3.20 แสดงแผนผังการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งทำการวัดแบบไม่มีการไบอัส และรูปที่ 3.21 แสดงระบบการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการวัดในวิทยานิพนธ์นี้



รูปที่ 3.20 แผนผังการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 3.21 ระบบการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

### 3.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของอะมอร์ฟัสซิลิคอนและผลึกมีลติคริสตัลไลน์ซิลิคอน โดยอธิบายการเตรียมแผ่นฐาน การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ รายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ เครื่องมือที่ใช้ การวัดลักษณะสมบัติเอชไอทีของเซลล์แสงอาทิตย์ และรายงานผลการทดลองปลูกฟิล์มชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงชนิด ITO

ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของฟิล์ม ITO ที่ปลูกได้ พบว่าที่อุณหภูมิแผ่นฐานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปลูกฟิล์ม ITO คือ  $250^{\circ}\text{C}$  ซึ่งให้ค่าการทะลุผ่านของแสงสูงที่สุด และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม ITO ที่ได้นี้จะนำไปใช้ประกอบในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ในบทต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 1 โครงสร้าง ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al

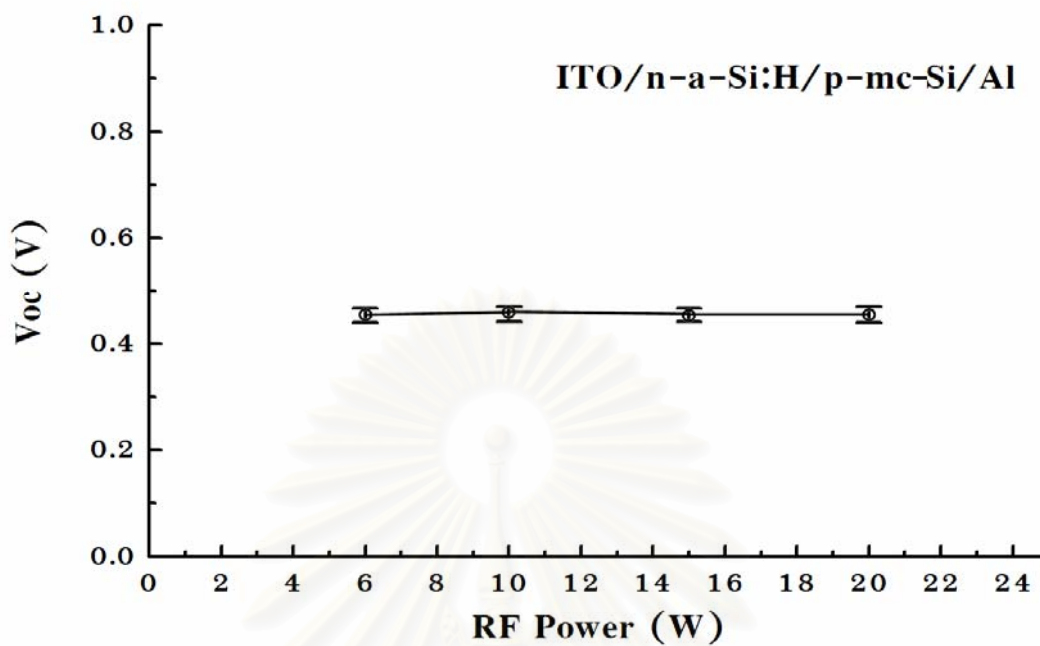
#### 4.1 บทนำ

เพื่อที่จะประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al ให้ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุดในงานวิทยานิพนธ์นี้จึงเริ่มต้นด้วยการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดของการปลูกชั้นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ITO ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 สำหรับบทนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในการปลูกชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H รวมทั้งแสดงผลการทดลองที่ได้ โดยทำการทดลองประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์สองตัวด้วยกันคือ ค่ากำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซ และค่าความหนาของฟิล์มบาง n-a-Si:H จากนั้นจึงทำการวัดค่าการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง n-a-Si:H, ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ และผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาบริเวณชั้นทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และนำผลที่ได้มาพิจารณาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด

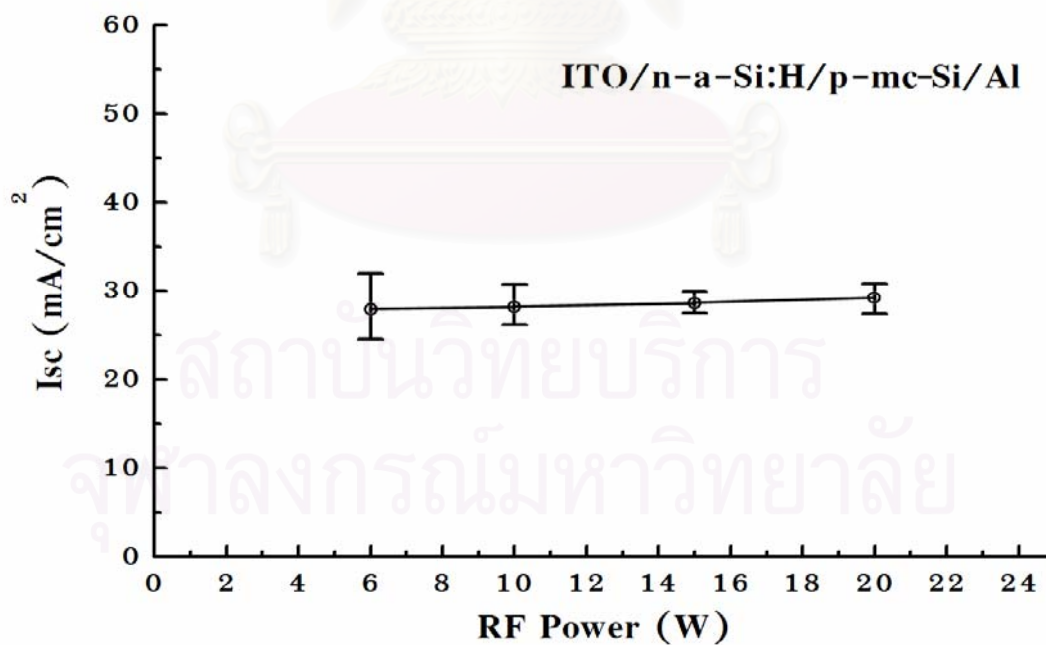
#### 4.2 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อทำการเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซของการปลูกฟิล์มบาง n-a-Si:H

ในการหาเงื่อนไขของการปลูกฟิล์มบาง n-a-Si:H ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al นั้น เริ่มต้นด้วยการเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซของการปลูกฟิล์มบาง n-a-Si:H เป็นค่าต่างๆ ทั้งหมด 4 ค่าด้วยกันคือ 6 W, 10 W, 15 W และ 20 W โดยคงค่าพารามิเตอร์ความหนาของชั้น n-a-Si:H เอาไว้ที่ 500 Å จากนั้นจึงนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ได้ไปทำการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ และวัดค่าผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแสงอาทิตย์เทียม

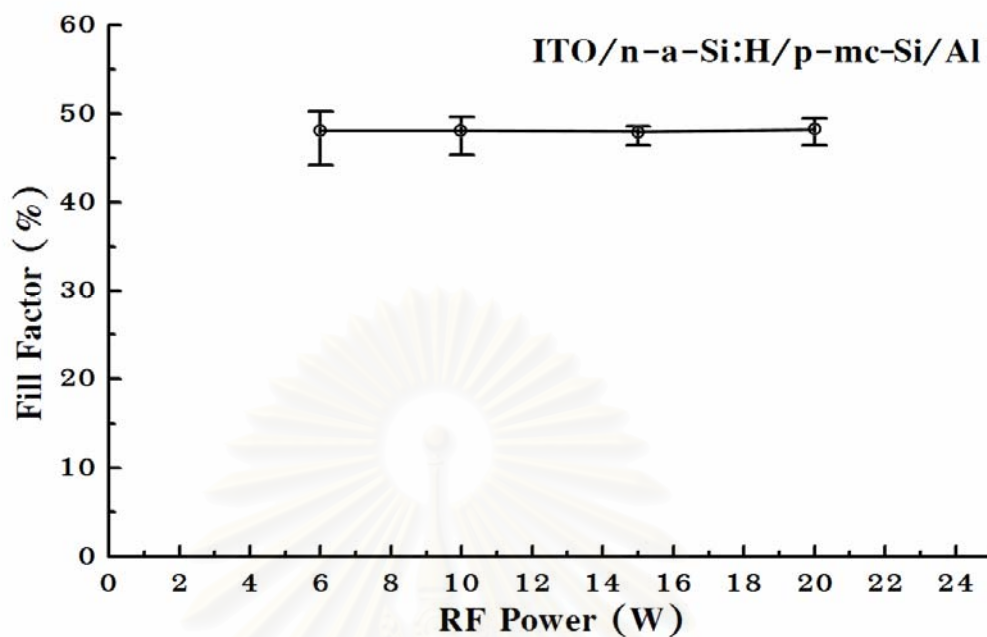
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ขึ้น ถูกนำไปวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแสงอาทิตย์เทียม โดยกำหนดให้เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละตัวมีพื้นที่เท่าๆ กันคือ 0.25-0.3 cm<sup>2</sup> และนำค่าเอาต์พุตที่ได้ของแต่ละค่ากำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ และค่าประสิทธิภาพกับค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกสลายก๊าซดังแสดงในรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ



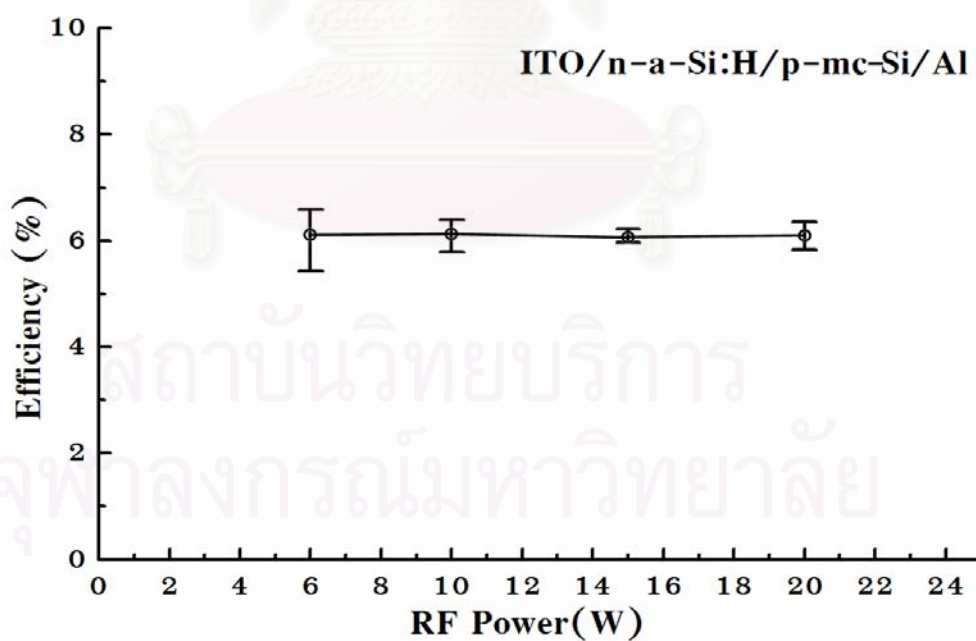
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกสลายก๊าซ (RF Power)



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกสลายก๊าซ (RF Power)



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลล์แฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกสลายก๊าซ (RF Power)



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกสลายก๊าซ (RF Power)

จากรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3 และ 4.4 มีข้อสังเกตดังต่อไปนี้

1) เมื่อค่ากำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถึงเปิดจะยังคงมีค่าคงที่ประมาณ 0.45 V เนื่องจากค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถึงเปิดนี้ขึ้นอยู่กับชั้นทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของค่าช่องว่างพลังงานของชั้นทำงาน สำหรับโครงสร้างนี้พาหะอิสระส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ชั้น p-mc-Si ซึ่งมีค่าของช่องว่างพลังงานอยู่ที่ประมาณ 1.1 eV ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H จึงไม่ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถึงเปิดเปลี่ยนแปลงไป

2) ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อค่ากำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 28 mA/cm<sup>2</sup> เนื่องจากที่ค่ากำลังไฟฟ้าค่าสูงชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H จะมีค่าการทะลุผ่านของแสงสูงกว่าทำให้แสงเดินทางเข้าสู่ชั้นทำงานได้มากขึ้น ส่งผลให้พาหะอิสระเกิดได้มากขึ้น กระแสไฟฟ้าลัดวงจรจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

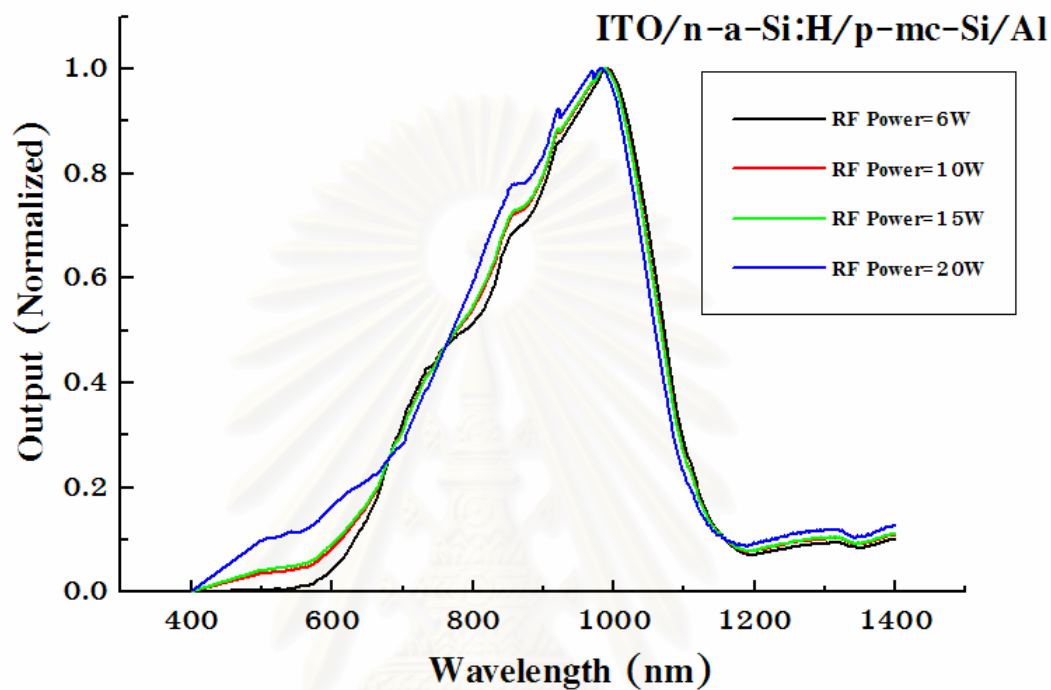
3) ค่าฟิลล์แฟกเตอร์มีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเช่นเดียวกัน เมื่อค่ากำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าประมาณ 47 % เนื่องจากที่ค่ากำลังไฟฟ้าค่าสูงโครงสร้างของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H มีความเป็นระเบียบมากขึ้น ทำให้พาหะที่เกิดขึ้นสามารถวิ่งผ่านไปได้อย่างสะดวกขึ้น ซึ่งเป็นการลดความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เกิดจากชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H ให้มีค่าลดลงส่งผลให้ค่าฟิลล์แฟกเตอร์มีการเพิ่มขึ้น

4) เมื่อค่ากำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าประสิทธิภาพที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 6 % เนื่องจากค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถึงเปิด ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยดังได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

รูปที่ 4.6 แสดงผลการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ค่ากำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซต่างๆ กัน พบว่าเอาต์พุตที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยค่าเอาต์พุตทั้งหมดที่ได้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ประมาณ 400-1,200 nm และมีจุดสูงสุดของเอาต์พุตแต่ละเส้นอยู่ที่ประมาณ 1,000 nm ซึ่งใกล้เคียงกับค่าช่องว่างพลังงานของชั้น p-mc-Si ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่า ชั้นที่ผลิตพาหะโฟโตของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบที่ 1 นี้คือ p-mc-Si

หลังจากทำการทดลองประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์โดยการเปลี่ยนค่ากำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซแล้ว พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน เนื่องจากระบบ Glow Discharge Plasma CVD ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์นี้เป็นชนิด vertical direction คือสนามไฟฟ้าอำนวยความสะดวกให้อนุภาคตั้งฉากกับแผ่นฐาน ส่งผลให้มีบริเวณของการแยกสลายก๊าซแคบ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซจึงมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของฟิล์มน้อย และกำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซเท่ากับ

6 W เป็นเงื่อนไขที่ให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่ากำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซเท่ากับ 6 W ในการทดลองเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ตัวต่อไป

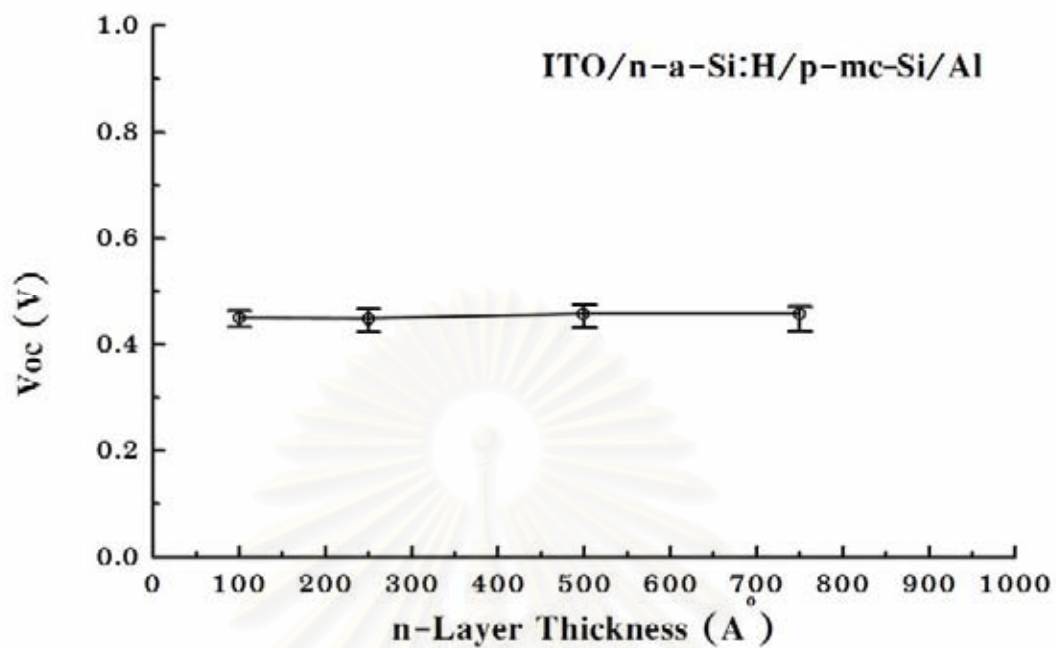


รูปที่ 4.5 สเปกตรัมผลตอบสนองของทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่กำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซเท่ากับ 6 W, 10 W, 15 W และ 20 W ตามลำดับ

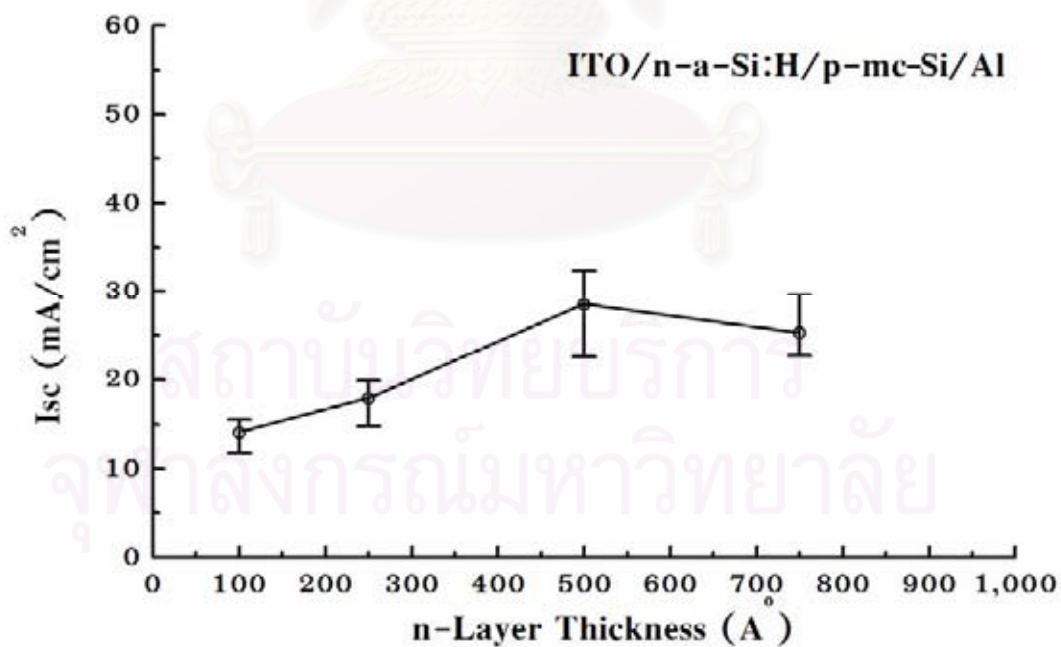
#### 4.3 ผลการศึกษาลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อทำการเปลี่ยนค่าความหนาของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H

ค่าพารามิเตอร์ตัวต่อไปที่ได้เปลี่ยนแปลงค่าคือ ค่าความหนาของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H โดยเปลี่ยนเป็นค่าต่างๆ 4 ค่า คือ 100 Å, 250 Å, 500 Å และ 750 Å

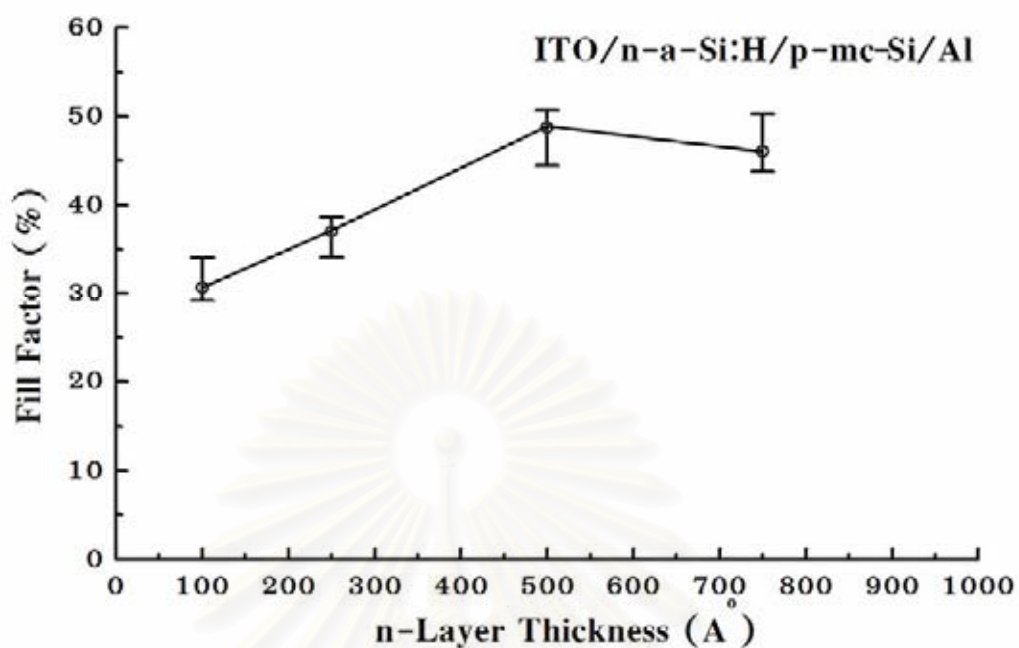




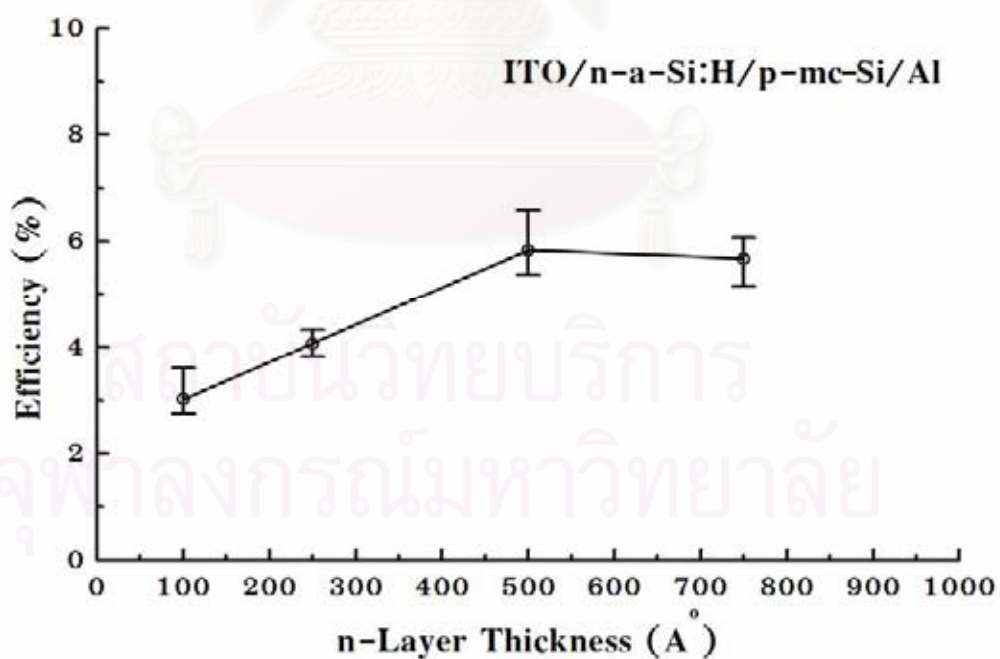
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ และความหนาของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ และความหนาของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิล์มแพกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ และความหนาของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และความหนาของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ได้ ถูกนำไปวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตด้วยแสงอาทิตย์เทียม โดยเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละตัวมีพื้นที่ประมาณ  $0.25-0.3 \text{ cm}^2$  รูปที่ 4.6, 4.7, 4.8 และ 4.9 แสดงลักษณะสมบัติเอาต์พุต จากรูปดังกล่าวมีข้อสังเกตดังนี้

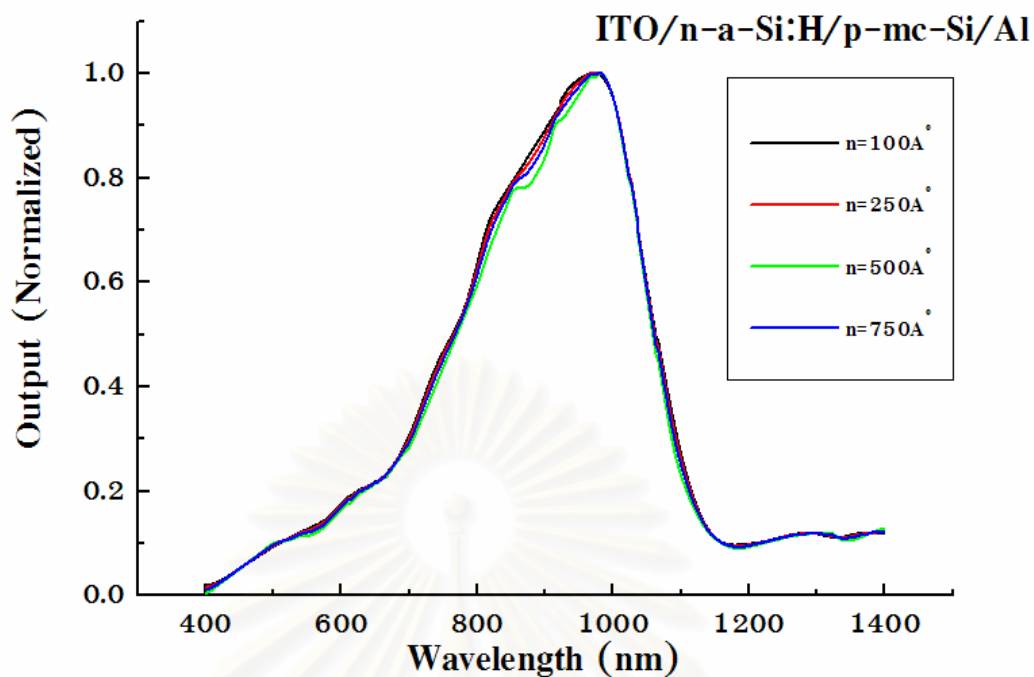
1) การเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H มีอิทธิพลต่อค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดน้อย ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดมีประมาณ 0.45 V

2) กระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H มีค่าเพิ่มขึ้น จาก  $100 \text{ \AA}$  ถึง  $500 \text{ \AA}$  และค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรจะลดลงเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H นานกว่า  $500 \text{ \AA}$  ในกรณีที่ชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H บางเกินไป อาจทำให้มีกระแสไฟฟ้ารั่ว อันเนื่องจากฟิล์มมีบริเวณรั่ว เมื่อความหนาของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H เพิ่มขึ้น การเกิดรอยต่อ (junction) จะมีความสมบูรณ์ดีขึ้น ค่าสนามไฟฟ้าภายในของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้การกวาดพาหะที่เกิดขึ้นในชั้นทำงานดียิ่งขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรจึงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความหนามีค่ามากเกินไป ฟิล์มบาง n-a-Si:H จะดูดกลืนแสงเอาไว้มากขึ้นและมีค่าความต้านทานอนุกรมมากขึ้น การทะลุผ่านของแสงเข้าสู่ชั้นทำงานจึงมีค่าน้อยลง กระแสไฟฟ้าลัดวงจรจึงมีค่าลดลง

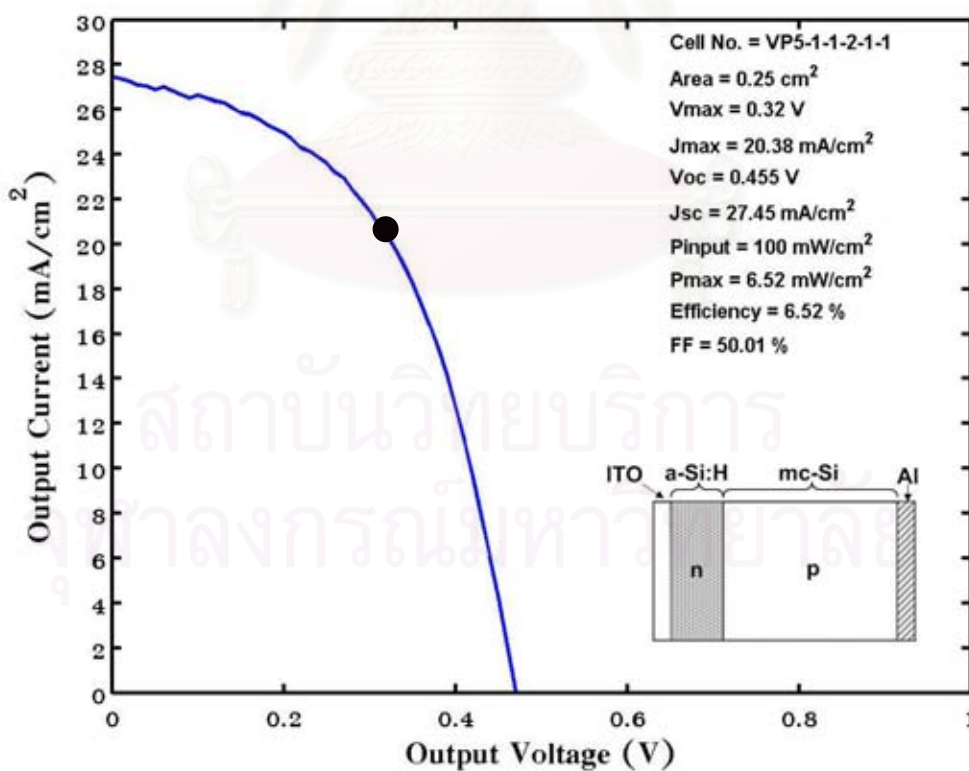
3) ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ที่วัดได้มีลักษณะของกราฟเช่นเดียวกันกับค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร คือมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงความหนาของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H เท่ากับ  $100-500 \text{ \AA}$  จากนั้นจึงมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H ที่มีค่าความหนาน้อยฟิล์มจะเกิดการทะลุของรอยต่อได้ง่ายและมีค่ากระแสรั่วมากทำให้ค่าฟิลล์แฟกเตอร์มีค่าน้อย แต่ถ้าค่าความหนามีค่ามาก ค่าความต้านทานอนุกรมจะมีค่ามากขึ้นทำให้ค่าฟิลล์แฟกเตอร์มีค่าลดลง

4) ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีสูงสุดที่ความหนาชั้น n-a-Si:H ที่เหมาะสม กราฟที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกันกับกราฟของค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ เนื่องมาจากค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ ที่เปลี่ยนแปลงไป ดังได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

รูปที่ 4.10 แสดงผลการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 1 พารามิเตอร์ในรูปคือ ความหนาของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H จากรูปพบว่า สเปกตรัมมีค่ายอดอยู่ที่ความยาวคลื่นแสงประมาณ  $900-1,000 \text{ nm}$  ซึ่งเป็นลักษณะคล้ายคลึงกับกรณีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนทั่วไป ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าชั้นที่ผลิตพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างเฮเทอโรแบบที่ 1 นี้คือชั้นของ p-mc-Si



รูปที่ 4.10 สเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความหนาของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H เท่ากับ 100 Å, 250 Å, 500 Å และ 750 Å



รูปที่ 4.11 ตัวอย่างผลการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ITO-n-a-Si:H/p-mc-Si/Al ที่ความเข้มแสง AM1

จากผลการศึกษาข้างต้น จึงได้ข้อสรุปเกี่ยวกับพารามิเตอร์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 1 (ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al) คือ ค่ากำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซที่เหมาะสมสำหรับชั้น n-a-Si:H 6 W และค่าความหนาที่เหมาะสมของชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H คือ 500 Å

รูปที่ 4.11 แสดงตัวอย่างผลการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตกราฟ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 1 (ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al) โดยวัดที่ความเข้มแสง AM1 พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) มีค่าเท่ากับ 0.455 V กระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) มีค่าเท่ากับ 27.45 mA/cm<sup>2</sup> ประสิทธิภาพที่ได้มีค่าเท่ากับ 6.52 % และฟิลล์แพกเตอร์มีค่าเท่ากับ 50.01 % จึงสรุปได้ว่าพารามิเตอร์นั้นส่วนใหญ่เกิดขึ้นในชั้นของ p-mc-Si

#### 4.4 สรุป

ในบทนี้ได้รายงานผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 1 (ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al) พบว่าชั้นที่ผลิตพารามิเตอร์คือ ชั้นของ p-mc-Si และเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการปลูกชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H คือ การปลูกด้วยค่ากำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซเท่ากับ 6 W และความหนาของฟิล์มเท่ากับ 500 Å ซึ่งให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดที่ 6.52 %

## บทที่ 5

### ผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 2 โครงสร้าง ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al

#### 5.1 บทนำ

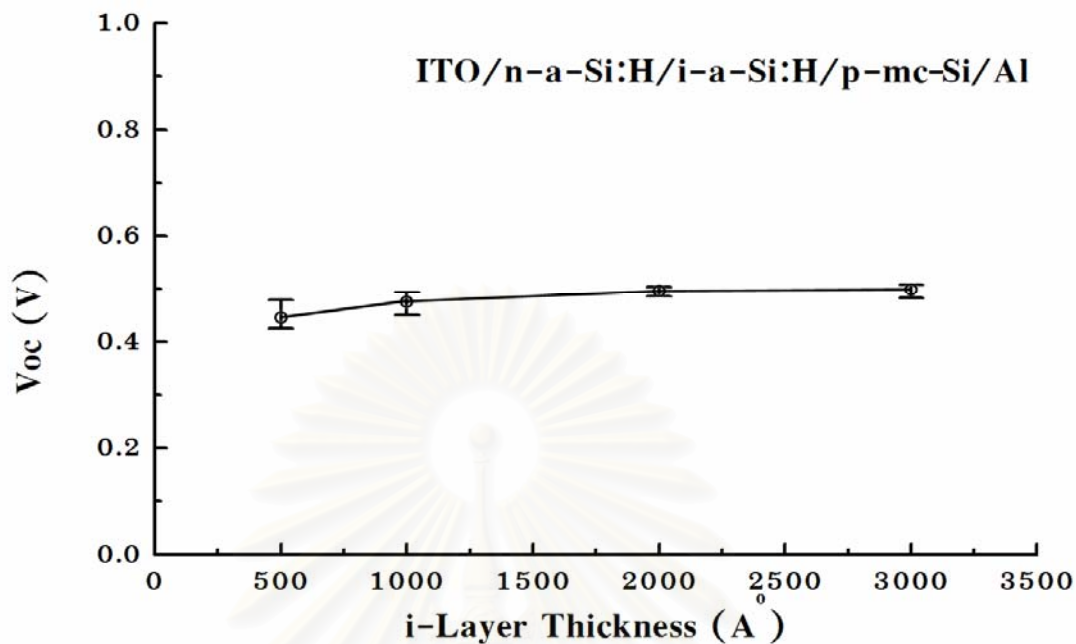
ในบทที่ 4 ได้รายงานผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 1 คือ โครงสร้าง ITO/n-a-Si:H/ p-mc-Si/Al ได้ประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 6.52% ในบทที่ 5 นี้จะ รายงานผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 2 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แทรกชั้นของ i-a-Si:H เข้าไประหว่างชั้น n-a-Si:H และ p-mc-Si โดยในการทดลองได้มีการเปลี่ยนค่าความหนา ของฟิล์ม i-a-Si:H

#### 5.2 ผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 2 และอิทธิพลของความหนา ของชั้นฟิล์มบาง i-a-Si:H

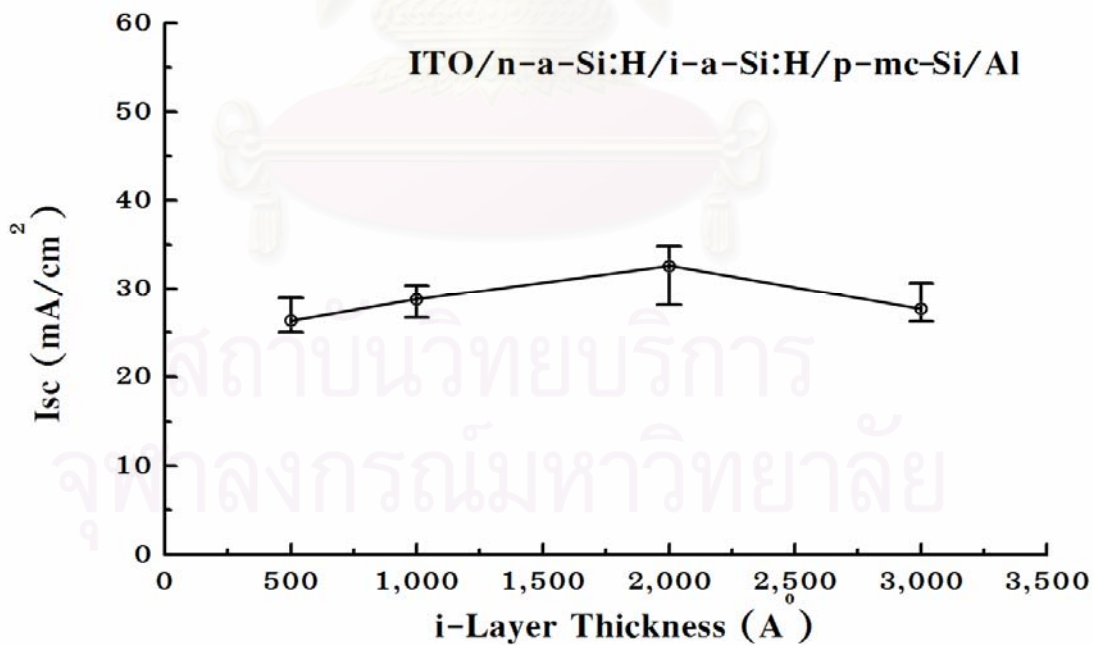
เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 2 ประกอบด้วยรอยต่อของ ITO/n-a-Si:H/ i-a-Si:H/p-mc-Si/Al ซึ่งชั้นที่ผลิตพาหะโฟโตคาตว่าจะได้แก่ชั้น i-a-Si:H และ p-mc-Si เงื่อนไข สำหรับการปลูกฟิล์มชั้น n-a-Si:H คือ กำลังไฟฟ้าแยกสลายก๊าซเท่ากับ 6 วัตต์ และความหนา 500 Å ซึ่งได้จากบทที่ 4

สำหรับในบทที่ 5 นี้ ได้เปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น i-a-Si:H เป็นค่าต่างๆเท่ากับ 500 Å, 1,000 Å, 2,000 Å และ 3,000 Å และกำหนดให้เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละตัวมีพื้นที่ประมาณ 0.25-0.3 cm<sup>2</sup> รูปที่ 5.1, 5.2, 5.3 และ 5.4 แสดงลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ดังต่อไปนี้

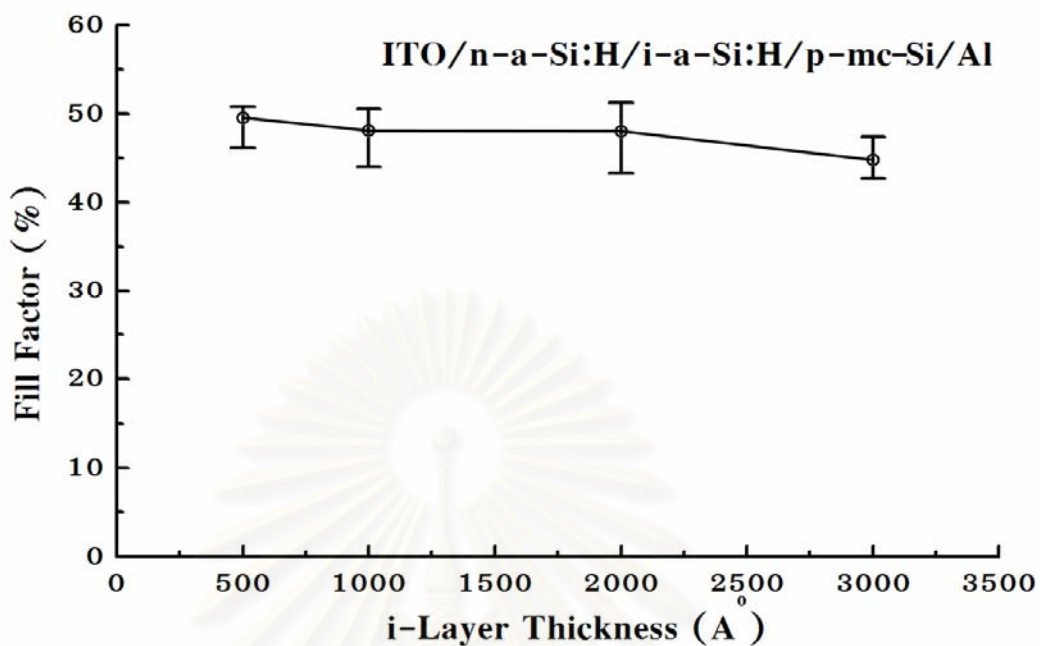
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



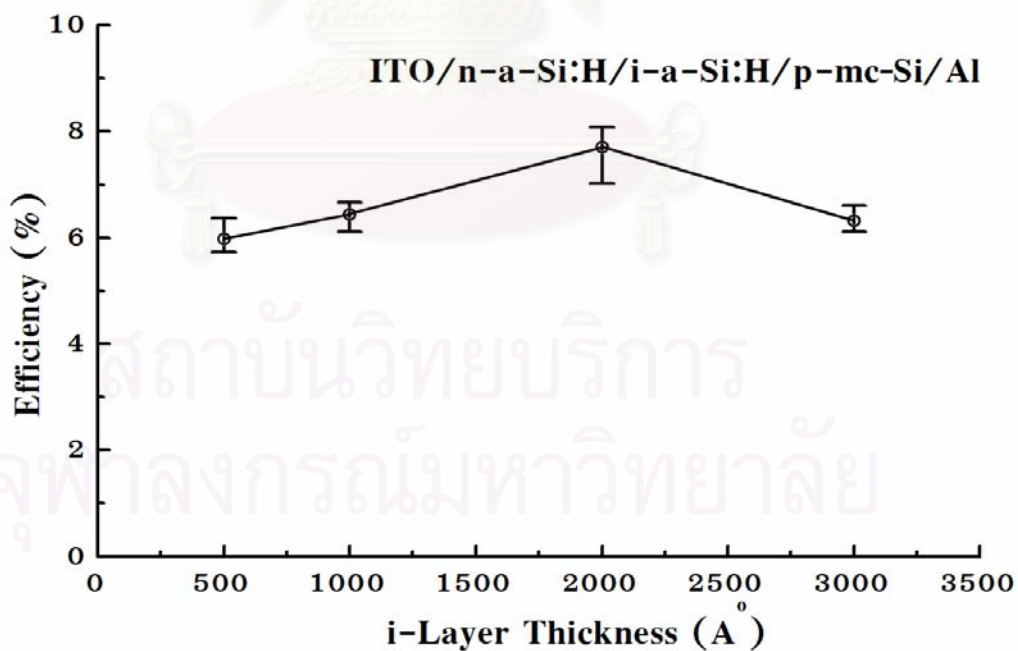
รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์และความหนาของชั้นฟิล์มบาง i-a-Si:H เท่ากับ 500 Å, 1,000 Å, 2,000 Å และ 3,000 Å



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์และความหนาของชั้นฟิล์มบาง i-a-Si:H เท่ากับ 500 Å, 1,000 Å, 2,000 Å และ 3,000 Å



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลล์แพกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์และความหนาของชั้นฟิล์มบาง i-a-Si:H เท่ากับ 500 Å, 1,000 Å, 2,000 Å และ 3,000 Å



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และความหนาของชั้นฟิล์มบาง i-a-Si:H เท่ากับ 500 Å, 1,000 Å, 2,000 Å และ 3,000 Å



1) เมื่อความหนาของชั้นฟิล์มบาง  $i-a-Si:H$  เพิ่มขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยจนถึงค่าความหนาเท่ากับ  $2,000 \text{ \AA}$  จากนั้นจึงมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อความหนามากกว่า  $2,000 \text{ \AA}$  เนื่องจากค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดนี้จะขึ้นอยู่กับชั้นทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยโครงสร้างนี้ชั้นทำงานที่มีพาหะส่วนใหญ่เกิดขึ้นก็คือชั้น  $p-mc-Si$  และมีการเพิ่มบริเวณของชั้นทำงานด้วยชั้น  $i-a-Si:H$  ส่งผลให้เมื่อค่าความหนาของชั้นฟิล์มบาง  $i-a-Si:H$  ที่มีค่าช่องว่างพลังงานประมาณ  $1.7-1.8 \text{ eV}$  เพิ่มขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดจึงมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

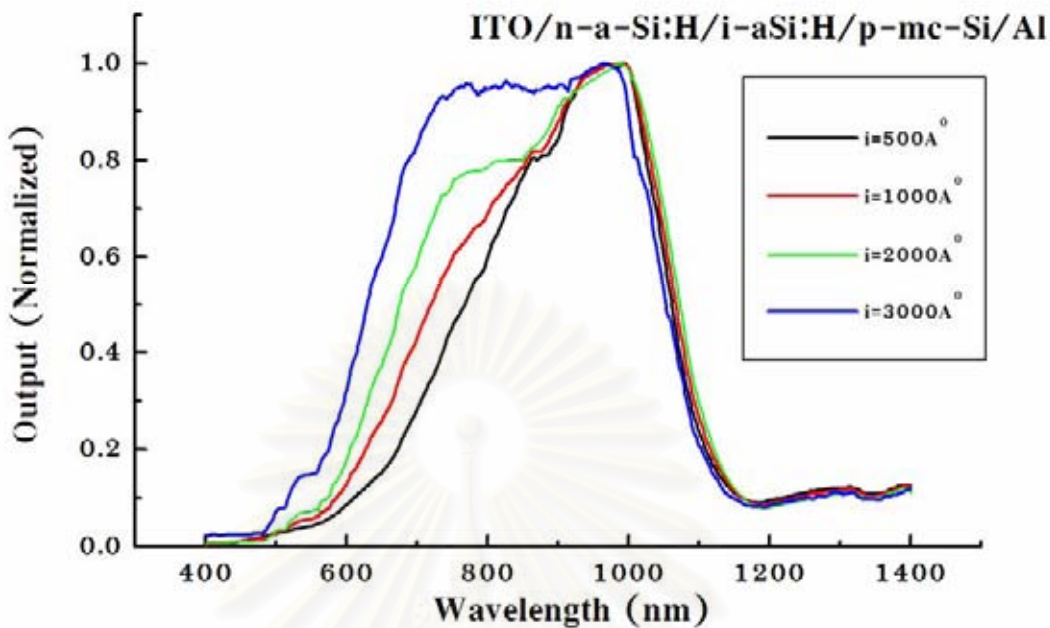
2) เมื่อค่าความหนาของชั้นฟิล์มบาง  $i-a-Si:H$  มีค่าเพิ่มขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยจนถึงค่าความหนาเท่ากับ  $2,000 \text{ \AA}$  จากนั้นจึงมีค่าลดลงเมื่อความหนามากกว่า  $2,000 \text{ \AA}$  เนื่องจากค่าความหนาของชั้นฟิล์มบาง  $i-a-Si:H$  ที่เพิ่มขึ้น ทำให้บริเวณของชั้นทำงานมีมากขึ้นและพาหะที่เกิดก็จะมีมากขึ้นด้วย ดังนั้นค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรจึงมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อความหนามีค่ามากเกินไปฟิล์มบาง  $i-a-Si:H$  จะดูดกลืนแสงเอาไว้ทำให้การทะลุผ่านของแสงเข้าสู่ชั้น  $p-mc-Si$  มีค่าน้อยลง ส่งผลให้พาหะที่เกิดในชั้น  $p-mc-Si$  มีจำนวนน้อยลง ถึงแม้ว่าจะการเกิดพาหะที่ชั้น  $i-a-Si:H$  จะมีจำนวนเพิ่มขึ้นก็ตาม นอกจากนี้เนื่องจากค่าสนามไฟฟ้าภายในยังคงมีค่าคงที่ถ้าค่าความหนาของชั้นฟิล์มบาง  $i-a-Si:H$  มีค่ามาก พาหะที่เกิดขึ้นก็จะไม่ถูกกวาดออกไปได้ทั้งหมด ดังนั้นค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรจึงมีค่าลดลงตามไปด้วย

3) ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ที่วัดได้มีลักษณะของกราฟลดลงเล็กน้อย เมื่อความหนาของฟิล์มบาง  $i-a-Si:H$  มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาที่มีค่ามากขึ้นจะทำให้ความต้านทานมีค่ามากขึ้นทำให้ค่าฟิลล์แฟกเตอร์มีค่าลดลง

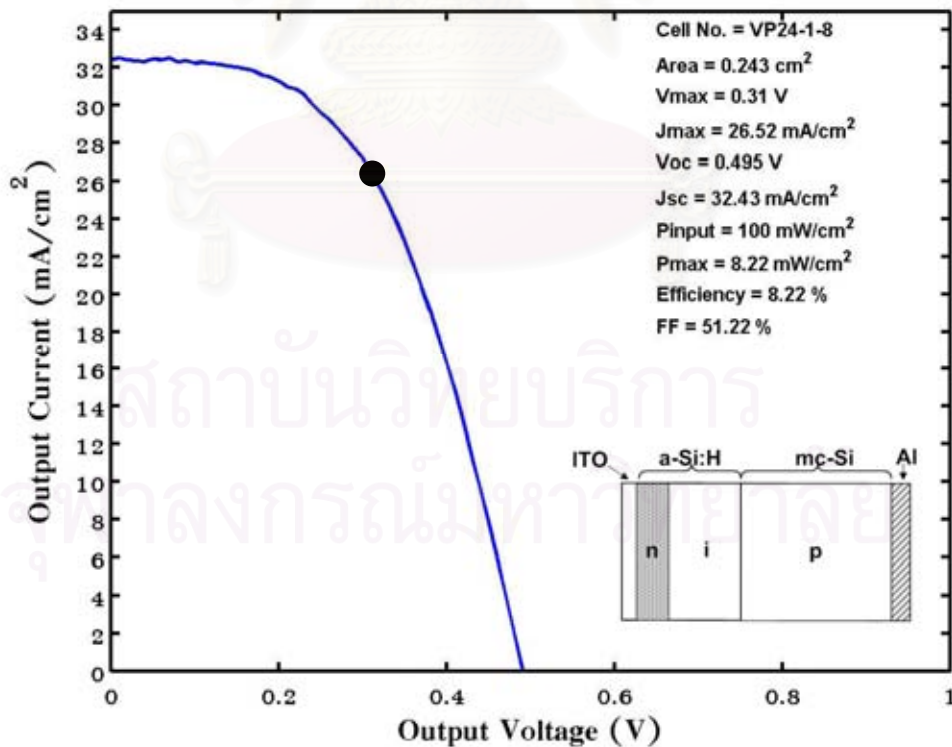
4) ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาของชั้นฟิล์มบาง  $i-a-Si:H$  กราฟที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกันกับกราฟของค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

รูปที่ 5.5 แสดงผลการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีความหนาของชั้นฟิล์มบาง  $i-a-Si:H$  เป็นพารามิเตอร์ จากรูปจะสามารถสังเกตเห็นได้ดังนี้

- 1) เมื่อชั้น  $i-a-Si:H$  บาง พาหะโฟโตส่วนใหญ่จะถูกผลิตในชั้น  $p-mc-Si$  ซึ่งทำให้ยอดของสเปกตรัมอยู่ที่ประมาณ  $1,000 \text{ nm}$
- 2) เมื่อชั้น  $i-a-Si:H$  มีความหนามากขึ้น สเปกตรัมจะเริ่มกว้างขึ้น และจะปรากฏยอดสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นประมาณ  $650-700 \text{ nm}$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ชั้น  $i-a-Si:H$  มีส่วนร่วมในการผลิตพาหะโฟโตเช่นเดียวกับชั้น  $p-mc-Si$



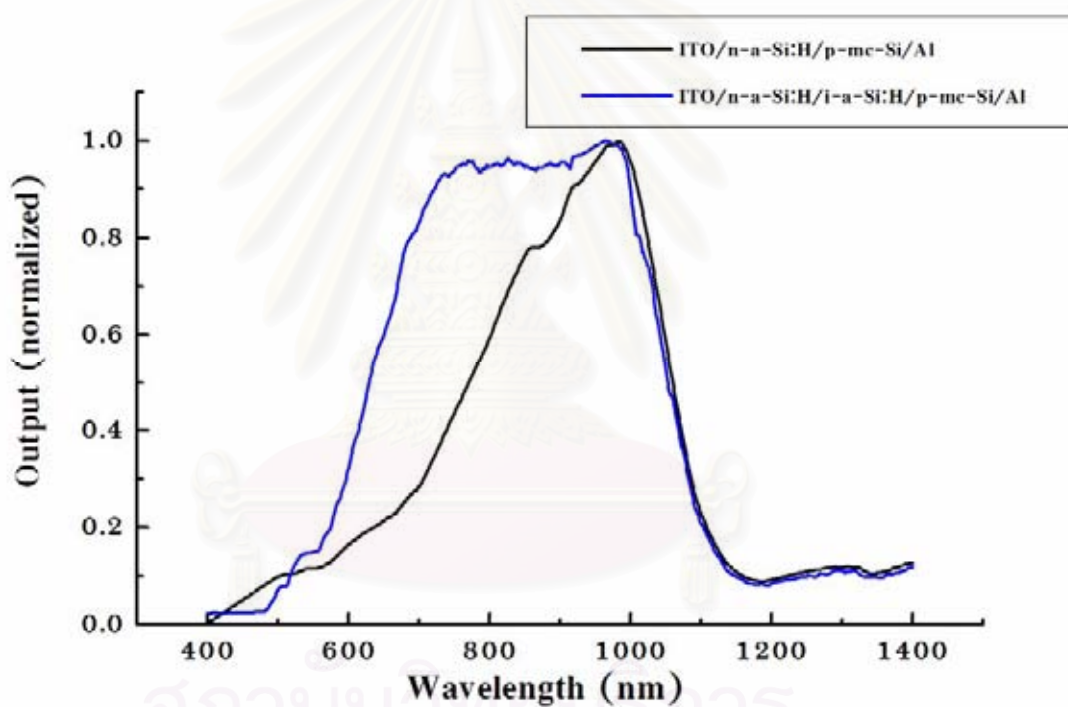
รูปที่ 5.5 สเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความหนาของชั้นฟิล์มบาง i-a-Si:H เท่ากับ 500 Å, 1,000 Å, 2000 Å และ 3,000 Å



รูปที่ 5.6 ตัวอย่างผลการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al ที่ความเข้มแสง AM1

รูปที่ 5.6 แสดงตัวอย่างของผลการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 2 (ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al) โดยวัดที่ความเข้มแสง AM1 พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตวงจรมืด ( $V_{oc}$ ) มีค่าเท่ากับ 0.495 V กระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) มีค่าเท่ากับ  $32.43 \text{ mA/cm}^2$  ประสิทธิภาพที่ได้มีค่าเท่ากับ 8.22 % และฟิลล์แฟกเตอร์มีค่าเท่ากับ 51.22 %

รูปที่ 5.7 แสดงผลการเปรียบเทียบสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 1 และแบบที่ 2 ซึ่งได้แก่ โครงสร้าง ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al และ ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al ตามลำดับ จากรูปพบว่ากรณีเซลล์แบบที่ 2 จะมีความกว้างของสเปกตรัมมากกว่าแบบที่ 1 เนื่องจากเซลล์แบบที่ 2 มีชั้นได้เปรียบที่ชั้นผลิตพาหะโฟโตนันมีทั้งชั้น i-a-Si:H และ p-mc-Si



รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ 2 แบบ คือ โครงสร้าง ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al (กราฟเส้นสีดำ) และ ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al (กราฟเส้นสีน้ำเงิน)

### 5.3 สรุป

ในบทนี้ได้รายงานผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 2 คือ โครงสร้าง ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al พบว่าชั้นผลิตพาหะโฟโตได้แก่ i-a-Si:H และ p-mc-Si จากผลการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการประดิษฐ์ พบว่าความหนาที่เหมาะสมของชั้นฟิล์มบาง i-a-Si:H คือ 2,000 Å ซึ่งได้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 8.22 % และสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แบบที่ 2 นี้กว้างกว่าแบบที่ 1 อย่างเห็นได้ชัดเจน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้รายงานผลการศึกษาคือการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของอะมอร์ฟัสซิลิคอนและมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอน โดยมีผลการทดลองต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ได้กล่าวถึงโครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของอะมอร์ฟัสซิลิคอนและผลึกมัลติคริสตัลไลน์ซิลิคอนทั้งสิ้น 2 แบบด้วยกันคือ

1. โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโร ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al และ
2. โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโร ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al

2. รายงานผลการทดลองปลูกฟิล์มชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงชนิด ITO โดยผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของฟิล์ม ITO ที่ปลูกได้ พบว่าที่อุณหภูมิแผ่นฐานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปลูกฟิล์ม ITO คือ  $250^{\circ}\text{C}$  ซึ่งให้ค่าการทะลุผ่านของแสงสูงที่สุด และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด

3. รายงานผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 1 (ITO/n-a-Si:H/p-mc-Si/Al) ซึ่งพบว่าชั้นที่ผลิตพาหะโฟโตคือ ชั้นของ p-mc-Si และเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการปลูกชั้นฟิล์มบาง n-a-Si:H คือ การปลูกด้วยค่ากำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซเท่ากับ 6 W และความหนาของฟิล์มเท่ากับ  $500 \text{ \AA}$  ซึ่งให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดที่ 6.52 %

4. รายงานผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรแบบที่ 2 คือ โครงสร้าง ITO/n-a-Si:H/i-a-Si:H/p-mc-Si/Al พบว่าชั้นผลิตพาหะโฟโตได้แก่ i-a-Si:H และ p-mc-Si จากผลการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการประดิษฐ์ พบว่าความหนาที่เหมาะสมของชั้นฟิล์มบาง i-a-Si:H คือ  $2,000 \text{ \AA}$  ซึ่งได้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดเท่ากับ 8.22 % และสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แบบที่ 2 นี้กว้างกว่าแบบที่ 1 อย่างเห็นได้ชัดเจน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- [1] ดุสิต เครื่องงาม. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [2] สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว. เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
- [3] ดุสิต เครื่องงาม. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [4] วรยุทธ วรสุบิน. การผลิตขั้วไปรงแสงจากอินเดียมดีบุกออกไซด์และการใช้งานในเซลล์แสงอาทิตย์. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534. (อัดสำเนา)
- [5] บรรยาย โตประเสริฐวงศ์. เทคโนโลยีและฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2527. (อัดสำเนา)
- [6] ดุสิต เครื่องงาม, สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ระยะที่ 1 เรื่อง ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ. กรุงเทพมหานคร: ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535. (อัดสำเนา)
- [7] ดุสิต เครื่องงาม, ชุมพล อันตรเสน, บรรยาย โตประเสริฐวงศ์. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่อง เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน. : ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533. (อัดสำเนา)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้มีการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย แสงอาทิตย์เทียม โดยใช้โปรแกรมภาษา Basic บนเครื่อง NEC ต่อจากนั้น จึงนำ Data ไปคำนวณ ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต และคำนวณหาค่า  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ , FF, Efficiency ตามลำดับ โปรแกรม MATLAB ที่เขียนชื่อ "solarsim" มีรายละเอียดดังนี้

```
disp('Select the command');
disp(' 1. Import Data');
disp(' 2. Plot Graph');
disp(' 3. End');
mode=input('Enter your command : ');
switch mode
case 1
    uiimport;
    wait=input("");
    name=input('Input Sample Number = ','s');
    area=input('Input area : ');
    i=data(1,5)+1;
    V=data(2:i,1);
    I=data(2:i,2);
    P=V.*I;
    Pmax=0;
    for j=1:i-1;
        if P(j)>Pmax;
            Pmax=P(j);
            k=j;
        end
    end
    Vm=V(k);
```



```

Im=I(k);
Isc=I(1);
Voc=(V(i-2)+V(i-1))/2;
ff=Vm*Im*100/Voc/Isc;
eff=Pmax;
run solarsim;

```

case 2

```

disp('Choose number to plot graph');
disp(' 1. I-V Curve');
disp(' 2. P-V Curve');
disp(' 3. I-V Curve and P-V Curve');
gmode=input('Enter number : ');
switch gmode
    case 1
        Vstart=input(' Input Vstart = ');
        Vend=input(' Input Vend = ');
        Istart=input(' Input Istart = ');
        lend=input(' Input lend = ');
        infor=input('Do you want to show the output characteristics? (1:yes,2:no) : ');
        clf;
        plot(V,I,'Linewidth',2);
        axis([Vstart Vend Istart lend]);
        set(gca,'YTick',Istart:2:lend,'LineWidth',2,'fontsize',18,'fontweight','bold',
            'fontname','EucrosiaUPC');
        ylabel('Output Current (mA/cm^2)','fontsize',24,'fontweight','bold','fontname',
            'EucrosiaUPC');
        hold on;
        plot(Vm,Im,'k+');
        if infor==1
            text(Vend-0.35,lend-1,['Cell No. = ',name],'fontweight','bold');
            text(Vend-0.35,lend-1-1*lend/20,['Area = ',num2str(area),' cm^2'],

```

```

        'fontweight','bold');
text(Vend-0.35,lend-1-2*lend/20,['Vmax = ',num2str(Vm),' V'],
    'fontweight','bold');
text(Vend-0.35,lend-1-3*lend/20,['Jmax = ',num2str(Im),' mA/cm^2'],
    'fontweight','bold');
text(Vend-0.35,lend-1-4*lend/20,['Voc = ',num2str(Voc),' V'],
    'fontweight','bold');
text(Vend-0.35,lend-1-5*lend/20,['Jsc = ',num2str(Isc),' mA/cm^2'],
    'fontweight','bold');
text(Vend-0.35,lend-1-6*lend/20,'Pinput = 100 mW/cm^2',
    'fontweight','bold');
text(Vend-0.35,lend-1-7*lend/20,['Pmax=',num2str(Pmax),' mW/cm^2'],
    'fontweight','bold');
text(Vend-0.35,lend-1-8*lend/20,['Efficiency = ',num2str(eff),' %'],
    'fontweight','bold');
text(Vend-0.35,lend-1-9*lend/20,['FF = ',num2str(ff),' %'],'fontweight','bold');
else
    text(Vend-0.35,lend-1,['Cell No. = ',name],'fontweight','bold');
    disp('---Not show the output characteristics.---');
end
xlabel('Output Voltage (V)','fontsize',24,'fontweight','bold','fontname',
    'EucrosiaUPC');
case 2
    Vstart=input(' Input Vstart = ');
    Vend=input(' Input Vend = ');
    Pstart=input(' Input Pstart = ');
    Pend=input(' Input Pend = ');
    infor=input('Do you want to show the output characteristics? (1:yes,2:no) : ');
    clf;
    plot(V,P,'Linewidth',2);
    axis([Vstart Vend Pstart Pend]);

```

```

set(gca,'YTick',Pstart:1:Pend,'LineWidth',2,'fontsize',18,'fontweight','bold',
    'fontname','EucrosiaUPC');
ylabel('Output Power (mW/cm^2)','fontsize',24,'fontweight','bold',
    'fontname','EucrosiaUPC');
hold on;
plot(Vm,Pmax,'ro');
if infor==1
    text(Vend-0.35,Pend-0.5,['Cell No. = ',name],'fontweight','bold');
    text(Vend-0.35,Pend-0.5-1*Pend/20,['Area = ',num2str(area),' cm^2'],
        'fontweight','bold');
    text(Vend-0.35,Pend-0.5-2*Pend/20,['Vmax = ',num2str(Vm),' V'],
        'fontweight','bold');
    text(Vend-0.35,Pend-0.5-3*Pend/20,['Jmax = ',num2str(Im),' mA/cm^2'],
        'fontweight','bold');
    text(Vend-0.35,Pend-0.5-4*Pend/20,['Voc = ',num2str(Voc),' V'],
        'fontweight','bold');
    text(Vend-0.35,Pend-0.5-5*Pend/20,['Jsc = ',num2str(Isc),' mA/cm^2'],
        'fontweight','bold');
    text(Vend-0.35,Pend-0.5-6*Pend/20,'Pinput = 100 mW/cm^2',
        'fontweight','bold');
    text(Vend-0.35,Pend-0.5-7*Pend/20,['Pmax=',num2str(Pmax),'mW/cm^2'],
        'fontweight','bold');
    text(Vend-0.35,Pend-0.5-8*Pend/20,['Efficiency = ',num2str(eff),' %'],
        'fontweight','bold');
    text(Vend-0.35,Pend-0.5-9*Pend/20,['FF = ',num2str(ff),' %'],
        'fontweight','bold');
else
    text(Vend-0.35,Pend-0.5,['Cell No. = ',name],'fontweight','bold');
    disp('---Not show the output characteristics.---');
end
xlabel('Output Voltage (V)','fontsize',24,'fontweight','bold',

```

```

        'fontname','EucrosiaUPC');
case 3
Vstart=input(' Input Vstart = ');
Vend=input(' Input Vend = ');
Istart=input(' Input Istart = ');
lend=input(' Input lend = ');
Pstart=input(' Input Pstart = ');
Pend=input(' Input Pend = ');
infor=input('Do you want to show the output characteristics? (1:yes,2:no) : ');
clf;
[haxes,hline1,hline2]=plotyy(V,I,V,P);
axes(haxes(1));
set(hline1,'LineWidth',2);
axis([Vstart Vend Istart lend]);
box off;
set(gca,'YTick',Istart:2:lend,'LineWidth',2,'fontsize',18,'fontweight','bold',
    'fontname','EucrosiaUPC');
ylabel('Output Current (mA/cm^2)','fontsize',24,'fontweight','bold',
    'fontname','EucrosiaUPC');
hold on;
plot(Vm,Im,'k+');
if infor==1
    text(Vend-0.35,lend-1,['Cell No. = ',name],'fontweight','bold');
    text(Vend-0.35,lend-1-1*lend/20,['Area = ',num2str(area),' cm^2'],
        'fontweight','bold');
    text(Vend-0.35,lend-1-2*lend/20,['Vmax = ',num2str(Vm),' V'],
        'fontweight','bold');
    text(Vend-0.35,lend-1-3*lend/20,['Jmax = ',num2str(Im),' mA/cm^2'],
        'fontweight','bold');
    text(Vend-0.35,lend-1-4*lend/20,['Voc = ',num2str(Voc),' V'],
        'fontweight','bold');

```

```

text(Vend-0.35,lend-1-5*lend/20,['Jsc = ',num2str(Isc),' mA/cm ^2'],
     'fontweight','bold');
text(Vend-0.35,lend-1-6*lend/20,'Pinput = 100 mW/cm ^2',
     'fontweight','bold');
text(Vend-0.35,lend-1-7*lend/20,['Pmax=',num2str(Pmax),' mW/cm ^2'],
     'fontweight','bold');
text(Vend-0.35,lend-1-8*lend/20,['Efficiency = ',num2str(eff),' %'],
     'fontweight','bold');
text(Vend-0.35,lend-1-9*lend/20,['FF = ',num2str(ff),' %'],'fontweight','bold');
else
    text(Vend-0.35,lend-1,['Cell No. = ',name],'fontweight','bold');
    disp('---Not show the output characteristics.---');
end
hold off;
axes(haxes(2));
axis([Vstart Vend Pstart Pend]);
set(gca,'YTick',Pstart:1:Pend,'LineWidth',2,'fontsize',18,'fontweight','bold',
     'fontname','EucrosiaUPC');
hold on;
ylabel('Output Power (mW/cm ^2)','fontsize',24,'fontweight','bold',
     'fontname','EucrosiaUPC');
plot(Vm,Pmax,'ro');
set(hline2,'LineStyle','--','LineWidth',2);
xlabel('Output Voltage (V)','fontsize',24,'fontweight','bold',
     'fontname','EucrosiaUPC');
hold off;

end

run solarsim;

case 3
    disp('END PROGRAM');

otherwise

```

```
disp('Wrong command!');  
run solarsim;  
end
```



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติของผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววิภากร จีวะสุวรรณ เกิดเมื่อวันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2524 ที่ตำบลทะเลชุบศร อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2544 ต่อจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีพ.ศ. 2545



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย