

บทที่ 3

ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ และ สนามไฟฟ้า บางบริเวณ ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ

3.1 การผลิตเซลล์ชั้น(ARC)ป้องกันแสงกลับที่ผิวเซลล์ด้านบนในเซลล์แสงอาทิตย์ ในระดับอุตสาหกรรม

เซลล์แสงอาทิตย์วัสดุซิลิคอนแบบผิวเรียบ โดยทั่วไปมีพื้นผิวที่สะท้อนแสงสูงกว่า 30% ซึ่งการสะท้อนแสงจะลดลงโดยการสร้างผิวขรุขระและการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ (Anti-Reflection Coatings, ARC) บนพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นวัสดุคุณวนบางอย่าง ในการเคลือบชั้น ARC ที่สร้างนั้นจะช่วยลดการสะท้อนแสงกลับบริเวณพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน โรงงานอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ใช้กระบวนการผลิต PECVD (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition) เพื่อให้ได้ฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ (SiN_x) เป็นชั้น ARC ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ PSG (Phosphor Silicate Glass) ที่ได้จากการแพร่สารเจือชั้น n-emitter ซึ่งจะเกิดเมื่อแพร่สารเจือฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิสูง จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่พื้นซิลิคอนระหว่าง ฟอสฟอรัส ซิลิคอน และ ออกซิเจนเป็นฟิล์มออกไซด์ซิลิเกตตกค้างในโรงงานอุตสาหกรรมจะจำกัดชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นนี้ออกและในระดับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างทั่วไปในระดับอุตสาหกรรมนั้นจะไม่ใช้การสร้างชั้น p/n junction ขึ้นมาเพื่อลดต้นทุนการผลิตเนื่องจากในการผลิตอุตสาหกรรมโซลาร์เซลล์นั้นจะมีการใช้พลังงานที่สูงมากเลยตัดกระบวนการผลิตออกไป โดยจะเป็นการรับซื้อมาแล้วมาประกอบในกระบวนการผลิต ซึ่งมีต้นทุนที่น้อยกว่า และ ในงานวิจัยนี้ได้นำชั้น PSG ที่ได้จากกระบวนการผลิตกลับมาใช้เพื่อเป็นชั้น ARC เพื่อเป็นทางเลือกและลดกระบวนการ PECVD สำหรับผลิตฟิล์ม SiN_x ที่ใช้พลังงานสูง

Industry process	Lab process
Commercial Wafer P Type	Commercial Wafer P Type
Wafer Inspection and Cleaning	Clean wafer (RCA1,RCA2)
Make p/n junction by Dope Phosphorous Techniques	Make p/n junction by SOD Techniques
Diffusion 1000 °C 1 Hours.	Diffusion 1000 °C 1 Hours.
Phosphorous Glass Etching by chemical	Etching HF 5 % 30 Sec
Anti Reflection Coating by PECVD process	Clean wafer (RCA1)
Screen printing Ag Contact	
Dry 200 °C 6 Sec	Dry 180 °C 10 Min
Screen printing Al Contact	
Dry 200 °C 6 Sec	Dry 120 °C 30 Min
Fast firing contact	

รูปที่ 3.1 แผนภาพเปรียบเทียบขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างทั่วไปอุตสาหกรรมและในห้องปฏิบัติการ

3.2 Preparation and characterization of SOL-GEL

3.2.1 การเตรียมสารละลายฟอสฟอรัสสำหรับการแพร่สารเจือแบบ SOD ให้กับโซลาร์เซลล์

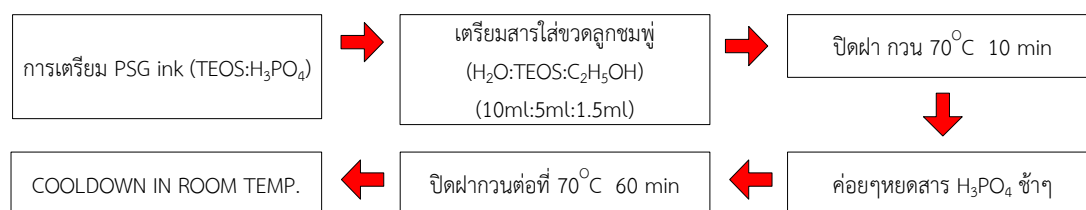
การเตรียมสารตั้งต้นในรูปของสารละลายเพื่อเป็นแหล่งสารเจือฟอสฟอรัสหรือเรียกว่า PSG ink ประกอบไปด้วย H_2O : TEOS : C_2H_5OH มีอัตราส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 10 ml : 5 ml : 1.5 ml และ H_3PO_4 ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่กำหนด เมื่อผสมสารละลายฟอสฟอรัสโดยกวนที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 10 นาที หลังจากนั้นเติม H_3PO_4 ลงไปอย่างช้าๆ และกวนต่อที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 60 นาที และปล่อยให้เย็นลงเท่าอุณหภูมิห้อง จะได้สารละลาย PSG (Phosphor silicate glass) SOL-GEL เพื่อเป็นสารละลายสำหรับกระบวนการแพร่แบบ Spin on Dopant (SOD) โดยมีชั้นฟิล์ม

PSG เป็นแหล่งของสารเจือในกระบวนการแพร่ดังกล่าวตามตารางที่ 3.1 แสดงค่าปริมาณการเติม $H_2O : TEOS : C_2H_5OH$ และค่าเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัส

ตารางที่ 3.1 ปริมาณการเติมสาร H_3PO_4 ในเงื่อนไขที่ใช้สำหรับสร้างสารละลาย PSG SOL-GEL

เงื่อนไข สารละลาย TEOS : H_3PO_4	H_2O (ml)	TEOS (ml)	C_2H_5OH (ml)	H_3PO_4 (ml)
1 : 3.0	10	5	1.5	1.667
1 : 4.0				1.250
1 : 4.5				1.111
1 : 5.0				1.000
1 : 5.5				0.909
1 : 6.0				0.833
1 : 7.0				0.714

รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการเตรียม PSG ink ส่วนสำคัญของการเตรียมสารละลายนั้นจำเป็นต้องให้ปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และค่อยๆหยดสารละลาย H_3PO_4 อย่างช้าๆ ทำให้สารละลายเป็นของเหลวใส เมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้สารละลายเปลี่ยนสภาพเป็นเจลที่มีคุณภาพดี และเป็นฟิล์มที่ดีในที่สุด หากเติมสารละลาย H_3PO_4 เร็วเกินไปจะทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลให้สารละลายข้นและจับตัวเป็นก้อนวุ้น เมื่อนำไปผลิตใช้งานฟิล์มที่ได้จะเกิดผิวแตกเสียหาย



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนภาพการเตรียมสารละลาย PSG

3.3 Preparation and characterization of selective emitter solar cell

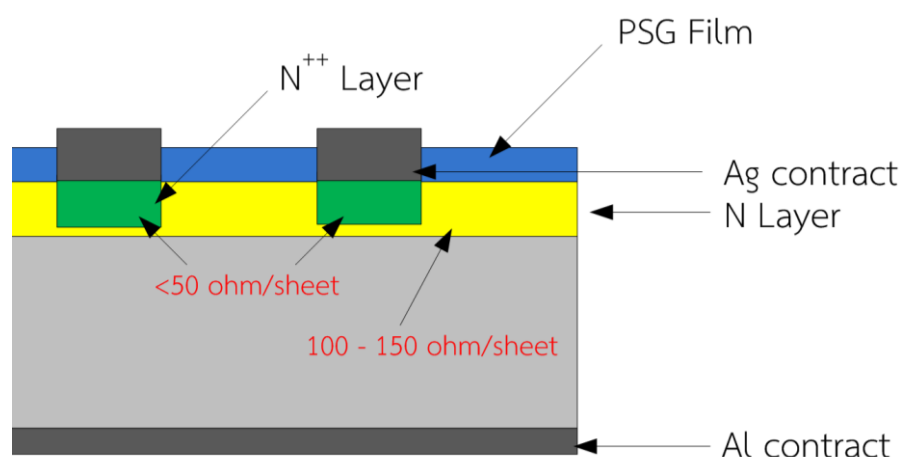
3.3.1 เทคนิคสำหรับการผลิตฟิล์ม PSG สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE

(Selective Emitter)

การสร้างชั้น n^+-Si ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่น (ρ Sheet) ต่ำกว่า $50 \Omega/Sheet$ ให้กับเซลล์ทำให้สัมประสิทธิ์การแปลงพลังงานที่แสงสีน้ำเงินมีค่าต่ำเนื่องจากเกิดความเร็วในการรวมตัวของพาหะสูง แต่จะส่งผลดีในเรื่องของโอห์มมิคของขั้วไฟฟ้าที่ดี และการสร้างชั้น $n-Si$

ที่มีค่า ρ_{Sheet} สูงอยู่ในช่วง $50 \Omega/Sheet$ ถึง $150 \Omega/Sheet$ จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดกลืนคลื่นแสงสั้นลง เงินได้ดี แต่ถ้า ρ_{Sheet} สูงเกินไปจะมีโอกาสเกิด Dead layer และยิ่งส่งถึงโอห์มมิกของขั้วไฟฟ้าที่ไม่ดี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาหาค่าที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตนั้น ๆ การสร้างของชั้น n-Si ที่มีความแตกต่างกัน 2 บริเวณ จึงสามารถลดปัญหาในส่วนของการดูดกลืนคลื่นแสงสั้นลงเงินและโอห์มมิกของขั้วไฟฟ้าที่ไม่ดีได้ และวิธีการแพร่สารเจือเพื่อสร้างชั้น n-Si จากเทคนิคของ SSOD (Spin and Screen on Doped) จึงสามารถทำให้เกิดชั้น n-Si และชั้น n^{++} -Si

จากรูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้าง selective emitter solar cell จากหลักการแล้วค่า ρ_{Sheet} ของชั้น n-Si หรือบริเวณรับแสงนั้นมีค่าอยู่ในช่วง $100 \Omega/Sheet$ ถึง $150 \Omega/Sheet$ และค่า ρ_{Sheet} ของชั้น n^{++} -Si หรือบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้ามักมีค่าต่ำกว่า $50 \Omega/Sheet$



รูปที่ 3.3 โครงสร้าง selective emitter solar cell

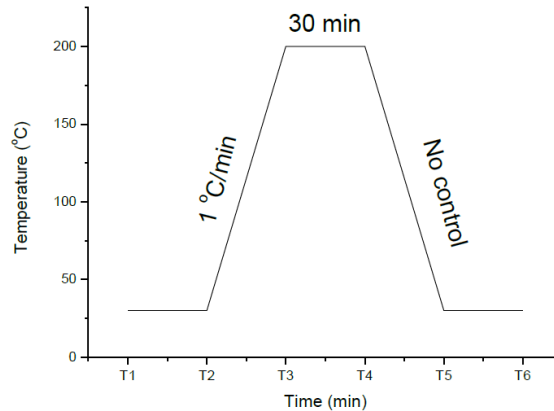
3.3.2 การผลิตฟิล์มด้วยวิธีหมุนเหวี่ยง (Spin coating)

เทคนิคการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีหมุนเหวี่ยงสามารถเคลือบฟิล์มได้อย่างสม่ำเสมอและทำให้ฟิล์มมีความบางในระดับไมโครเมตรหรือนาโนเมตรได้ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและต้นทุนต่ำกว่าเทคนิคโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) การศึกษานี้ได้ใช้เครื่องเคลือบสารแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) ยี่ห้อ Laurell รุ่น WS-400B-8NPP/LITE ที่ห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 3.4 หลังจากเตรียมสารละลายสำหรับสร้างชั้นฟิล์ม PSG เพื่อเป็นสารเจือให้กับแผ่นฐานซิลิคอนชนิด p-Si แล้ว จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนไปทำความสะอาดด้วยวิธี RCA1 และ RCA2 มีขั้นตอนการทำความสะอาดตามภาคผนวก ก หลังจากทำความสะอาดแผ่นฐานแล้ว นำแผ่นฐานไปเคลือบด้วยสารละลาย PSG ที่ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสต่ำ 7:1 (lightly doped PSG) เพื่อสร้างชั้นฟิล์ม PSG บริเวณที่ 1 ด้วยวิธีหมุนเหวี่ยง 2 ขั้นตอนขั้นตอนแรกใช้ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที นาน 10 วินาที และขั้นตอนที่สองใช้ความเร็วรอบ 3500 รอบต่อนาที นาน 30 วินาที เมื่อผ่านการแพร่อุณหภูมิสูงจะได้ชั้น n-Si ที่สารเจือเข้มข้นต่ำในบริเวณรับแสง (Lightly doped PSG) หลังจากนั้นนำแผ่นฐานซิลิคอนที่ถูกเคลือบด้วยสารละลายความเข้มข้นของ

ฟอสฟอรัสต่ำแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 200 °C นาน 30 นาที โดยที่อัตราการขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 1 °C /min แสดงกราฟดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 เครื่อง Spin coater รุ่น WS-400B-8NPP/LITE

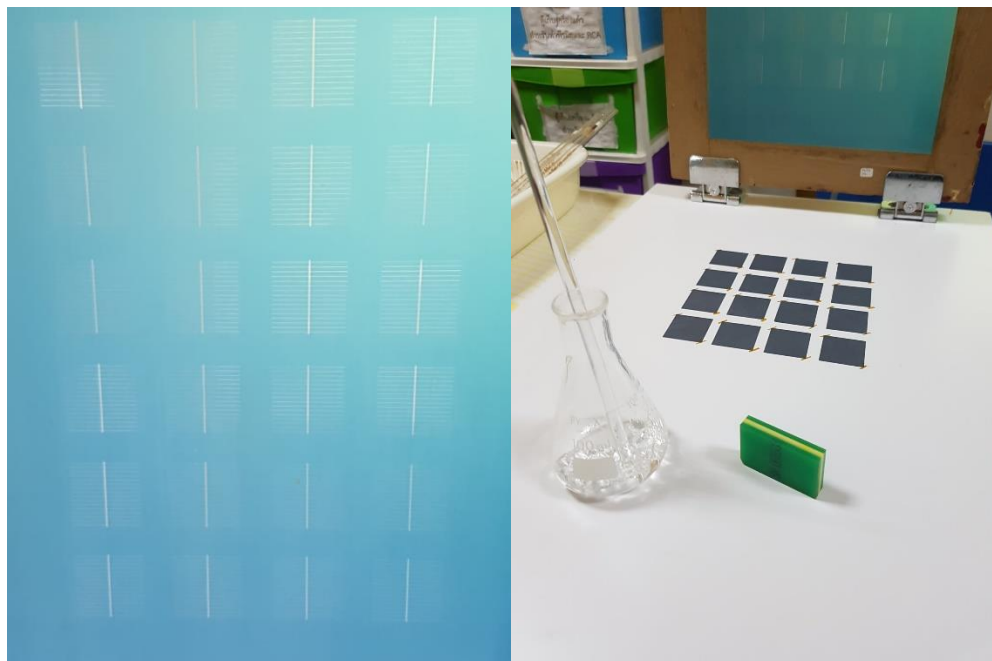


รูปที่ 3.5 กราฟ อัตราการขึ้น และ ลง ในระหว่างกระบวนการอบชั้นฟิล์ม PSG

3.3.3 การสร้างลวดลายฟิล์ม PSG ด้วยวิธีพิมพ์ลาย (Screen printing)

เมื่อสร้างชั้นฟิล์ม PSG เข้มข้นต่ำสำหรับบริเวณชั้น n-Si ขั้นตอนการสร้างบริเวณ PSG เข้มข้นสูงซึ่งมีลักษณะเป็นลวดลายกริดสามารถพิมพ์ลวดลาย (Screen printing) ด้วยสารละลาย PSG เข้มข้นสูงในเงื่อนไซ 3:1 รูปแบบของฟิล์ม PSG เข้มข้นสูงนั้นอยู่บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้า (n^{++} -Si) หลังจากได้ลวดลาย PSG แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 200 °C นาน 30 นาที อัตราการขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 1 °C /min อีกครั้งจะได้ชั้นฟิล์ม PSG เข้มข้นสูง (Heavily doped PSG) เมื่อผ่าน

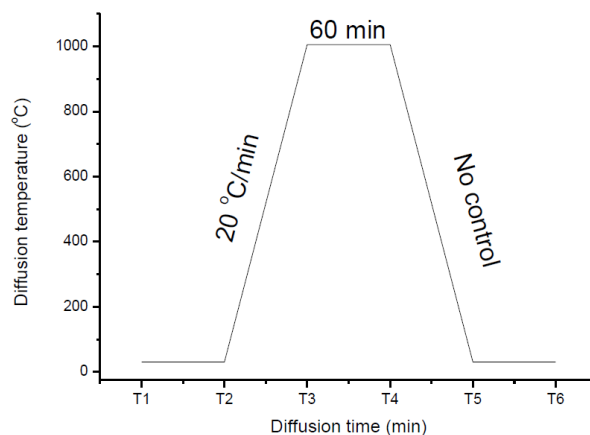
กระบวนการแพร่อุณหภูมิสูงจะได้บริเวณ n^{++} -Si ได้ชั่วไฟฟ้าภาพถ่าย แสดงลวดลายที่ใช้พิมพ์สารละลาย PSG เข้มข้นสูง ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลวดลายของไหมพิมพ์ลายสำหรับพิมพ์สารละลาย PSG ความเข้มข้นสูง และอุปกรณ์ที่ใช้ในการพิมพ์ลาย

3.3.4 การแพร่สารเจือด้วยความร้อนสูง (Thermal Diffusion)

เมื่อทำการสร้างชั้นฟิล์ม PSG 2 บริเวณที่มีความเข้มข้นสารเจือต่างกันจะเข้าสู่กระบวนการแพร่ ด้วยความร้อนสูงเพื่อให้เกิดชั้น n -Si และ n^{++} -Si บนแผ่นซิลิคอนชนิดพีในเวลาเดียวกัน หรือที่เรียกว่าการสร้างรอยต่อ p/n -Si และ บริเวณ n^{++} -Si ตามที่กำหนดบริเวณลายโลหะ โดยใช้เงื่อนไขการแพร่ ที่ $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ อัตราการขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ $20\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{min}$ นาน 60 นาที ภายใต้ก๊าซไนโตรเจน 99.99 % มีอัตราการไหลของก๊าซเท่ากับ 100 sccm แสดงกราฟดังรูปที่ 3.7 โดยกระบวนการดังกล่าวจะทำให้เกิดชั้นฟิล์ม PSG ที่พื้นผิวด้านบน และ ขณะเดียวกันก็เกิดชั้นฟิล์ม BSG (Borosilicate glass) ที่พื้นผิวด้านหลัง



รูปที่ 3.7 กราฟอัตราการขึ้น และ ลงของอุณหภูมิ ในระหว่างกระบวนการแพร่อุณหภูมิสูง เพื่อแพร่สารเจือฟอสฟอรัส ลงในแผ่นฐาน p-Si

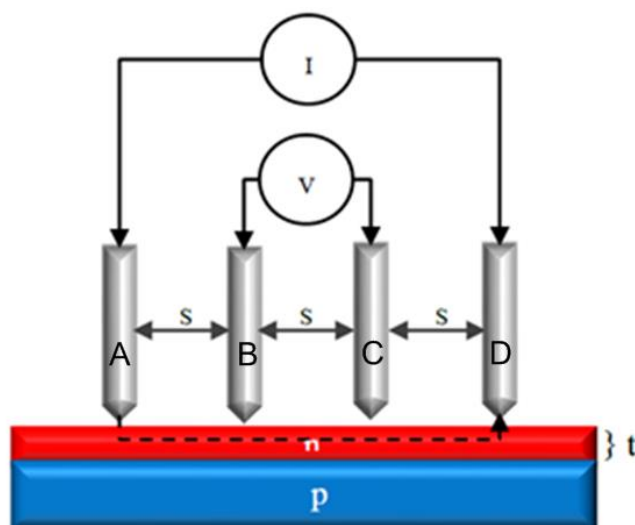
3.3.5 ความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าบริเวณบนแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์(Resistivity)



รูปที่ 3.8 เครื่องมือวัดความต้านทานแบบหัวเข็มสี่จุด (4-point probes)

หลังจากการทำการแพร่ฟอสฟอรัสลงบนชิ้นงานไปวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่น (Sheet Resistance, ρ_{Sheet}) ด้วยเครื่องมือวัดความต้านทานจำเพาะแบบหัวเข็มสี่จุด (4-point probes) รุ่น Jandel cylindrical four-point probe, เครื่องวัด Electrometer ยี่ห้อ KEITHLEY รุ่น 2400 และ เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากหัวโพรบ โดยเครื่อง Digital multimeters ยี่ห้อ UNI-T รุ่น UT39A ที่ห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 3.8 เครื่องมือวัดความต้านทานจำเพาะแบบหัวเข็มสี่จุด (4-point probe) ประกอบด้วยเข็มโลหะปลายแหลมจำนวน 4 เข็ม ที่มีระยะห่างระหว่างหัวเข็มเป็นระยะ S เท่า ๆ กัน โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ให้แก่ลวดจากเข็ม A ผ่านฟิล์มและเดินทางไปยังเข็ม D ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมและวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่เข็ม B

และ C ดังแสดงในรูปที่ 3.9 จากนั้นนำค่ากระแสไฟฟ้า (I) และแรงดันไฟฟ้า (V) ที่วัดได้มาคำนวณหา ค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่น



รูปที่ 3.9 ลักษณะการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นของชั้น n-Si ด้วย 4-point probes โดยในการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น n⁺-Si พบว่าความหนาของบริเวณ n⁺-Si น้อยกว่าระยะห่างระหว่างหัวเข็ม (s) ดังนั้นค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นสามารถหาได้จากสมการที่ 7

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} t \approx 4.532 \frac{V}{I} t \quad (7)$$

$$\rho_{sheet} = 4.532 \frac{V}{I} \quad (8)$$

โดยที่ ρ คือค่าความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็น $\Omega \cdot cm$

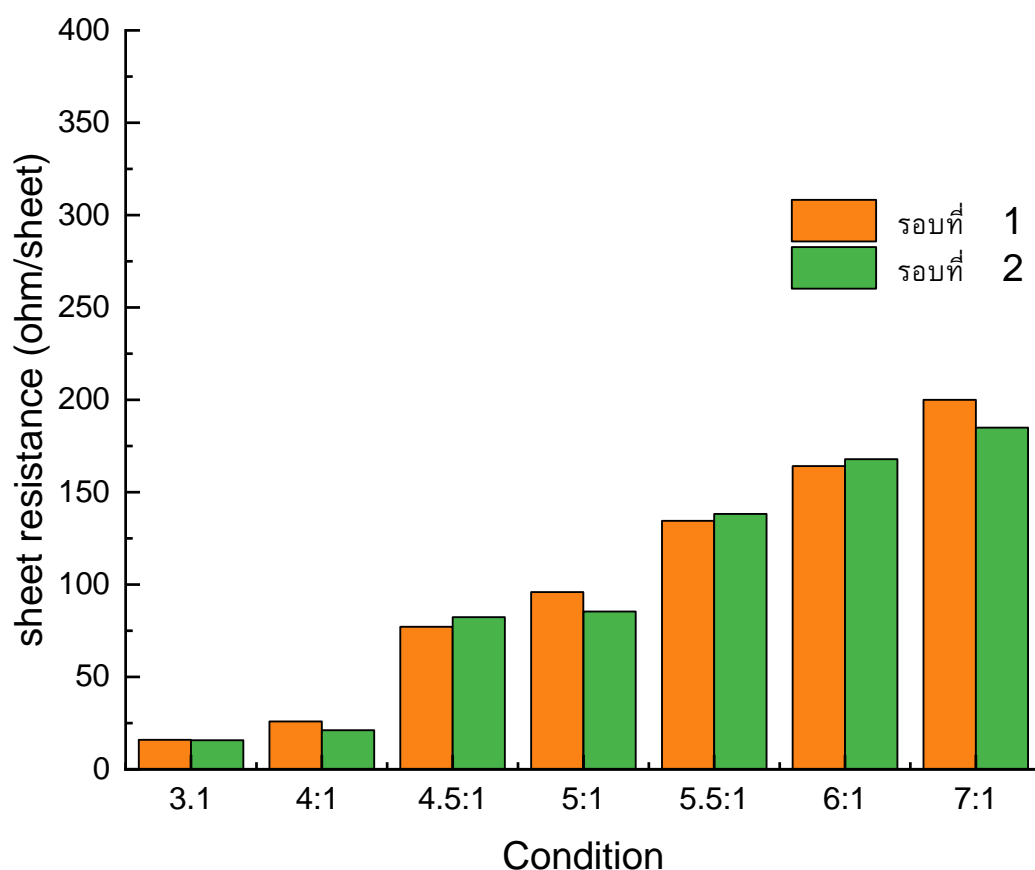
ρ_{sheet} คือค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นมีหน่วยเป็น $\Omega/Sheet$

V คือแรงดันไฟฟ้ามีหน่วยเป็น mV

I คือกระแสไฟฟ้ามีหน่วยเป็น mA

t คือความหนาของชั้น n-Si มีหน่วยเป็น μm

การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นในงานวิจัยนี้ได้สร้างสายเส้นบริเวณ n^+ -Si ขนาด 3 mm ภายใต้เงื่อนไขการแพร่ที่อุณหภูมิ 1000 °C สำหรับวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นด้วยเครื่อง 4-point probes เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขของความเข้มข้นสารเจือต่างกับสองบริเวณแสดงผลความต้านทานไฟฟ้าแผ่น ณ ช่วงอุณหภูมิการแพร่ฟอสฟอรัส 1000 °C เป็นเวลา 60 นาที ความต้านทานไฟฟ้าแผ่นแสดงผลดังรูปที่ 3.10 และดูค่าพบว่าปริมาณสาร H_3PO_4 ส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณสาร H_3PO_4 ขึ้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของอะตอมฟอสฟอรัสมากขึ้นในเงื่อนไขอัตราส่วนระหว่าง TEOS และ H_3PO_4

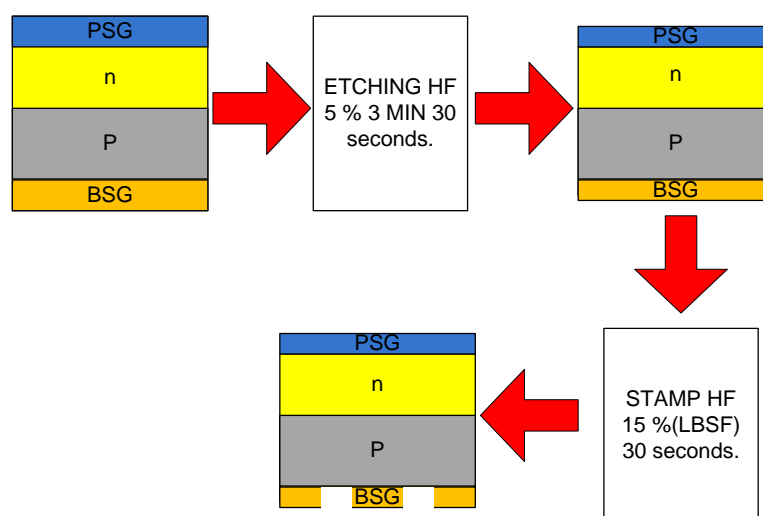


รูปที่ 3.10 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าของชั้นฟิล์ม PSG ในเงื่อนไขต่างๆของ H_3PO_4 : TEOS

3.4 Preparation of local back surface field solar cell

3.4.1 การเตรียมสารละลายกรด HF สำหรับ สกัดพื้นผิว (Etching) และ เปิดช่องด้านหลัง(Stamping)

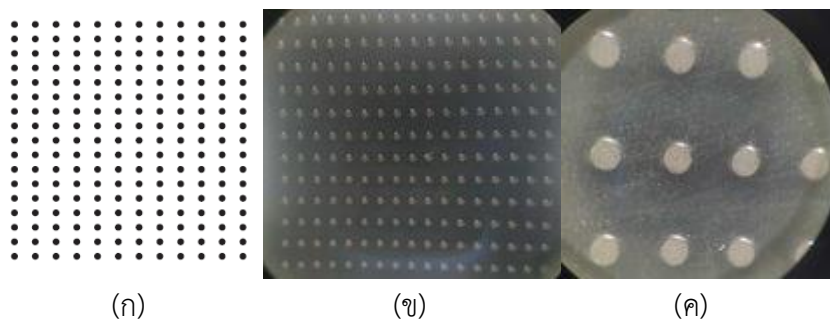
การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE เป็นตัวตั้งต้นกระบวนการและนำไปสกัดชั้นความหนาของชั้นฟิล์มทั้งสองด้าน ผ่านกระบวนการสกัดพื้นผิวให้ขรุขระด้วยสารละลาย ด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออริก (HF) ความเข้มข้น 5 % เป็นเวลา 3.30 นาที หลังจากนั้นทำการเปิดช่องด้านหลังด้วย โดยใช้ชั้น BSG ที่เกิดขึ้นในกระบวนการแพร่ด้วยความร้อนสูง ทำการเปิดช่องด้วยสารละลาย HF ความเข้มข้น 15 % นาน 30 วินาที ด้วยเทคนิคประทับลาย (Foam Stamp) ด้านหลังตามรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แผนภาพการสกัดชั้น PSG film และ BSG film ที่ผิวบนแผ่นฐาน p/n-Si

3.4.2 การสร้างลวดลายฟิล์มด้วยวิธีประทับลาย (flash foam Stamp)

เทคนิคการประทับลายได้เลือกใช้ Flash foam ที่เป็นวัสดุไวแสงหาซื้อง่ายทั่วไป โดยเมื่อมีแสงแฟลชผ่านจะเกิดความร้อนทำให้พื้นผิวละลายเชื่อมติดกันจนเป็นช่องปิดและส่วนที่ปิดไว้จากหน้าอากาศจะ เกิดเป็นลวดลายขึ้น เนื่องจากโฟมเป็นวัสดุที่มีความเป็นรูพรุนสูงสามารถดูดซับสารละลายได้ดี จึงมีความเหมาะสมในการกักเก็บสารละลายและปล่อยออกมาเพียงแค่ว่าบริเวณ



รูปที่ 3.12 (ก) ลวดลายบนฟิล์มโพลีเอทิลีนที่ถ่ายทอกลงบนแพรรอโฟมที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นช่องเปิด (ข) ลักษณะของลวดลายที่เกิดขึ้นบน Flash foam ภายหลังจากการแฟลชแสงที่กำลังขยาย 10 เท่า และ (ค) ลักษณะ พื้นผิวของบริเวณช่องเปิดและช่องปิดของ Flash foam ที่กำลังขยาย 50 เท่า

โดยการสร้าง Flash foam กระทบลายได้ใช้เครื่อง Flash Stamp รุ่น JL-V เริ่มจากการออกแบบลวดลายหน้ากากที่บดแสงป้องกันแสงแฟลชตามที่ต้องการ จากนั้นนำ Flash foam และแบบลวดลายหน้ากากที่เตรียมไว้เข้าเครื่อง Flash Stamp แสงแฟลชจะทำปฏิกิริยากับ Flash foam ซึ่งจะได้ลวดลายเป็นลักษณะบริเวณช่องเปิดและช่องปิดตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เครื่อง Flash Stamp กึ่งอัตโนมัติ

ในการศึกษานี้ได้พิจารณารูปแบบลวดลายช่องเปิดของชั้นฟิล์มไดโอดอินทรีย์ BSG ที่ด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์ และค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิดที่แพรรอเจือที่เข้มข้น (p^+ -Si) กับระยะห่างระหว่างช่องเปิดที่มีผลต่ออัตราการรวมตัวใหม่ที่ผิวได้ออกแบบพื้นที่ช่องเปิดที่แพรรอเจือที่เข้มข้นกับระยะห่างระหว่างช่องเปิดให้มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (Aperture ratio) อยู่ระหว่าง 8 ถึง 15 % และพบว่าอัตราส่วนที่ให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำ

การกำหนดสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดใกล้เคียง 12.5 % ของพื้นที่ด้านหลังเลือกใช้ลวดลายแบบลายแบบจุด ในการผลิตในระดับอุตสาหกรรม มีการใช้แสงเลเซอร์ในการเปิดช่องชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริก

การประทับลายด้วยสารละลายกรด HF เพื่อสร้างลวดลายบนชั้นไดอิเล็กทิกด้านหลัง โดยนำสารละลายหยดลงบน แพรชโพนัม ประมาณหนึ่ง และทำการประทับลายด้วยเครื่องมือกึ่งอัตโนมัติที่มีในห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในรูปที่ 3.14 และนำชิ้นงานไปล้างด้วยกระบวนการ RCA 1 และนำไปผลิตซิลโหลต่อไป



รูปที่ 3.14 เครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติ

ขนาดลวดลายบนฟิล์มวัดด้วยกล้อง Light microscope ยี่ห้อ optica ที่มีอยู่ในห้องแลปเซลล์แสงอาทิตย์ ใน มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งจะได้ลวดลายช่องเปิดของ Flash Foam ตามที่ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยจากผลการวัดขนาดลวดลายฟิล์มทั้งหมด 3 วงกลม และนำมาเฉลี่ย พบว่าลวดลายที่ได้จากการประทับลายสารละลายโบรอนมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 4 % เมื่อเทียบกับลวดลายที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Layout ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการสร้างลวดลายของฟิล์มที่เปิดช่องในขนาดกำลังขยาย 100 เท่า เพื่อคำนวณช่องเปิดระหว่างแพรชโพนัม และหลังจากเปิดช่องด้วยกรด ซึ่งสามารถใช้วิธีการประทับลายจาก Flash foam ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงและจากสูตรคำนวณช่องเปิดต่อช่องปิด แสดงในสมการข้างล่างนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ช่องเปิด} = \frac{\text{พื้นที่ช่องเปิด}}{\text{พื้นที่ทั้งหมด}} = \frac{\pi r^2}{\text{all area}} = \frac{\pi r^2}{3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}} \quad (8)$$

3.4.3 ค่าการสะท้อนแสงกลับบนผิวของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกที่สร้างขึ้น

ค่าการสะท้อนแสงกลับของชั้นฟิล์มบางวัดด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (UV-VIS) รุ่น Cary 300 ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 3.15 วัดในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 - 800 nm ในโหมดการทำงานแบบ Integrating sphere ซึ่งมีหลักการทำงานโดยการตรวจวัดปริมาณแสงและความเข้มแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงสีม่วง (UV) และแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible light) ที่ถูกดูดกลืน (Absorption) ทะลุผ่าน (Transmission) และสะท้อนกลับ (Reflection)



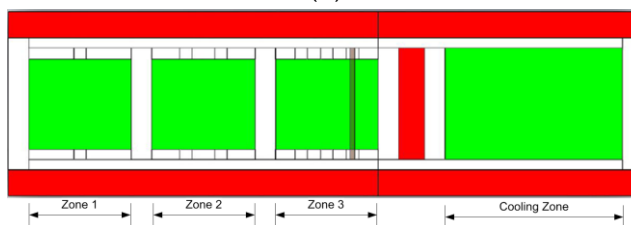
รูปที่ 3.15 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer (UV-Vis) รุ่น Cary 300

3.5 การสร้างขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิก (Ohmic contact)

ขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าด้านหน้าที่รับแสงจะมีลวดลายกริดของโลหะเงิน (Ag) เพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังเป็นขั้วโลหะอะลูมิเนียม (Al) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งจำเป็นต้องมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างขั้วโลหะกับเซมิคอนดักเตอร์แบบรอยสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic contact) ที่แสดงพฤติกรรมของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในลักษณะเป็นกราฟเชิงเส้นมีความโค้งชัน I-V เพื่อป้องกันค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำและไม่เกิดพฤติกรรมเรียงกระแส (Rectifier)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.16 (ก) เตาเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วรุ่นที่ 2 และ (ข) แบบจำลองภายในของเตาเผา รุ่นที่ 2

กระบวนการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว (Fast firing) ซึ่งในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ในระดับอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพสูงนั้นจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิและเวลาของเตาเผา (Fast firing furnace) เพื่อให้กระบวนการผลิตสั้นที่สุดและมีประสิทธิภาพมากโดยเตาเผาแก๊สอัตโนมัติ ควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบ PID ที่สร้างขึ้นภายในห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์ รุ่นที่ 2 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงดังรูปที่ 3.16 ได้ทำการพัฒนาให้มีความใกล้เคียงในระดับ อุตสาหกรรมมากที่สุด

ภายในเตาเผาประกอบด้วย 4 พื้นที่ โดยแต่ละพื้นที่จะมีหลอดอินฟราเรด (IR lamps) สำหรับให้ความร้อนและเทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิ โดยแต่ละพื้นที่จะมี หน้าที่ความสำคัญแตกต่างกัน ดังนี้

พื้นที่ 1 Drying หรือการอบแห้ง เป็นกระบวนการเพื่อทำให้กาวโลหะ (Metal paste) ที่ใช้ สำหรับทำขั้วไฟฟ้าแห้ง และใช้ความร้อนไล่สารประกอบอินทรีย์และตัวทำละลายต่าง ๆ ให้ระเหย ออกไป ซึ่งจะให้ความร้อนที่ 300°C

พื้นที่ 2 Burning โดยขั้วไฟฟ้าด้านหน้าจะเกิดการหลอมละลาย แทรกเข้าสู่ชั้นฟิล์ม SiN_x ไป ถึงชั้นรับแสงภายในเซมิคอนดักเตอร์ n-Si emitter และ ขั้วไฟฟ้าด้านหลังจะเกิดการหลอมละลาย ของอะลูมิเนียมและเซมิคอนดักเตอร์ที่รอยสัมผัส Al-Si ซึ่งจะใช้อุณหภูมิที่ 600°C

พื้นที่ 3 Firing เป็นกระบวนการให้ความร้อนประมาณ 900°C ขึ้นไป ในเวลาสั้น ๆ โดย ขั้วไฟฟ้าด้านหน้าจะเกิดการหลอมละลายของเงิน (Ag) และแพร่เข้าสู่พื้นผิวของชั้นรับแสง n-Si emitter และขั้วไฟฟ้าด้านหลังจะเกิดการหลอมละลายของอะลูมิเนียมทั้งหมดเข้ากับพื้นผิวของเซมิ คอนดักเตอร์ที่รอยสัมผัส Al-Si

พื้นที่ 4 Cooling หลังจากการให้ความร้อนสูงอย่างรวดเร็วแล้ว จะลดอุณหภูมิให้เย็นลง มาถึงอุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิต่ำกว่า โดยขั้วไฟฟ้าด้านหน้าเกิดการตกผลึกของ Ag และป้องกัน ไม่ให้ Ag ทะลุผ่านชั้นรับแสง n-Si emitter และเกิดเป็นบริเวณ $\text{n}^{++}\text{-Si}$ (SE) ที่หน้าผิวสัมผัส ส่วน

ขั้วไฟฟ้าด้านหลังจะเกิดการแข็งตัวระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน โดยเกิดการเจือของอะลูมิเนียม ในทันทีใกล้กับพื้นผิวซิลิคอน และเกิดเป็นบริเวณ p^{++} -Si บางบริเวณ (LBSF) ขึ้น

การศึกษาหาเงื่อนไขการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วที่ใช้แผ่นซิลิคอนรอยต่อ p/n-Si ขนาด 3 cm x 3 cm ที่สร้างขึ้น ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น Emitter ประมาณ 100 - 200 Ω /sheet และมีการเกิดชั้นPSG ที่ด้านหน้าและ BSG ที่ด้านหลังที่ผ่านการสกัดพื้นผิวและเปิดช่องแล้วจากนั้นนำมาสร้างขั้วไฟฟ้าลวดลายกริดด้วยกาวเงิน (Ag paste) ที่ด้านหน้ารับแสงให้ตรงกับ ลวดลาย Heavy dope (3:1) ที่สร้างขึ้น และด้านหลังถมกาวอะลูมิเนียม (Al paste) ให้ทั่วทั้งพื้นที่ ช่องเปิดที่ทำการเปิดช่องด้วยกรดไว้ให้ทั่วทั้งพื้นที่ด้านหลัง โดยใช้เทคนิคพิมพ์ลาย Screen Technic และผ่านการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว Fast Firing ด้วยเตาเผารุ่นที่ 2 ที่เงื่อนไขภายใต้ ความดันบรรยากาศปกติ โดยกำหนดอุณหภูมิและเวลาภายในแต่ละพื้นที่ ได้แก่ พื้นที่ 1 อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 10 วินาที พื้นที่ 2 อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 10 วินาที และพื้นที่ 3 เป็นเวลาที่ 912 °C เป็นเวลา 7วินาที จากนั้นนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ไปวัดประสิทธิภาพในเงื่อนไขการผลิต ทั้งหมดของงานวิจัย

การวัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่องระบบจำลอง แสงอาทิตย์ Solar simulator Model # SS100AAA และตัวจ่ายไฟฟ้า Precision source ยี่ห้อ KEYSIGHT รุ่น B2901A และโปรแกรม Agilent B2900A Quick IV Measurement ที่สำนักวิชา วิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงดังรูปที่ 3.17 ภายใต้การจำลองแสง เทียมที่มีคุณสมบัติสเปคตรัมที่ AM 1.5 มีค่าความเข้มข้นของแสงมาตรฐานเท่ากับ 1000 W/m² ปรับ ค่าความสว่างที่ตกกระทบพื้นผิวของชิ้นงานที่ 126,000 Lux



รูปที่ 3.17 เครื่องวัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยระบบจำลองแสงเทียม



รูปที่ 3.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด : Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) รุ่น JSM-7800F

การวิเคราะห์ผลการแลกเปลี่ยนเฟสของอะลูมิเนียมและซิลิคอน (Al-Si) ที่บริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ได้ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของบริษัท JEOL รุ่น JSM-7800F ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงภาพเครื่องในรูปที่ 3.18 SEM มีหลักการจากการสร้างภาพโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวของชิ้นงานและแปลงสัญญาณอิเล็กตรอนเป็นภาพซึ่งภาพที่ได้จะมีกำลังขยายสูงและสามารถจำแนกลักษณะรายละเอียดได้สูงถึง 10 nm ในงานวิจัยนี้ได้ใช้กำลังขยายที่ 8000 เท่า เพื่อนำมาใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานรวมถึงสามารถวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในชิ้นงานด้วยโหมดการทำงาน Energy dispersive X-ray (EDX) โดยผลที่ได้จะแสดงการแพร่ของอะลูมิเนียมที่เข้าไปในชิ้นงานซิลิคอนที่สร้างขึ้น และ พื้นผิวของซิลิคอนบริเวณที่อะลูมิเนียมแพร่เข้าไปตามลำดับ

3.6 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างต่างๆ

จากการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างต่างๆที่เตรียมและจัดทำในงานวิจัยเริ่มจากการเตรียมสาร PSG ink ผู้ศึกษาจึงได้นำสารละลาย PSG ink ชนิด Lightly Dope (7:1) มาเป็นแหล่งสารเจือสำหรับการหมุนเวียง และนำไปอบที่ 200 °C 30 นาที เพื่อให้ได้ชั้นฟิล์มที่สร้างยึดติดกับชิ้นงานได้ดี ก่อนจะนำไปทำการพิมพ์ลาย (SCREEN) ด้วยสารละลาย PSG ink ชนิด HEAVY Dope (3:1) และนำไปอบในเงื่อนไขเดียวกับสารละลาย PSG ความเข้มข้นต่ำ และนำไปผ่านการแพร์ที่ 1000 °C ภายในบรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ จะได้ชั้นฟิล์ม ที่มีผลต่างความเข้มข้นของชั้น n เพื่อสร้างรอยต่อ p/n-Si ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si และจะได้บริเวณ n^{++} โดยการเปรียบเทียบการผลิตทั้งหมด 4 โครงสร้าง แสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 3.19

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างทั้งหมด เริ่มที่นำแผ่นฐานซิลิคอนหลายผลึก ชนิด p-Si ขนาด 3 cm x 3 cm มาผ่านกระบวนการสกัดพื้นผิวให้ขรุขระด้วยสารละลาย HF และทำความสะอาดด้วยสารละลาย HNO_3 (RCA1) และ สารละลาย HCl (RCA2) โดยใช้สารละลาย PSG ด้วยเทคนิคการหมุนเวียงสารละลายและนำไปอบ 200 °C 30 นาที ในทุกโครงสร้างเงื่อนไข และสำหรับโครงสร้าง SE จะต้องทำการพิมพ์ลาย (Screen) ด้วยสารละลาย PSG Heavy dope นำไปอบที่ 200 °C 30 นาที จากนั้นทำการสร้างรอยต่อ p/n-Si ด้วยกระบวนการแพร์ที่ 1000°C 60 นาที จากนั้นทำการสกัดพื้นผิวทั้งหมดด้วยสารละลาย HF 5 % 3 นาที 30 วินาที และในขั้นต่อไปทำการล้างชั้นฟิล์ม BSG ออกทั้งหมดในเงื่อนไข SE และ STANDARD และ ทำการเปิดช่อง BSG ด้วย HF 15% นาน 30 วินาที ในเงื่อนไข SE and LBSF และ LBSF จากนั้นทำการสร้างขั้วโลหะด้วยการพิมพ์ลาย Ag ที่ด้านหน้า นำอบแห้ง 180 °C 10 นาที และ สร้างขั้วโลหะด้วยการพิมพ์ลาย Al ที่ด้านหลังทั่วบริเวณ นำอบแห้ง 120 °C 30 นาที หลังจากสร้างขั้วโลหะแล้วนำเงื่อนไขทั้งหมดไปเผาอบขั้วโลหะด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว (Fast firing) ที่ อุณหภูมิ 915 °C 7 วินาที และจะทำการเปรียบเทียบขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง , การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE , การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างผสมผสาน SE และ LBSF และเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน ซึ่งจะพบว่าขั้นตอนที่เหมือนกัน แตกต่างกันเพียงการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานและโครงสร้างSEจะต้องทำการล้างกำจัดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังทั้งหมด ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง จะทำการเปิดช่องชั้นฟิล์มด้วยวิธีการประทับลายด้วยกรด



รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE and LBSF

3.7 สรุป

ในบทนี้เป็นขั้นตอนการสร้างโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Selective ด้วยการแพร่ความร้อนเพียงครั้งเดียว โดยแหล่งสารเจือได้จากสารละลาย PSG ink ด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยงและการพิมพ์สารละลาย จะได้ชั้น PSG film เป็นชั้นฟิล์มสำหรับการสร้างชั้นรับแสง n-Si และวิธีการพิมพ์ลายใช้สำหรับการสร้างฟิล์มช่อง n^{++} -Si เป็นโครงสร้าง SE cell บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้า และหลังจากดำเนินการเสร็จสิ้นแล้ว จะเกิดชั้น BSG film ที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการแพร่ด้วยความร้อนครั้งเดียว ทำการสกัดชั้นด้วยสารละลายกรด และทำการเปิดช่อง BSF ให้เป็น โครงสร้าง LBSF cell โดยช่องเปิดดังกล่าว เมื่อทำการแพร่ขั้วโลหะ Al ที่เป็นขั้วโลหะด้านหลังแล้วโดยผ่านเทคนิคการทำขั้วไฟฟ้าด้วยความร้อนยิ่งยวดจะทำให้เกิด p^{++} -Si เมื่อผ่านกระบวนการดังกล่าวเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขั้วโลหะทั้งด้านบนและด้านล่างแล้วจึงนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างไปวิเคราะห์ค่าทางแสงและทางไฟฟ้าในบทที่ 4 ต่อไป