

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยกระจกเคลือบ ZnO:B เพื่อใช้เป็นขั้วโลหะโปร่งแสงนำไฟฟ้าโดยวิธี MOCVD นี้ จะเคลือบลงบนกระจกโซดาแลม (Na_L) โดยใช้แหล่งจ่ายสารตั้งต้นเป็นไดเอทิลซิงค์ (Diethylzinc:DEZ) และ น้ำ (H_2O) โดยมีก๊าซอาร์กอน (Ar) เป็นพาหะ มีก๊าซโบโรเรน (B_2H_6) ทำหน้าที่เป็นสารเจือ ทำปฏิกิริยาทางความร้อน ในสภาวะสุญญากาศ ได้ทำการทดลอง ณ สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (Solartec) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

3.1 การเตรียมเครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

3.1.1 ระบบ Multi-chamber

ระบบ Multi-chamber ของบริษัท MVsystem เป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย chamber สุญญากาศขนาดใหญ่ตรงกลาง 1 chamber และมี chamber เล็กจำนวน 8 chamber ล้อมรอบ ดังภาพที่ 3.1 โดยทั้งหมดทำมาจากวัสดุ stainless steel type 304 แต่ละ chamber จะมีปั๊มสุญญากาศต่อแยกอิสระกัน เพื่อปรับความดันให้เป็นสุญญากาศระดับ 10^{-4} มิลลิทอร์มในทุก chamber สำหรับหน้าที่ของแต่ละ chamber อธิบายได้ดังนี้

1. Isolation Transfer Zone หรือ ITZ เป็น chamber ขนาดใหญ่อยู่ตรงกลาง ภายใน ITZ มีแขนกล (robotic arm) สำหรับเคลื่อนย้ายแผ่นฐานรองระหว่าง chamber ต่างๆ
2. chamber ที่ 1 หรือ Load lock จะมีหน้าที่นำแผ่นฐานรองเข้าไปเคลือบฟิล์มและออกจากเครื่องหลังจากเคลือบฟิล์มเสร็จแล้ว
3. chamber ที่ 2 หรือ PL2 เป็น chamber ที่ใช้เคลือบฟิล์มโลหะเงิน (Silver:Ag) เพื่อใช้ทำขั้วด้านบนสุด ในการดึงกระแสไฟฟ้าไปใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ ใช้เทคนิคการเคลือบที่เรียกว่า Magnetron Sputtering
4. chamber ที่ 3 หรือ PL3 แต่เดิมใช้เทคนิค Magnetron sputtering ในการเคลือบ ZnO แต่ได้ปรับปรุงเพื่อใช้ในการทดลองเคลือบฟิล์ม ZnO:B ด้วยวิธี MOCVD

5. chamber ที่ 4 หรือ PL4 ใช้เคลือบฟิล์มสารกึ่งตัวนำชนิด n ด้วยวิธี PECVD ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

6. chamber ที่ 5 หรือ PL5 ใช้เคลือบฟิล์มสารกึ่งตัวนำชนิด i ด้วยวิธี PECVD ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

7. chamber ที่ 6 หรือ PL6 ใช้เคลือบฟิล์มสารกึ่งตัวนำชนิด i ด้วยวิธี PECVD ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

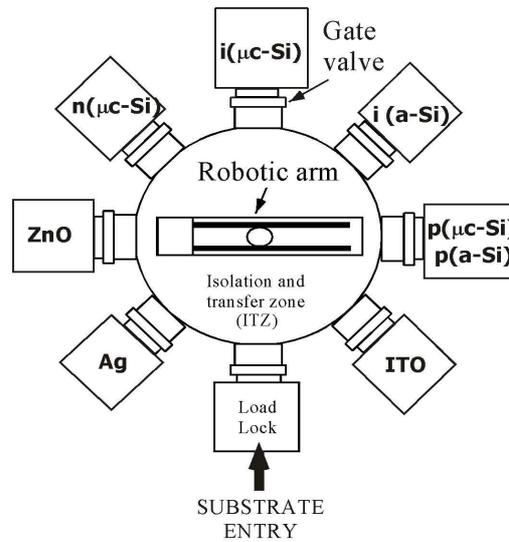
8. chamber ที่ 7 หรือ PL7 ใช้เคลือบฟิล์มสารกึ่งตัวนำชนิด p ด้วยวิธี PECVD ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

9. chamber ที่ 8 หรือ PL8 เป็น chamber ที่ใช้เคลือบฟิล์มโลหะ Indium Tin oxide (ITO) ด้วยวิธี Magnetron Sputtering ซึ่งในการทดลองนี้ไม่ได้ใช้

ตารางที่ 3.1

สรุปรายละเอียด chamber ต่างๆ ของเครื่องจักร Multi-chamber

ประเภท chamber	หน้าที่	(กว้างxยาวxสูง) cm ³	ก๊าซที่ใช้
1.Load Lock chamber	นำแผ่นฐานรองเข้าและออก	40x50x20	N ₂
2.Sputtering chamber	เคลือบฟิล์มโลหะ Ag	50x60x40	Ar
3.MOCVD chamber	เคลือบฟิล์มโลหะ ZnO	40x50x30	Ar,B ₂ H ₆
4.PECVD chamber	เคลือบฟิล์มชั้น n	40x50x30	SiH ₄ ,H ₂ ,PH ₃ ,CO ₂
5.PECVD chamber	เคลือบฟิล์มชั้น i	40x50x30	SiH ₄ ,H ₂
6.PECVD chamber	เคลือบฟิล์มชั้น i	40x50x30	SiH ₄ ,H ₂
7.PECVD chamber	เคลือบฟิล์มชั้น p	40x50x30	SiH ₄ ,H ₂ ,TMB,CO ₂
8.Sputtering chamber	เคลือบฟิล์มโลหะ ITO	50x60x40	Ar



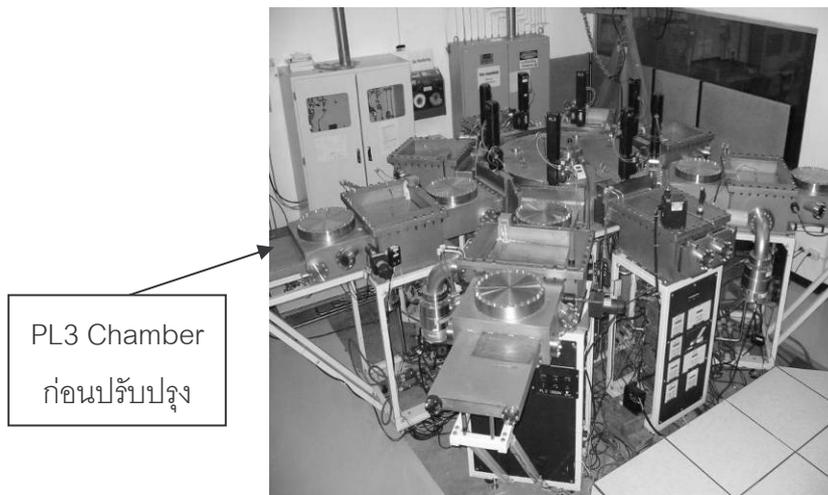
ภาพที่ 3.1

เครื่องจักรที่ใช้ในการเคลือบฟิล์ม ZnO และสร้างเซลล์แสงอาทิตย์
(ที่มา: สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC))

3.1.2 ระบบ MOCVD

Chamber สูญญากาศ

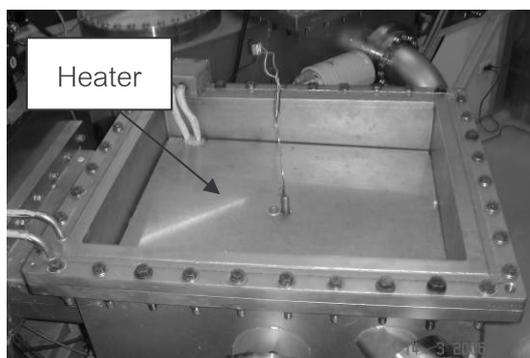
Chamber สูญญากาศของระบบ MOCVD ได้ปรับปรุงจาก chamber ที่ 3 (ภาพที่ 3.2) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบ Multi-chamber เพื่อใช้สำหรับเคลือบฟิล์ม ZnO:B โดยเริ่มจากการปรับปรุง chamber ซึ่งเดิมจะเป็นแบบ sputtering chamber แล้วถอด chamber ตรงส่วนหน้าแปลนที่ติดกับ ITZ chamber ออกเพื่อสร้าง chamber ขึ้นใหม่มีขนาดเท่ากับ PECVD chamber แล้วนำมาต่อเข้ากับ ITZ chamber



ภาพที่ 3.2

ภาพ PL3 Chamber ก่อนที่จะปรับปรุง
(ที่มา: สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC))

chamber ของระบบ MOCVD ทำมาจากวัสดุแผ่น stainless steel 304 หนา 10 มิลลิเมตร เชื่อมเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมมีขนาดประมาณ กว้าง 40 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร ด้านบนของมี Heater เพื่อให้ความร้อนกับฐานรอง(ภาพที่ 3.3 ก.)



(ก)

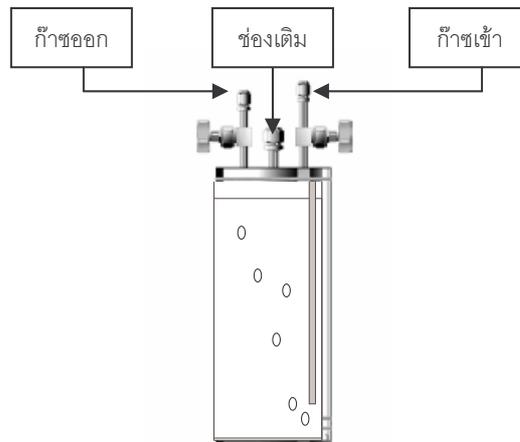


(ข)

ภาพที่ 3.3

ส่วนประกอบของ Chamber สูญญากาศ (ก) ฮีตเตอร์ (ข) วาล์วควบคุมความดัน
(ที่มา: สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC))

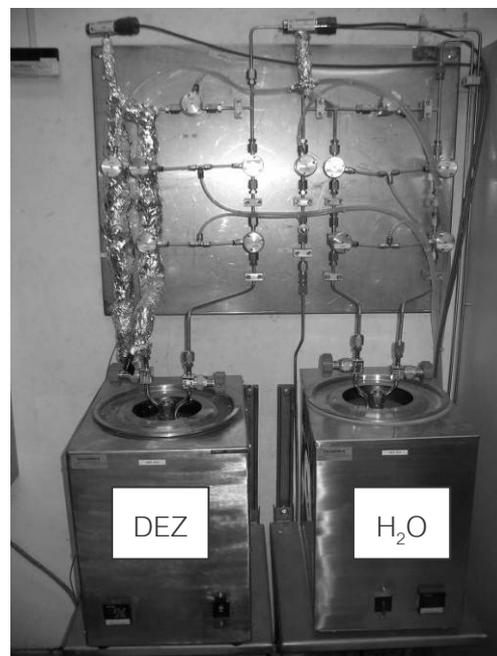
chamber จะถูกดูดอากาศออกให้เป็นสูญญากาศ ผ่านวาล์วควบคุมความดัน (throttle valve) (ภาพที่ 3.3 ข) ด้วยปั๊มสูญญากาศชนิด booster pump ต่อกับ rotary pump (ภาพที่ 3.4)



ภาพที่ 3.5

ถัง Bubbler สำหรับบรรจุ น้ำ และ DEZ

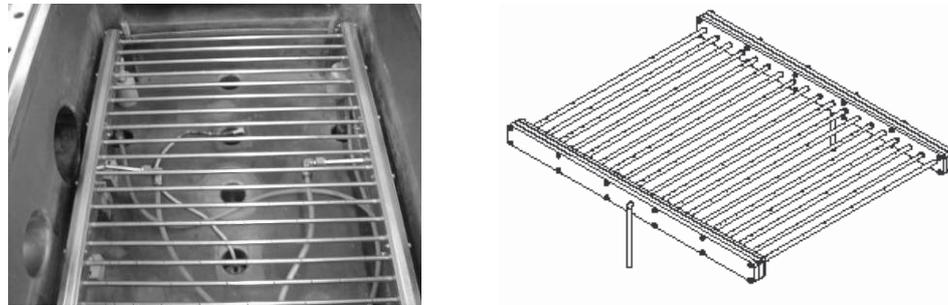
การทำให้ น้ำและ DEZ กลายเป็นไอจะใช้อ่างทำน้ำร้อน (ภาพที่ 3.6) ซึ่งมีลักษณะเป็นถังสเตนเลส รูปทรงสี่เหลี่ยม ตรงกลางมีถังทรงกระบอกที่มีขนาดใหญ่กว่าถัง Bubbler เล็กน้อย ใต้น้ำเข้าไป เครื่องจะให้น้ำร้อนและหมุนวนอยู่รอบๆถัง Bubbler



ภาพที่ 3.6

อ่างทำน้ำร้อนสำหรับให้ความร้อนกับ Bubble ของ DEZ และ H₂O
(ที่มา: สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC))

หลังจากก๊าซ Ar พาไอของน้ำ และไอของ DEZ ออกมาจาก Bubbler ผ่านตามท่อ ก๊าซแยกกัน โดยท่อก๊าซของ DEZ จะมีการผสมสารเจือ B_2H_6 ก่อนเข้าสู่ตัวกระจายก๊าซ (diffuser) ภายใน chamber (ภาพที่ 3.7)

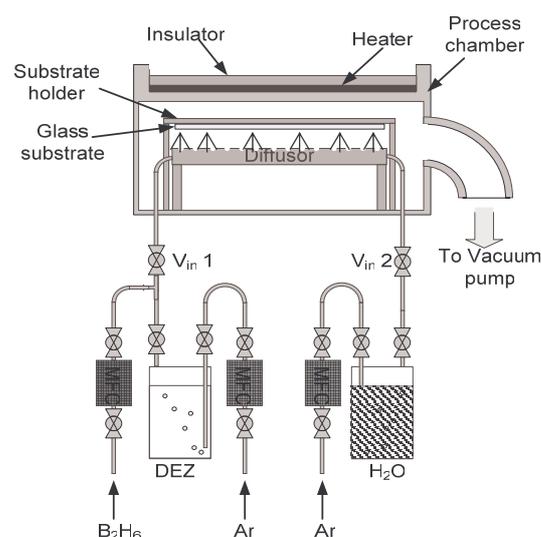


ภาพที่ 3.7

ตัวกระจายก๊าซ Diffuser ภายใน chamber

(ที่มา: สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC))

สำหรับตัว Diffuser ทำหน้าที่กระจายก๊าซภายใน chamber มีสองชุด แต่ละชุดมี ลักษณะเป็นท่อปลายปิดเจาะรูจำนวน 9 ท่อ วางสลับกัน เพื่อให้ก๊าซกระจายตัวออกมาได้ดี ชุดท่อส่วนแรกมาจากก๊าซอาร์กอนที่เป็นพาหะพาไอของ DEZ ที่ผสมกับ ก๊าซไดโบเรน ชุดท่อ ส่วนที่สองเป็นก๊าซอาร์กอนที่เป็นพาหะพาไอของน้ำ มารวมกันทำปฏิกิริยาทางความร้อนเกิดเป็น ฟิล์ม ZnO:B บนกระจก สำหรับการเคลือบฟิล์มของเครื่องจักรนี้ จะเคลือบด้านล่างของกระจก (ดูครในภาพที่ 3.8)



ภาพที่ 3.8

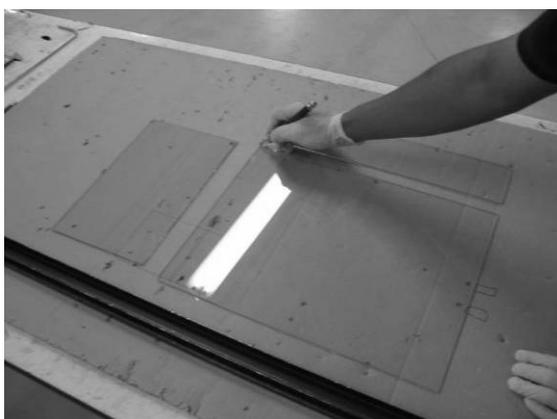
การเคลือบฟิล์มด้านล่างของกระจกจากไอของ DEZ และ H_2O ที่ออกจาก Diffuser

3.1.3 การเตรียมกระจกฐานรองสำหรับการทดลองเคลือบฟิล์ม ZnO:B

กระจกฐานรองที่ใช้ในการทดลองเป็นกระจกโชดาลาม มีความโปร่งแสง ผิวเรียบ ใช้เป็นฐานรองในการเคลือบฟิล์ม ZnO:B

ขั้นตอนการเตรียมกระจก

1. นำกระจกโชดาลามหนา 4 มิลลิเมตร มาตัดให้มีขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร ด้วยมีดตัดกระจก (ภาพที่ 3.9)



ภาพที่ 3.9

ภาพการตัดกระจกด้วยมีดตัดกระจก

(ที่มา: สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC))

2. นำกระจกที่ตัดเสร็จแล้วไปลบคมบริเวณขอบทั้งสี่ด้านด้วยเครื่องลบคมกระจก (ภาพที่ 3.10)



ภาพที่ 3.10

ภาพการลบคมขอบกระจก

(ที่มา: สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC))

3. ทำความสะอาดกระจกด้วยเครื่องล้างกระจก ซึ่งขั้นตอนการล้างของเครื่อง จะล้างด้วยน้ำธรรมดา ก่อนเพื่อชำระฝุ่นละอองและสิ่งสกปรกออก แล้วใช้น้ำ DI ล้างซ้ำอีกรอบ เพื่อไม่ให้มีประจุไฟฟ้าตกค้างบนกระจก เสร็จแล้วใช้ลมเป่าให้แห้ง ขั้นตอนสุดท้ายจะมีตัวดึงประจุไฟฟ้า (electro discharge bar) ป้องกันประจุไฟฟ้าตกค้าง (ภาพที่ 3.11)



ภาพที่ 3.11

ภาพการล้างกระจกด้วยเครื่องล้างกระจก
(ที่มา: สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC))

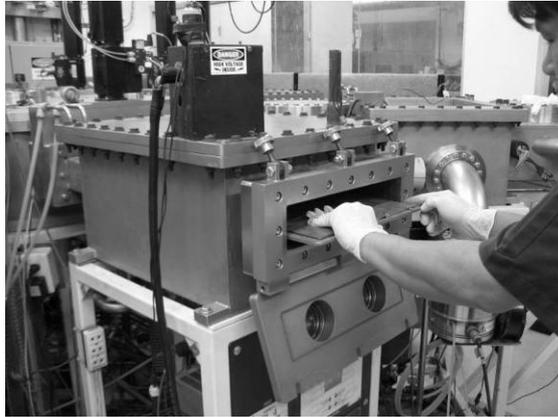
4. นำกระจกใสที่ได้มาใส่ลงใน กรอบสแตนเลส (ภาพที่ 3.12) แล้วนำเข้าตู้อบ อบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที เพื่อลดความเครียดของกระจกก่อนนำไปเคลือบฟิล์ม ZnO



ภาพที่ 3.12

ภาพการใส่กระจกลงในกรอบสแตนเลส
(ที่มา: สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC))

5. นำกระจกที่ได้จากข้อ 4 เข้าเครื่อง Multi-chamber โดยผ่านทาง Load lock chamber เพื่อปรับความดันให้เป็นสุญญากาศแสดงดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13

ภาพการนำกระจกเข้า Load lock

(ที่มา: สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC))



ภาพที่ 3.14

สรุปขั้นตอนการเตรียมกระจกฐานรอง

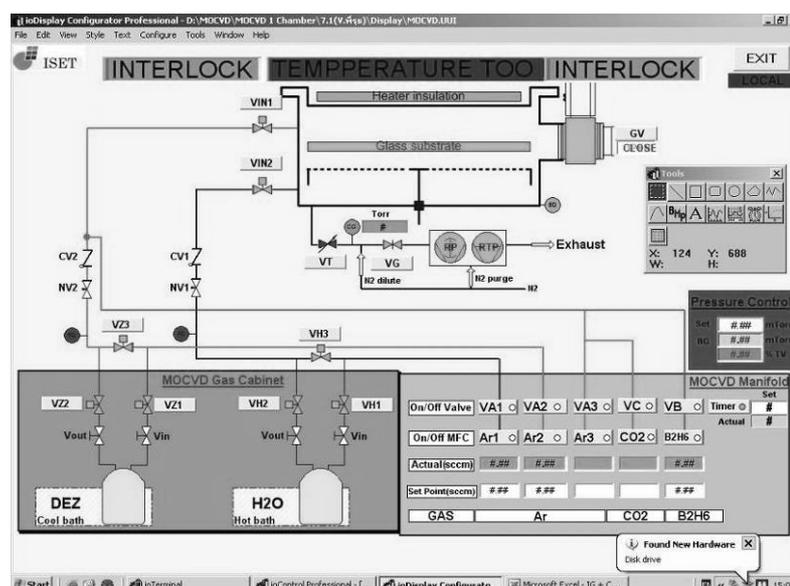
3.1.4 การเตรียมกระจกนำไฟฟ้าเพื่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

กระจกนำไฟฟ้าที่เตรียมสำหรับนำไปสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ จะใช้กระจก $\text{SnO}_2:\text{F}$ และ กระจกเคลือบ $\text{ZnO}:\text{B}$ ที่เลือกจากการทดลอง โดยตัดกระจกทั้งสองชนิดให้มีขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร ทำความสะอาดเศษกระจกที่เกิดจากการตัด โดยการเป่าด้วยลมแห้ง แล้วนำไปใส่กรอบเสตนเลส ที่มีหน้ากาก (mask) ซึ่งเป็นช่องสี่เหลี่ยมมีพื้นที่ 0.75 ตารางเซนติเมตร จำนวน 12 ช่อง เพื่อนำไปเข้าเครื่อง Multi-chamber โดยผ่าน Load lock chamber ปรับความดันที่ระดับ 10^{-4} มิลลิทอร์ แล้ว จึงใช้แขนของ ITZ พากระจกเข้าสู่แต่ละ chamber ที่ใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์

3.2 ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการเคลือบฟิล์ม ZnO

1. ปรับอุณหภูมิ chamber ตามที่ต้องการทดลอง เพื่อให้ความร้อนกับฐานรอง รอกจนอุณหภูมิคงที่
2. ใส่กระจกที่เตรียมใน Load lock ปรับความดันให้เป็นสุญญากาศจนถึงระดับ 10^{-4} มิลลิทอร์ จากนั้นใช้แขนของ ITZ พากระจกเข้าสู่ PL3 ที่ใช้เคลือบฟิล์ม ZnO



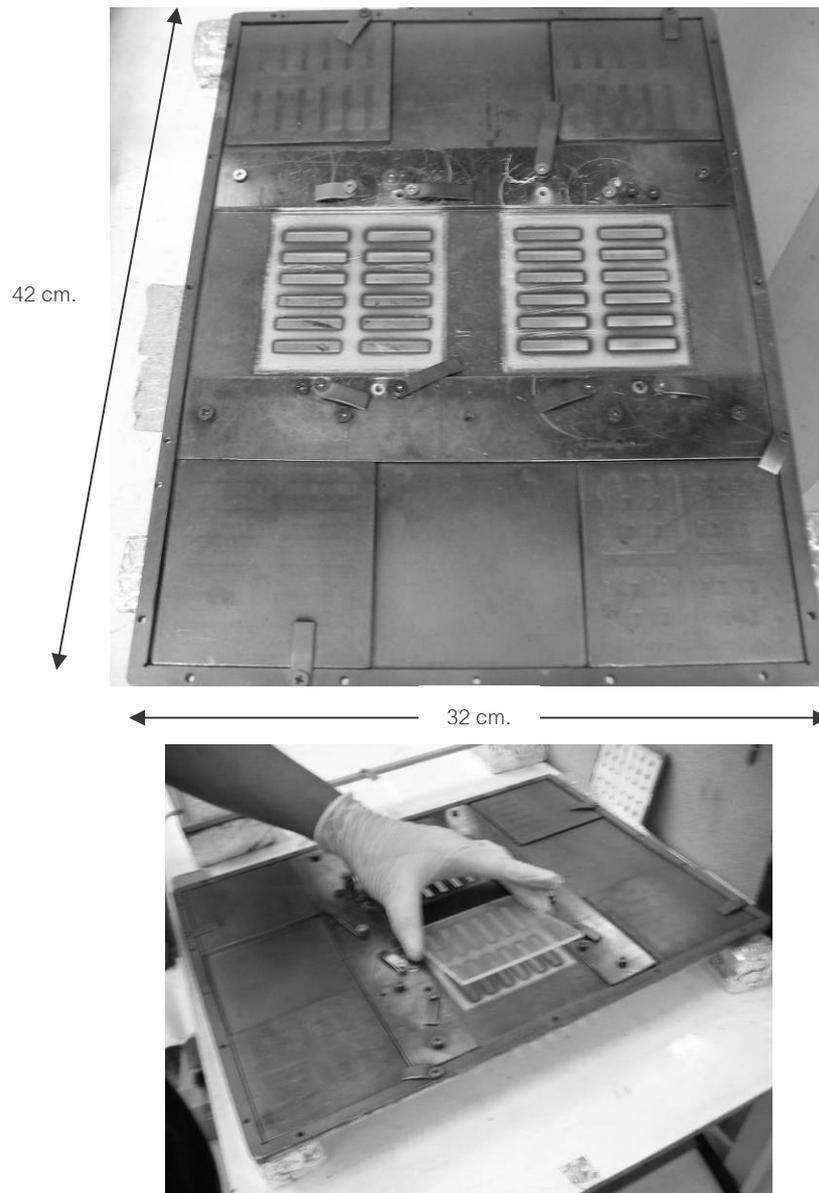
ภาพที่ 3.15

โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่อง MOCVD
(ที่มา: สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC))

3. กำหนดอัตราการไหลในโปรแกรมควบคุม (ภาพที่ 3.15) ของก๊าซทั้ง 3 ท่อ ได้แก่ Ar ของ H_2O , Ar ของ DEZ, B_2H_6 แล้วเปิดวาล์ว VA1 กับ VH3 และ VA2 กับ VZ3 เพื่อปล่อยก๊าซ Ar ทั้งท่อ H_2O และท่อ DEZ ตามลำดับแล้วทำการกักความดัน
4. เมื่อความดันในท่อทั้งสอง ถึงความดัน 1 ทอร์ จึงปิดวาล์ว VH3 กับ VZ3 จากนั้นเปิดวาล์ว VH1 พร้อมกับ VH2 และ VZ1 พร้อมกับ VZ2 เพื่อให้ก๊าซผ่านเข้าไปใน bubbler
5. เปิดวาล์ว VB เพื่อให้ก๊าซ B_2H_6 ไหลไปรวมกับ ไอของ DEZ ที่ออกมาจาก Bubbler แล้วจึงเปิดวาล์ว VIN1 และ VIN2 ของ H_2O และ DEZ เพื่อให้ก๊าซไหลเข้า chamber
6. ปรับความดันใน chamber เป็น 300 มิลลิทอร์ เมื่อความดันได้จึงเริ่มจับเวลา 15 นาที
7. เมื่อครบกำหนด 15 นาทีแล้ว ทำการปิดวาล์ว VB, VA1, VA2 ของ B_2H_6 , H_2O และ DEZ จากนั้นจึงปิดวาล์ว VH1 พร้อมกับ VH2 และ VZ1 พร้อมกับ VZ2 ของ bubbler ของท่อ น้ำและ DEZ แล้วจึงเปิด VH3 กับ VZ3 เพื่อ by pass จากนั้นให้เปิดวาล์วควบคุมความดันของ chamber รอสักพักเพื่อไล่ก๊าซต่างๆจากท่อและ chamber
8. นำแผ่นออกจาก PL3 ไปไว้ Load lock
9. ปรับความดันที่ Load lock ให้เป็นความดันบรรยากาศแล้วจึงนำแผ่นออกมา

ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

1. นำกระจกเคลือบ ZnO:B ที่เลือกได้จากการทดลอง ไปตัดให้มีขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตร แล้วนำไปวางบนกรอบสแตนเลส ที่มีหน้ากาก (mask) เป็นช่องสี่เหลี่ยมจำนวน 12 ช่อง ขนาดของช่องกว้าง 0.6 เซนติเมตร ยาว 3.5 เซนติเมตร ดังภาพที่ 3.16
2. นำชุดกรอบสแตนเลสที่ใส่กระจก (substrate) แล้ว ไปเข้าเครื่อง Multi-chamber โดยผ่าน Load lock chamber ปรับความดันที่ระดับ 10^{-4} มิลลิทอร์
3. เมื่อความดันได้ตามระดับที่กำหนด ใช้แขนของ ITZ พา substrate เข้าสู่ PL7 chamber ทำการสร้างฟิล์มชั้น p ด้วยวิธี PECVD
4. เมื่อสร้างฟิล์ม p เสร็จแล้วนำ substrate ออกจาก PL7 chamber นำไปยัง PL6 chamber เพื่อทำการสร้างฟิล์มชั้น i ด้วยวิธี PECVD
5. เมื่อสร้างฟิล์ม i เสร็จแล้ว นำ substrate ออกจาก PL6 chamber นำไปยัง PL4 chamber เพื่อทำการสร้างฟิล์มชั้น n ด้วยวิธี PECVD



ภาพที่ 3.16

ภาพถ่ายหน้ากาก (mask) และการวางกระจก TCO ขนาด $10 \times 10 \text{ cm}^2$

สำหรับใช้เคลือบชั้น p-i-n-Ag ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

(ที่มา: สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC))

6. เมื่อสร้างฟิล์ม n เสร็จแล้ว นำ substrate ออกจาก PL4 chamber นำไปยัง PL2 chamber เพื่อทำการเคลือบโลหะเงิน ด้วยวิธี Sputtering ใช้เป็นขั้วด้านหลัง เป็นชั้นสุดท้าย (เงื่อนไขการเคลือบฟิล์มตามตารางที่ 3.2)

ตารางที่ 3.2

เงื่อนไขการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้เปรียบเทียบระหว่าง ZnO:B กับ SnO₂:F

ชั้น	ก๊าซวัตถุดิบ	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (Torr)	เวลา (sec.)	กระบวนการ
p -mc:SiO	SiH ₄ = 2.8 sccm. H ₂ = 300 sccm. TMB = 37.5 sccm. CO ₂ = 1.1 sccm.	180 °C	500	300	PECVD
i -(a:Si)	SiH ₄ = 20 sccm. H ₂ = 40 sccm.	180 °C	500	940	PECVD
n -mc:SiO	SiH ₄ = 4 sccm. H ₂ = 150 sccm. PH ₃ = 28 sccm. CO ₂ = 0.9 sccm.	180 °C	500	420	PECVD
ขั้ว Ag	Ar = 15 sccm.	30 °C	300	630	Sputtering

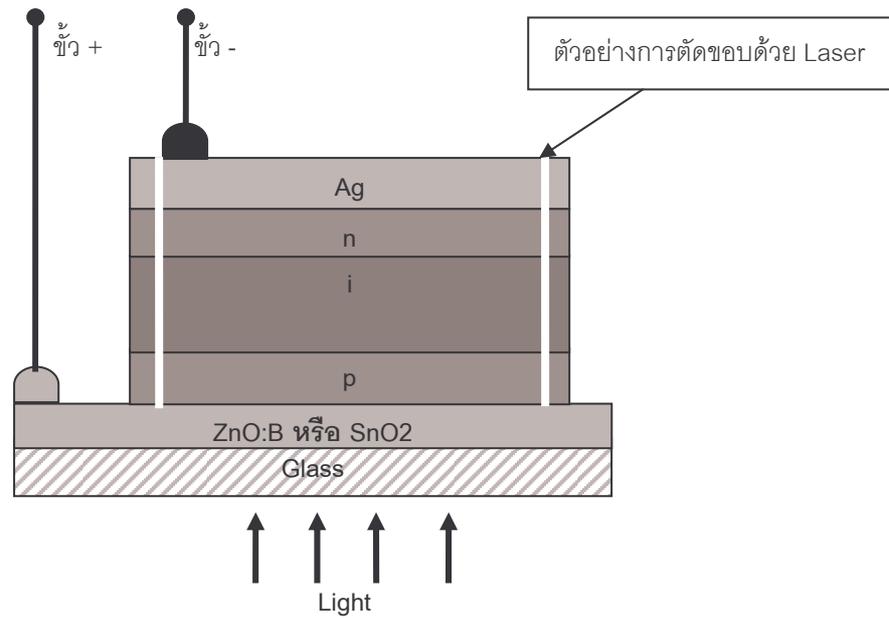
7. นำ substrate ที่สร้างเซลล์แสงอาทิตย์เสร็จ เข้าสู่ Load lock chamber ปรับความดันให้เท่ากับความดันบรรยากาศ นำแผ่นออกจากเครื่อง Multi-chamber

8. บนกระจกขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตร จะได้เซลล์แสงอาทิตย์จำนวน 12 เซลล์ นำกระจกไปตัดขอบทั้งสี่ด้านของเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด กว้าง 0.25 เซนติเมตร ยาว 3 เซนติเมตร ซึ่งจะได้พื้นที่ 0.75 ตารางเซนติเมตร ด้วยเครื่องเลเซอร์ทุกเซลล์ เพื่อป้องกันการลัดวงจร จากขั้วโลหะเงิน กับ สฐานรองกระจกนำไฟฟ้า (ภาพที่ 3.17 - 3.18)

9. นำเซลล์แสงอาทิตย์ไปวัดคุณสมบัติดังกล่าวมาข้างต้น

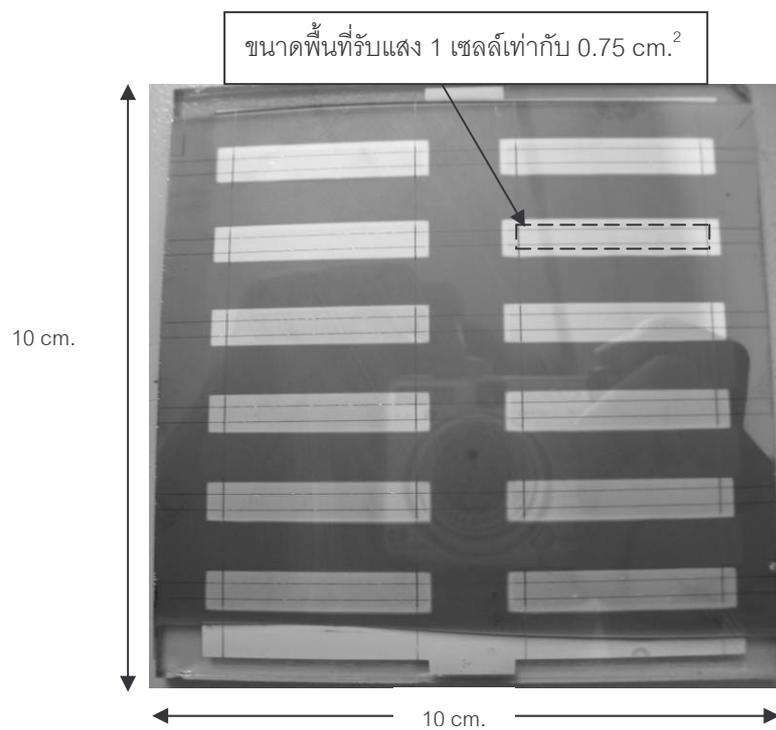
10. สร้างเซลล์แสงอาทิตย์บนกระจก SnO₂:F ตามขั้นตอนข้อที่ 1 ถึง 9 ตามลำดับ

11. บันทึกผล



ภาพที่ 3.17

ชั้นต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์และการตัดขอบเซลล์ด้วย Laser



ภาพที่ 3.18

ภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการทดลอง

(ที่มา: สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC))

3.3 การออกแบบการทดลอง

1. ศึกษาคุณสมบัติของกระจก SnO₂:F จากบริษัท NSG
 - โครงสร้างของผลึก ด้วยเครื่อง SEM
 - ความหนา (thickness)
 - ความขรุขระ (roughness)
 - ความต้านทานแผ่น (sheet resistance) หาค่าความต้านทานไฟฟ้า (resistivity)
 - การส่งผ่านแสงรวมและกระจาย (%Total and Diffuse transmittance) หาค่าความขุ่นมัว (%haze)
2. การทดลองที่ 1 ศึกษาผลกระทบของปริมาณสารเจือ B₂H₆ ในการเคลือบฟิล์ม ZnO:B บนกระจก ที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางแสง และลักษณะพื้นผิวของผลึก
 - 2.1 กำหนดตัวแปรควบคุม ได้แก่
 - เวลาในการเคลือบฟิล์ม 15 นาที
 - ปริมาณ DEZ 50 sccm ปริมาณ H₂O 80 sccm
 - อุณหภูมิการเคลือบ 180°C
 - 2.2 กำหนดตัวแปรตาม ได้แก่
 - ปริมาณสารเจือ B₂H₆ 0 sccm
 - ปริมาณสารเจือ B₂H₆ 5 sccm
 - ปริมาณสารเจือ B₂H₆ 10 sccm
 - ปริมาณสารเจือ B₂H₆ 15 sccm
 - ปริมาณสารเจือ B₂H₆ 20 sccm
 - 2.3 นำชิ้นงานที่ได้จากการทดลองไปวัดคุณสมบัติของฟิล์ม ได้แก่
 - โครงสร้างของผลึก ด้วยเครื่อง SEM และ เครื่อง XRD
 - ความหนา (thickness) หาอัตราการเกิดฟิล์ม (Deposition rate)
 - ความขรุขระ (roughness)
 - ความต้านทานแผ่น (sheet resistance) หาค่าความต้านทานไฟฟ้า (resistivity)
 - การส่งผ่านแสงรวมและกระจาย (%Total and Diffuse transmittance) หาค่าความขุ่นมัว (%haze)
 - 2.4 วิเคราะห์และสรุปปริมาณสารเจือที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์ม ZnO แล้วกำหนดปริมาณสารเจือดังกล่าวที่ได้ เป็นตัวแปรควบคุมในการทดลองที่ 2

3. การทดลองที่ 2 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในการเคลือบฟิล์ม ZnO:B บนกระจก ที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางแสง และลักษณะพื้นผิวของผลึก

2.1 กำหนดตัวแปรควบคุม ได้แก่

- เวลาในการเคลือบฟิล์ม 15 นาที
- ปริมาณ DEZ 50 sccm ปริมาณ H₂O 80 sccm
- ปริมาณ B₂H₆ ที่ได้จากการทดลองที่ 1

2.2 กำหนดตัวแปรตาม ได้แก่

- อุณหภูมิการเคลือบ 100°C
- อุณหภูมิการเคลือบ 150°C
- อุณหภูมิการเคลือบ 160°C
- อุณหภูมิการเคลือบ 180°C
- อุณหภูมิการเคลือบ 200°C

2.3 นำชิ้นงานที่ได้จากการทดลองไปวัดคุณสมบัติของฟิล์ม ได้แก่

- โครงสร้างของผลึก ด้วยเครื่อง SEM และ เครื่อง XRD
- ความหนา (thickness) หาอัตราการเกิดฟิล์ม (Deposition rate)
- ความขรุขระ (roughness)
- ความต้านทานแผ่น (sheet resistance) หาความต้านทานไฟฟ้า (resistivity)
- การส่งผ่านแสงรวมและกระจาย (%Total and Diffuse transmittance) หาค่าความขุ่นมัว (%haze)

2.4 วิเคราะห์และสรุปอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเคลือบฟิล์ม Zn:B บนกระจก

4. นำผลการศึกษาคุณสมบัติของกระจก SnO₂:F มาเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของกระจกเคลือบ ZnO:B ที่ได้เงื่อนไขจากการทดลองที่ 1 และ 2

5. เลือกกระจกเคลือบฟิล์ม ZnO:B ที่มีเงื่อนไขเหมาะสมไปใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างบนกระจก SnO₂:F ด้วยเครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (Sun Simulator) ค่าพารามิเตอร์ประกอบด้วย

- แรงดันไฟฟ้าเปิด (V_{oc})
- กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc})
- ฟิลด์แฟกเตอร์ (FF)
- ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (Eff)

3.4 การวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์ม

ในการวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์ม ZnO ของงานวิจัยนี้ จะทำการวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางแสงของฟิล์ม เพราะเป็นสมบัติพื้นฐานที่ต้องทำการวิเคราะห์สำหรับนำไปใช้เป็นขั้วโลหะโปร่งแสงนำไฟฟ้า ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ต่อจากนั้นจะทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางโครงสร้าง เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางแสง หลังจากนั้นจะนำเงื่อนไขการเคลือบฟิล์ม ZnO ที่ได้ ไปสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วนำไปวัดประสิทธิภาพ

3.4.1 การวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสง

การศึกษาคุณสมบัติทางแสงในงานวิจัยนี้ วัดค่าการส่งผ่านแสงรวม (%Total transmittance) และวัดค่าการส่งผ่านแสงกระจาย (%diffuse transmittance) เพื่อนำมาหาค่าความขุ่นมัว (%Haze) โดยใช้เครื่อง UV/Visible Spectrometer with integrating sphere รุ่น Lamda 35 Perkin Elmer โดยวัดความยาวคลื่นในช่วง 380 – 980 นาโนเมตร ของสถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)



ภาพที่ 3.19

เครื่อง UV/Visible Spectrometer with integrating sphere
(ที่มา: สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC))

สำหรับกระจก TCO ที่ใช้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์จะพิจารณาคุณสมบัติทางแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 550 นาโนเมตร เนื่องจากเป็นช่วงความยาวคลื่นที่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน ให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้ามากที่สุด

3.4.2 การวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้า

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นการวัดและวิเคราะห์ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (resistivity) เพื่อพิจารณาในการใช้เป็นชั้นนำไฟฟ้า โดยใช้เครื่องวัดแบบสี่จุด (Four point probe) range 0-1000 ohm/sq.บริษัท Guardian manufacturing inc. ของสถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)



ภาพที่ 3.20

เครื่องวัดแบบสี่จุด (Four point probe)

(ที่มา: สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC))

3.4.3 การวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ

การศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มจะทำการวิเคราะห์เพื่อดูการจัดเรียงตัวของระนาบผลึกของชั้นงาน และดูลักษณะผลึกที่เกิดขึ้น ความหนา รวมทั้งสภาพพื้นผิวที่ได้ โดยจะมีการวัดและวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือดังนี้

1 เครื่อง Step profile

เพื่อศึกษาความหนา(thickness) และความขรุขระ(roughness) ยี่ห้อ Veeco รุ่น Dektak 150 ของฟิล์มของสถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)



ภาพที่ 3.21

เครื่อง Step profile

(ที่มา: สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC))

2 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

เพื่อศึกษาภาพถ่ายพื้นผิวของกระจก $\text{SnO}_2:\text{F}$ จากเครื่อง SEM ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Microelectronic Center :TMEC) และศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม $\text{ZnO}:\text{B}$ ภาพถ่ายจากเครื่อง SEM ของศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)



ภาพที่ 3.22

เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

3 เครื่อง X-ray Diffraction (XRD)

เพื่อศึกษาการจัดเรียงตัวของระนาบของผลึกฟิล์ม ZnO โดยวิธีวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ โดยใช้เครื่อง X-ray Diffraction (XRD) ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)



ภาพที่ 3.23

เครื่อง X-ray Diffraction (XRD)

3.4.4 การวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

การวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะวัดโดยใช้เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (Super Solar Simulator) ยี่ห้อ wacom รุ่น wxs-155s-L2, AM1.5 GMM ของสถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ



ภาพที่ 3.24

เครื่องจำลองแสงอาทิตย์ (Super Solar Simulator)

(ที่มา: สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC))