

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนโครงสร้างซีเลคทีฟอิมิตเตอร์
และสนามไฟฟ้าบางบริเวณด้านหลังด้วยวิธีต้นทุนต่ำ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2566

THE FABRICATION OF CRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS
WITH COMBINATION STRUCTURE OF SELECTIVE EMITTER AND
LOCAL BACK SURFACE FIELD BASED ON LOW COST



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2023

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนโครงสร้างซีเลคทีฟอิมิตเตอร์และ
สนามไฟฟ้าบางบริเวณด้านหลังด้วยวิธีต้นทุนต่ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ดร.รุ่งเรือง พัฒนากุล)

ประธานกรรมการ

(ผศ.ดร. ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ดร.วิโรจน์ แสงธงทอง)

กรรมการ

(รศ. ดร.ศิริรัตน์ ทับสูงเนิน รัตนจันทร์)

กรรมการ

(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

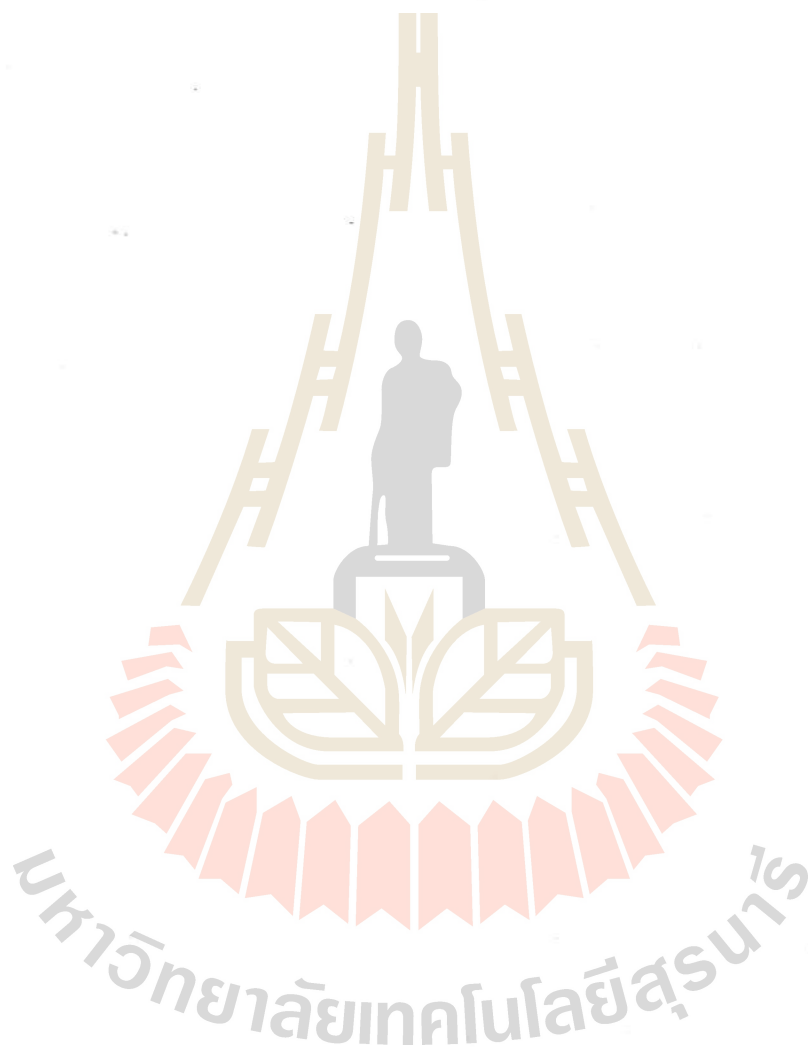
นายวรการ ลิมศิริ : การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนโครงสร้างซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ และสนามไฟฟ้าบางบริเวณ ด้านหลังด้วยวิธี ต้นทุนต่ำ (THE FABRICATION OF CRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS WITH COMBINATION STRUCTURE OF SELECTIVE EMITTER AND LOCAL BACK SURFACE FIELD BASED ON LOW COST)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณ์รักษ์, 81 หน้า

คำสำคัญ : Selective Emitter , Local Back Surface Field , Selective Emitter and Local Back Surface Field

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนมีรูปแบบโครงสร้างรอยต่อพีเอ็น สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้โดยตรงจากการรับพลังงานแสง แต่มีข้อจำกัดด้านความสามารถแปลงพลังงานแสงที่ยานความยาวคลื่นน้อยกว่า 1.1 ไมโครเมตร จากข้อกำหนดของแถบพลังงานช่องว่างของวัสดุผลึกซิลิคอน ขณะเดียวกันก็เกิดการสูญเสียการแปลงพลังงานแสงที่ยานความยาวคลื่นตามองเห็นสูงถึง 40% อย่างไรก็ตามการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้ตอบสนองต่อแสงย่านความยาวคลื่นสั้นหรือแสงสีน้ำเงิน ให้ดีขึ้น โดยการใช้วิธีการสร้างชั้นซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ (Selective Emitter, SE) และการสร้างสนามไฟฟ้าบางบริเวณที่ด้านหลัง (Local Back Surface Field, LBSF) ด้วยการเปิดช่องลดตายชั้นฉนวนบางด้านหลัง เพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในสูงชันและมีความต้านทานไฟฟ้าที่รอยสัมผัสต่ำ ส่งผลให้เกิดอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะต่ำ ในอุตสาหกรรมผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ใช้เทคโนโลยีแสงเลเซอร์สำหรับสร้างรอยต่อเปิดของชั้นฉนวนเพื่อให้ได้ผลที่แม่นยำและรวดเร็ว อย่างไรก็ตามแสงเลเซอร์อาจเกิดความเสียหายต่อเซลล์ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รูปแบบโครงสร้าง SE และ LBSF ด้วยวิธีต้นทุนต่ำจากการสร้างรอยต่อ SE ด้วยการพิมพ์ลาย (Screen printing) และสร้างรอยต่อเปิดชั้นฉนวนด้วยการประทับลาย (Stamping) เพื่อสร้าง LBSF

ในการศึกษานี้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนรอยต่อพีเอ็นโครงสร้าง SE และ LBSF จากการกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน โดยใช้สารเจือในรูปสารละลายโซลเจลเคลือบบนแผ่นฐานซิลิคอนชนิดพี ซึ่งเรียกว่ากระบวนการ SOD (Spin On Dopant) ให้เกิดขึ้นเอ็นซิลิคอน หลังกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อนจะเกิดชั้นฉนวน PSG ที่เกิดขึ้นด้านบนเซลล์รอยต่อพีเอ็นและชั้นฉนวน BSG ที่เกิดขึ้นด้านบนเซลล์จะถูกกำจัดทิ้ง แต่สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ชั้น PSG เป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับที่ผิวด้านบน (Anti-Reflection Coating: ARC) และชั้น BSG เพื่อเปิดช่องบางบริเวณก่อนทำการเคลือบชั้นโลหะอะลูมิเนียมและแพร่ซึมลงแผ่นฐานซิลิคอนชนิดพีให้เกิดเป็นบริเวณ P⁺⁺ ผลการทดสอบมีค่าการสะท้อนแสงที่ต่ำที่สุดคือ 20.56 % จากชั้น PSG และโครงสร้าง SE ให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น n-Si ที่แตกต่างกัน 2 บริเวณคือบริเวณ n⁺⁺ Si อยู่ได้ขั้วไฟฟ้ากริดมี ρ_{sheet} เท่ากับ 20 Ω /sheet จากการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเข้มข้น และบริเวณรับแสงมี ρ_{sheet} เท่ากับ 120 Ω /sheet จากการแพร่สารเจือเข้มข้นต่ำ โครงสร้าง LBSF ได้ทำการเปิดรอยต่อชั้นฉนวน BSG ด้านหลังลดตายเป็นวงกลมที่ 12% หลังจากสร้างขั้วโลหะให้กับเซลล์รูปแบบของ SE และ LBSF สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้มากกว่าโครงสร้างรอยต่อพีเอ็นมาตรฐานอยู่ระหว่าง 0.52% ถึง

0.98% เมื่อพิจารณาต้นทุนการผลิตต่อวัตต์พบว่ามีค่าประมาณ 0.1631 USD/Watt ซึ่งให้เห็นว่าสามารถแข่งขันได้เมื่อเทียบกับโครงสร้างมาตรฐานในอุตสาหกรรม



สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา อภกร ลิ่มศิริ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา วิท พงษ์

WARAKORN LIMSIRI : THE FABRICATION OF CRYSTALLINE SILICON SOLAR CELLS WITH COMBINATION STRUCTURE OF SELECTIVE EMITTER AND LOCAL BACK SURFACE FIELD BASED ON LOW COST.

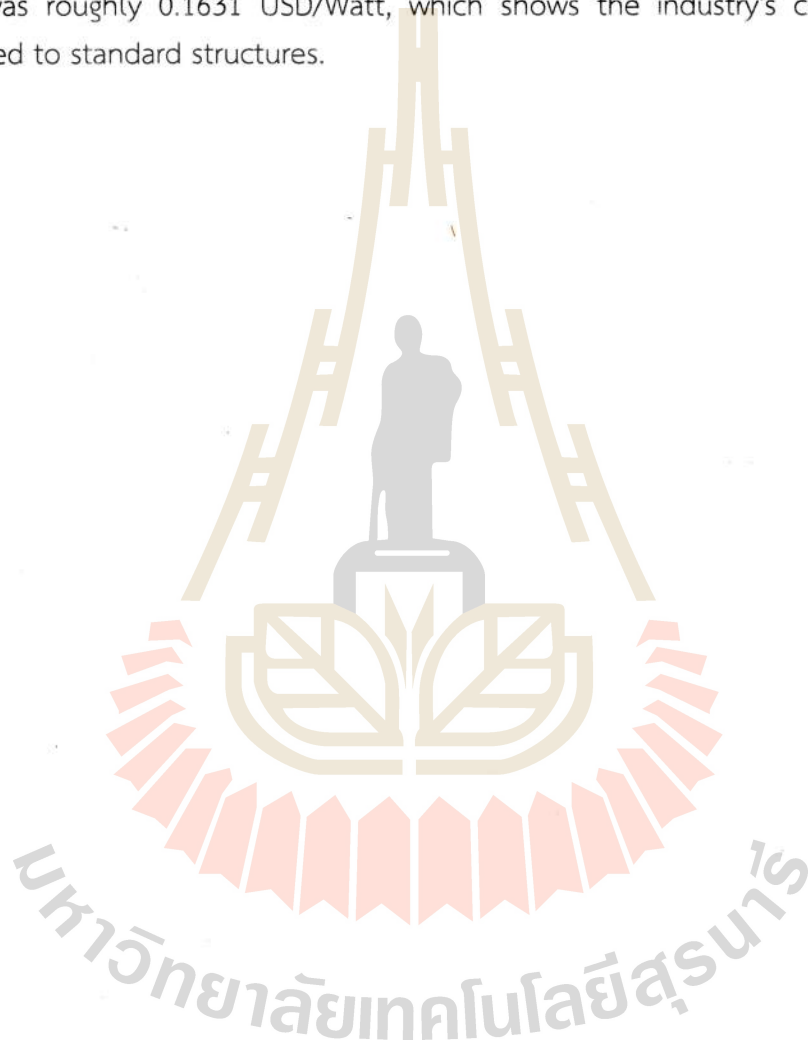
THESIS ADVISOR : ASST. PROF. THIPWAN FANSUWANNARAK, Ph.D. 81 PP.

Keyword : Selective Emitter, Local Back Surface Field, Selective Emitter and Local Back Surface Field

Crystalline silicon solar cells with a p-n junction structure can generate electricity directly by absorbing light energy. The limitation theory of bandgap energy in crystalline silicon prevents them from converting light energy at wavelengths below 1.1 micrometers. At the same time, there is a loss of up to 40% in light energy conversion in the visible wavelength range. However, the development of Si solar cell technology aims to improve its response to short-wavelength or blue light while simultaneously increasing its back surface field. The technique of using Selective emitters (SE) and creating a local back surface field (LBSF) by opening the pattern of the thin insulating layer at the back are used. The result of this improvement is a higher internal electric field and lower resistivity at the contact interface, which leads to a lower recombination rate of carriers. The pattern of open channels in the insulating layer is created with laser technology in the solar cell manufacturing industry to achieve precise and rapid results. However, laser light can potentially damage the cells. Therefore, this research focuses on the development of solar cells with SE and LBSF structures using a low-cost method by creating SE patterns through screen printing and creating the openings in the insulating layer through stamping to form the LBSF.

This study aims to examine SE and LBSF designs in crystalline silicon solar cells. The demonstration of the p-n Si junction was made by using dopants in a sol-gel solution that was coated on p-type silicon substrates, which is called Spin On Dopant (SOD). The result of this process was an n-silicon layer. Thermal diffusion resulted in the formation of a PSG and a BSG insulating layer on the top and rear of the p-n junction cell. They were later removed in the industrial process, but the PSG and BSG were still used as an insulating layer in this study. The PSG is utilized as a layer of anti-reflection, while the BSG layer was also opened in certain locations. The p-type silicon substrate can become the site of a p^{++} region when an aluminum rear contact diffuses through the BSG opening. According to the test results, the PSG layer had the lowest reflectance value of 20.56%. The SE structure provided the different resistivity values for the n-Si layer in two regions. The n Si area beneath the grid electrode has a sheet

resistivity ρ_{sheet} of 20 Ω/sheet due to high-concentration phosphorus doping, while the light-receiving area has a ρ_{sheet} of 120 Ω/sheet due to low-concentration doping. A circular pattern covering 12% was covered by a BSG opening pattern in the LBSF structure. The efficiency of the SE and LBSF cell configurations was improved by between 0.52% and 0.98% compared to standard p-n junction structures after metal contacts were formed. When it comes to production costs per watt, the estimated value was roughly 0.1631 USD/Watt, which shows the industry's competitiveness compared to standard structures.



School of Electrical Engineering
Academic Year 2023

Student's Signature Warakorn Limsiri
Advisor's Signature ผศ. ทวี

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยและการศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีจากทุนการศึกษาแก่นักศึกษาบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก (OROG) และยังได้รับทุนนำเสนอผลงานระดับบัณฑิตศึกษารายปี จากสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการช่วยเหลือด้านองค์ความรู้ และการดำเนินการด้านเทคนิคด้านการวิจัยและพัฒนา จาก บุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทิพย์วรรณ พังสุวรรณรักษ์ อาจารย์ในที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำทางวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย จนกระทั่งผลการวิจัยสำเร็จลุล่วง และได้ช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้ออกมาสมบูรณ์อีกทั้งยังเป็นแบบอย่างในการทำงานและแนวคิดที่ดีให้กับผู้วิจัยเสมอมา

เจ้าหน้าที่และนักวิจัยประจำห้องปฏิบัติการประจำการ F10-F11 ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัย ตลอดจนให้คำชี้แนะการแก้ปัญหาต่างๆ

เจ้าหน้าที่ธุรการประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและพนักงานธุรการทุกท่านที่คอยให้แนวทางดำเนินการเอกสาร และข้อมูลต่างๆที่เป็นธุระให้ในงานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้

สุดท้ายนี้งานวิจัยจะสำเร็จไม่ได้ต้องขอบคุณเพื่อนๆในห้องวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่คอยให้คำแนะนำและสอนขั้นตอนการวิจัยชี้แนะแนวทางการวิจัย และขอขอบพระคุณ แม่ วิภา ลี้มศิริ และพ่อ พงศธรณ์ ลี้มศิริ ที่ได้อบรมเลี้ยงดูให้การสนับสนุนทางการศึกษาต่างๆมากมายทั้งยังคอยเป็นกำลังใจสำคัญ และเป็นแบบอย่างในการดำเนินชีวิตเสมอมา

วรากร ลี้มศิริ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ

บทที่

1 บทนำ

1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2	วัตถุประสงค์การวิจัย.....	4
1.3	ขอบเขตการวิจัย	4-5
1.4	วิธีการดำเนินงาน.....	5
1.5	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.6	รูปแบบการจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์.....	6-7

2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎี

2.1	บทนำ.....	8
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8-12
2.3	องค์ประกอบและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	11
2.3.1	ชั้นป้องกันการสะท้อนแสง.....	11
2.3.2	ชั้นผิวขรุขระรูปทรงพีระมิดหัวตั้ง.....	11
2.3.3	ชั้นรอยต่อพีเอ็นของวัสดุสารกึ่งตัวนำ	12
2.3.4	แผ่นฐานซิลิคอน	12
2.3.5	ชั้น Back surface field (BSF).....	12
2.3.6	ขั้วโลหะไฟฟ้าด้านหลังรับแสง.....	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	หลักการทํางานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si.....	12
2.4.1	การทํางานในสภาวะมืด(dark state)	13
2.4.2	การทํางานในสภาวะสว่าง(luminate stage).....	14
2.5	ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในเซลล์แสงอาทิตย์	14-17
2.6	การสูญเสียในเซลล์แสงอาทิตย์.....	18
2.6.1	การสูญเสียทางแสง	18-19
2.6.2	การสูญเสียทางไฟฟ้า	19-21
2.7	การปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโครงสร้างแบบซีเลคทีฟอิมิตเตอร์(Selective Emitter Solar Cell).....	21-22
2.8	การปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโครงสร้างแบบสนามไฟฟ้าบางบริเวณ(Local Back Surface Field Solar Cell).....	22
2.9	แหล่งสารเจือสำหรับการสร้างรอยต่อ p/n-Si ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์.....	23-24
3	ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ และ สนามไฟฟ้าบางบริเวณ ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ	
3.1	การผลิตเซลล์ชั้น(ARC)ในเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับอุตสาหกรรม	25-26
3.2	การเตรียมและการลักษณะเฉพาะของ SOL-GEL.....	26-27
3.2.1	การเตรียมสารละลายฟอสฟอรัสสำหรับการแพร่สารเจือให้กับโซลาร์เซลล์	27-28
3.3	การเตรียมและการลักษณะเฉพาะของ selective emitter solar cell	28
3.3.1	เทคนิคสำหรับการผลิตฟิล์ม PSG สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE (Selective Emitter)	27-28
3.3.2	การผลิตฟิล์มด้วยวิธีหมุนเหวี่ยง (Spin coating)	28-29
3.3.3	การสร้างลวดลายฟิล์ม PSG ด้วยวิธีพิมพ์ลาย (Screen printing).....	30
3.3.4	การแพร่สารเจือด้วยความร้อน (Thermal Diffusion).....	30-31
3.3.5	ความต้านทานทางไฟฟ้าบริเวณบนแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์	31-33
3.4	การเตรียมและการลักษณะเฉพาะของ local back surface field solar cell	34
3.4.1	การเตรียมสารละลายกรด HF สำหรับ สกัดพื้นผิว (Etching) และ เปิดช่องด้านหลัง(Stamping).....	34
3.4.2	การสร้างลวดลายฟิล์มด้วยวิธีประทับลาย (flash foam Stamp).....	34-36

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.3	ค่าการสะท้อนแสงกลับบนผิวของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกที่สร้างขึ้น	37
3.5	การสร้างขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิก (Ohmic contact)	37-41
3.6	การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างต่างๆ	42-43
3.7	สรุป.....	44
4	ผลการวัดทางแสง ค่าทางไฟฟ้า และการวิเคราะห์ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างผสมผสาน SE และ LBSF	
4.1	บทนำ.....	45-46
4.2	ผลและการวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์	46
4.2.1	การวิเคราะห์ผลค่าความต้านทานบนฟิล์มที่สร้างขึ้น	46-47
4.2.2	การวิเคราะห์ลวดลายช่องเปิดชั้นBSG สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF	47-49
4.3	ผลการวัดค่าทางแสงของชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ (Anti-Reflection Coating,ARC).....	49-52
4.4	ผลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE and LBSF , LBSF , SE และทั่วไป.....	53-55
4.5	สรุป.....	56
5	การวิเคราะห์ต้นทุน และ ความคุ้มค่า	
5.1	บทนำ	57
5.2	การวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วย และความคุ้มค่า	57-64
5.3	สรุป	64
6	สรุปงานวิจัย และ ข้อเสนอแนะ	
6.1	สรุปงานวิจัย.....	65-66
6.2	ข้อเสนอแนะ	66
	รายการเอกสารอ้างอิง.....	67-70
	ภาคผนวก ก	71
	ภาคผนวก ก การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยวิธี Radio Corporation of America (RCA).....	72
	ภาคผนวก ข	73
	ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	74-80
	ประวัติผู้เขียน	81

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

3.1 ปริมาณการเติมสาร H_3PO_4 ในเงื่อนไขที่ใช้สำหรับสร้างสารละลาย PSG SOL-GEL.....	27
4.1 ปริมาณการเติมสาร H_3PO_4 ในเงื่อนไขที่ใช้สำหรับสร้างสารละลาย PSG และการวัดค่าความจำเพาะของแผ่นฐานในเงื่อนไขอัตราส่วนของสารละลาย TEOS : H_3PO_4	46
4.2 ผลการวัดขนาดฟิล์มที่สร้างบนแพรซิโคมและลวดลายพิมพ์ที่ได้จากการประทับลาย.....	48
4.3 ผลการวัดค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างต่างๆ.....	54
5.1 ส่วนประกอบของต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์.....	58
5.2 ส่วนประกอบของต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ในแลปวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์.....	59
5.3 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์อุตสาหกรรม กับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างที่ผลิตในแลปวิจัยแสงอาทิตย์ในมหาวิทยาลัย.....	62-64

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูปรภาพ

รูปที่	หน้า
1.1	แนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าในประเทศไทย.....1
1.2	เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Passivated emitter and rear locally diffused cell(PERL) (Green,2001).....2
1.3	กราฟสรุปวิวัฒนาการของเซลล์แสงอาทิตย์รวบรวมโดย NREL (Energy, 2017)..... 3
2.1	ส่วนประกอบหลังของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อ p-n.....12
2.2	(ก) กลไกการเดินทางของพาหะในแถบพลังงานของรอยต่อ p/n-Si ที่ภายใต้สภาวะมืดและ (ข) วงจรสมมูลไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะมืด.....13
2.3	(ก) กลไกการเดินทางของพาหะในแถบพลังงานของรอยต่อ p/n-Si ที่ภายใต้สภาวะสว่างและ (ข) วงจรสมมูลไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะสว่าง.....14
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหล (I) และแรงดันไฟฟ้า (V) ภายใต้สภาวะมืดและสภาวะสว่าง..... 15
2.5	วงจรสมมูลไฟฟ้าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์.....16
2.6	การสูญเสียทางแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) การบังแสงจากขั้วไฟฟ้าด้านบนผิวรับแสง(ข) การสะท้อนแสงที่ผิวด้านรับแสง และ (ค) การสะท้อนกลับที่ผิวด้านหลัง.....18
2.7	กลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะในแบบต่างๆ ของวัสดุสารกึ่งตัวนำ (ก)การรวมตัวใหม่แบบเปล่งแสง, (ข)การรวมตัวใหม่ที่ตำแหน่งบกพร่องและ (ค) การรวมตัวใหม่แบบออร์เจ.....19
2.8	เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERL ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง 25%.....21
2.9	โซลาร์เซลล์ที่มี โครงสร้างของ Selective Emitter Solar Cell ที่ด้านบน และ Local Back Surface Field Solar Cell ที่ด้านหลัง.....22
2.10	(ก) รูปแบบการเกิดเป็นเจลาจากการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด และ (ข) รูปแบบการเกิดเป็นเจลาของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่แบบเบส.....24

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 แผ่นภาพขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เปรียบเทียบระหว่างการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้างทั่วไปอุตสาหกรรมและในห้องปฏิบัติการ.....	26
3.2 ขั้นตอนภาพการเตรียมสารละลาย PSG.....	27
3.3 โครงสร้าง selective emitter solar cell.....	28
3.4 เครื่อง Spin coater รุ่น WS-400B-8NPP/LITE.....	29
3.5 กราฟ อัตราการขึ้น และ ลง ในระหว่างกระบวนการอบชั้นฟิล์ม PSG.....	29
3.6 ลวดลายของไหมพิมพ์ลายสำหรับพิมพ์สารละลาย PSG ความเข้มข้นสูงและอุปกรณ์ที่ใช้ในการ พิมพ์ลาย.....	30
3.7 กราฟอัตราการขึ้น และ ลงของอนุภาคนิวในระหว่างกระบวนการอบชั้น p/n-Si เพื่อแพร่ สารเจือฟอสฟอรัส.....	31
3.8 เครื่องมือวัดความต้านทานแบบหัวเข็มสี่จุด (4-point probes).....	31
3.9 ลักษณะการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นของชั้น n-Si ด้วย 4-point probes.....	32
3.10 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าของชั้นฟิล์ม PSG ในเงื่อนไขต่างๆ.....	33
3.11 แผนภาพการสกัดชั้น PSG film และ BSG film ที่ผิวบนแผ่นฐาน p/n-Si.....	34
3.12 (ก)ลวดลายบนฟิล์มใสที่ถ่ายทอดลงบนแฟรชโฟมที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นช่องเปิด (ข) ลักษณะของ ลวดลายที่เกิดขึ้นบน Flash foam ภายหลังการแฟลชแสงที่กำลังขยาย 10 เท่า และ (ค) ลักษณะ พื้นผิวของบริเวณช่องเปิดและช่องปิดของ Flash foam ที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	35
3.13 เครื่อง Flash Stamp กึ่งอัตโนมัติ.....	35
3.14 เครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติ.....	36
3.15 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer (UV-Vis) รุ่น Cary 300.....	37
3.16 (ก) เตาเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วรุ่นที่ 2 และ (ข) แบบจำลองภายในของเตาเผารุ่นที่ 2.....	38
3.17 เครื่องวัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยระบบจำลองแสง เทียม.....	40
3.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด : Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) รุ่น JSM-7800F.....	41
3.19 ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้าง SE เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE and LBSF.....	43

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างผสมผสาน SE and LBSF.....	45
4.2 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าของชั้นฟิล์ม PSG ในเงื่อนไขต่างๆ.....	47
4.3 ลวดลายช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG โดยมีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (ก) 8% (ข) 12%	48
4.4 ลวดลายการเปิดช่องไดอิเล็กตริกด้วยกรด บนแผ่นฐานซิลิคอนจากการประทับลายโดยมีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (ก) 8% (ข) 12%	48
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกลับของแสงและความยาวคลื่นช่วง 200-800 นาโนเมตรของชั้นฟิล์มไดอิเล็กตริกPSGด้านหน้า.....	50
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกลับของแสงและความยาวคลื่นช่วง 200-800 นาโนเมตรของชั้นฟิล์มไดอิเล็กตริกBSGด้านหลัง.....	50
4.7 (ก) ภาพถ่ายอิเล็กตรอนที่ตัดขวางของแผ่น p-Si (ข) ภาพถ่ายอิเล็กตรอนที่ตัดขวางของแผ่นแสดงลักษณะของ Al ที่มีการแพร่ซึมลงไปในช่วงงานและ (ค) ภาพถ่ายอิเล็กตรอนที่ตัดขวางของแผ่น p-Si ที่ไดโนลูมิเนียมแพร่ซึมเข้าไป.....	52
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(V) และกระแสไฟฟ้า(mA)ของเซลล์แสงอาทิตย์ในเงื่อนไขต่าง ๆ.....	55
5.1 สัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของประเภทต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนในเชิงพาณิชย์.....	60
5.2 สัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของประเภทต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนในแลปวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์.....	60

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A = พื้นที่หน้าตัด

ARC = ชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ (Anti-reflection coatings)

BSF = Back Surface Field

BSG = BoroSilicate Glass

C = ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s

E_A = พลังงานที่ใช้ในการแพร่

E_C = แถบความนำ (Conduction band)

E_{Fn} = แถบพลังงานเฟอร์มิของอิเล็กตรอน

E_{Fp} = แถบพลังงานเฟอร์มิของโฮล

E_g = แถบพลังงานช่องว่าง (Energy band gap)

E_v = แถบวาเลนซ์ (Valence band)

eV = หน่วยอิเล็กตรอนโวลต์

FE-SEM = กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดฟิลด์อิมิชชัน (Field Emission-Scanning electron microscope)

FF = ฟิลแฟคเตอร์ (Fill factor)

G = อัตราการสร้างคู่อิเล็กตรอนและโฮล

h = ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} Js

I = กระแสไฟฟารวม (Current)

I_D = กระแสไฟฟ้าไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์

I_L = กระแสโฟตอนที่ได้รับการกระตุ้นจากแสงตกกระทบ

I_{MP} = กระแสไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด

I_{SC} = กระแสลัดวงจร (Short-circuit current)

I_0 = กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse saturation current)

J = ความหนาแน่นกระแส (Current density)

k = ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} J/K

N_A = ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้รับ (Acceptor)

N_D = ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้ (Donor)

$N_{(x,t)}$ = ความหนาแน่นของสารเจือที่ตำแหน่ง x ใด ๆ และเวลา t ใด ๆ

N_0 = ความหนาแน่นของสารเจือที่ผิว

n = ดัชนีหักเหแสง

nm = นาโนเมตร

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

- P_{IN} = กำลังไฟฟ้าอินพุต 1000 W/m^2 ที่แสงมาตรฐาน AM 1.5
 PSG = Phosphor silicate glass
 q = ค่าคงที่ของประจุไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
 R_C = ความต้านทานไฟฟ้าที่รอยสัมผัส (Contact resistance)
 R_S = ความต้านทานอนุกรม (Series resistance)
 R_{SH} = ความต้านทานขนาน (Shunt resistance)
 R_{Sheet} = ความต้านทานไฟฟ้าแผ่น (Sheet Resistance)
 s = ระยะห่างระหว่างหัวเข็ม 4 point probe
 sccm = standard cubic centimeter per minute
 S_{EFF} = ความเร็วในการรวมตัวใหม่ที่พื้นผิว (Effective surface recombination velocity)
 t = เวลาที่ใช้ในการแพร่ (มีหน่วยเป็นนาที่)
 T = อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
 V = แรงดันไฟฟ้า (Voltage)
 V_{MP} = แรงดันไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด
 V_{OC} = แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open-circuit voltage)
 W = ความกว้างของบริเวณปลดพาหะ (Depletion region)
 J_{SC} = ความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (Short-circuit current density)
 J_{OE} = Emitter saturation current density
 Ω = โอห์ม (Ohm)
 η = ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Efficiency)
 λ = ความยาวคลื่น
 μm = ไมโครเมตร
 ρ = สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity)
 Ω_{Sheet} = ความต้านทานจำเพาะ (Effective resistivity)
 Ag = โลหะเงิน (Silver)
 Ag paste = กาวโลหะเงิน
 Al = โลหะอะลูมิเนียม (Aluminium)
 Al paste = กาวโลหะอะลูมิเนียม
 EtOH = Ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
 USD = หน่วยเงินดอลลาร์สหรัฐ (\$)
 FT-IR = Fourier Transform Infrared Spectrometer
 HCl = กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

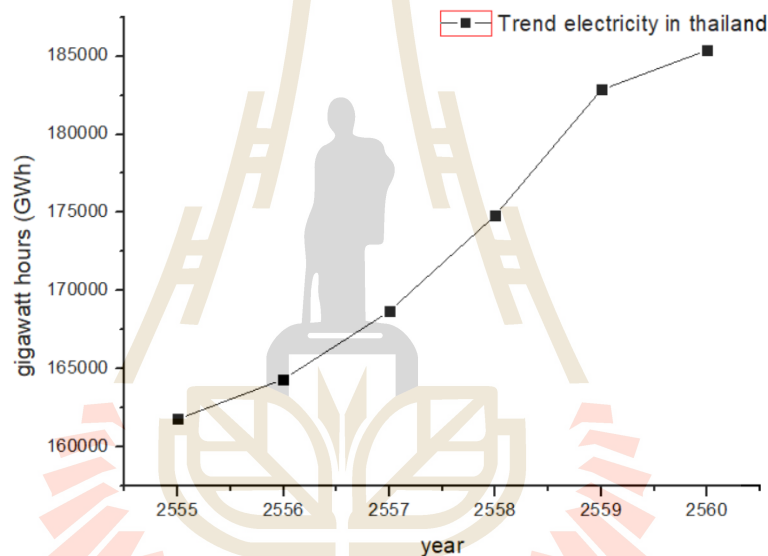
- HF = กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid)
 HNO₃ = กรดไนตริก (Nitric acid)
 H₂O = น้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนต่าง ๆ (Deionized water)
 H₂O₂ = ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)
 H₃PO₄ = กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid)
 NH₄OH = แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide)
 IR-lamp = หลอดอินฟราเรด
 LBSF = Local Back Surface Field
 mc-Si = ซิลิคอนหลายผลึก (multi-crystalline silicon)
 N₂ = ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas)
 p-Si = ซิลิคอนชนิดพี
 p⁺-Si = ซิลิคอนชนิดพีที่ทำการเปิดช่องแพร์ลงไปผ่านทะลุชั้น BSG (lightly doped)
 p⁺⁺-Si = ซิลิคอนชนิดพีที่ทำการเปิดช่อง แพร์เข้าไปในชั้นงาน Si (Heavily doped)
 n⁺-Si = ซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีปริมาณสารเจือต่ำ (lightly doped)
 n⁺⁺-Si = ซิลิคอนชนิดพีที่ทำการเปิดช่อง(Heavily doped)
 O₂ = ก๊าซออกซิเจน (Oxygen gas)
 PSG = Phosphosilicate glass
 p/n-Si = รอยต่อพีเอ็นของซิลิคอน
 RCA = Radio corporation of America
 SOD = Spin on Doped
 SSOD = Spin and Screen on Doped
 SE = ชั้นรับแสงบางบริเวณ (Selective Emitter)
 Si = ซิลิคอน (Silicon)
 SiH₄ = ก๊าซซิลเลน (Silane gas)
 SiN_x = ซิลิคอนไนไตรด์ (Silicon nitride)
 SiO₂ = ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide)
 SiO_xN_y = ซิลิคอนออกซิไนไตรด์ (Silicon oxynitride)
 UV-Vis = UV-Visible spectrophotometer

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงานทำการเก็บสถิติการใช้พลังงานตั้งแต่ปี พ.ศ.2555 ถึงปัจจุบัน ซึ่งว่าการใช้ไฟฟ้าในการอุปโภคบริโภคของประเทศไทยได้สูงขึ้นทุกปีตามรูปที่ 1.1 (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน)

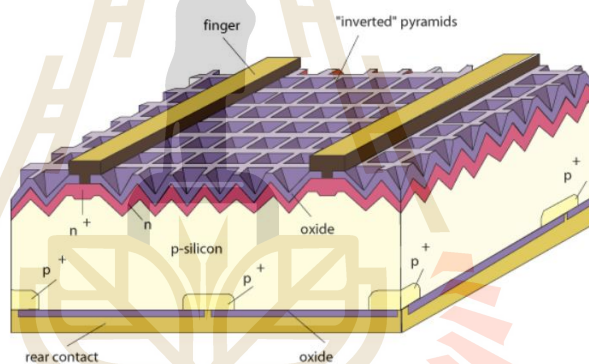


รูปที่ 1.1 แนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าในประเทศไทย

จากรายงานสถิติพลังงานรายปี พ.ศ.2561 สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ได้สรุปไว้ว่า ช่วง 4 ปีที่ผ่านมาแหล่งพลังงานที่ประเทศไทยนำมาใช้เพื่อแปลงรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าเปรียบเทียบกับปีพ.ศ.2557 ถึงปี พ.ศ. 2561 พลังงานหมุนเวียนถูกนำมาใช้เพิ่มสูงขึ้นในประทศไทยร้อยละ 3 % ซึ่งมีค่ากำลังผลิตจากเดิม 1,298.5 MW เป็น 2,962.5 MW โดยส่วนใหญ่ที่นำมาใช้เป็นพลังงานที่ได้มาจาก ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และ ฟอสซิล ซึ่งพลังงานเหล่านี้มีปริมาณที่จำกัดและมีผลกระทบต่อสภาวะโลกร้อน ที่ผ่านมามาประเทศไทยใช้การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานน้ำซึ่งมีกำลังการผลิตทั่วประเทศ 3,107.4 MW (รายงานสถิติพลังงานทดแทนของประเทศไทย 2561) และมีแนวโน้มการพัฒนาที่คงที่ เนื่องจากพื้นที่ความเหมาะสมและขั้นตอนการก่อสร้างเขื่อนกักเก็บน้ำเกิด

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสังคม ดังนั้นจึงหันมาศึกษาวิจัยและพัฒนาพลังงานหมุนเวียนและทดแทนอย่างอื่นมาใช้ประโยชน์มากขึ้น เช่น พลังงานลม ชีวมวล และพลังงานจากแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดไม่มีวันหมดสิ้นและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสังคมน้อยกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลจากปัญหาและข้อจำกัดดังกล่าวของพลังงานทางเลือกอื่นๆ จึงมีการศึกษาและวิจัยพลังงานทางเลือกโดยเฉพาะอย่างยิ่งคือเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจาก เป็นการแปลงพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้าได้ทันที ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอน ซึ่งสามารถหาพบได้บนโลกและมีราคาต่ำสามารถแปรรูปได้จากแร่ควอต หรือ ททราย โดยการแบ่งเป็นสามกลุ่ม คือ ซิลิคอนผลึกเดี่ยว , ฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน และ ฟิล์มบางนาโนซิลิคอน (green M.A. 2000)

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างต่างๆ เพื่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงมากขึ้น โดยโครงสร้างแบบ PERL (Passivated emitter and rear locally diffused cell) มีค่าการแปลงพลังงานได้สูงถึง 24% ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Passivated emitter and rear locally diffused cell (PERL) (Green, 2001)

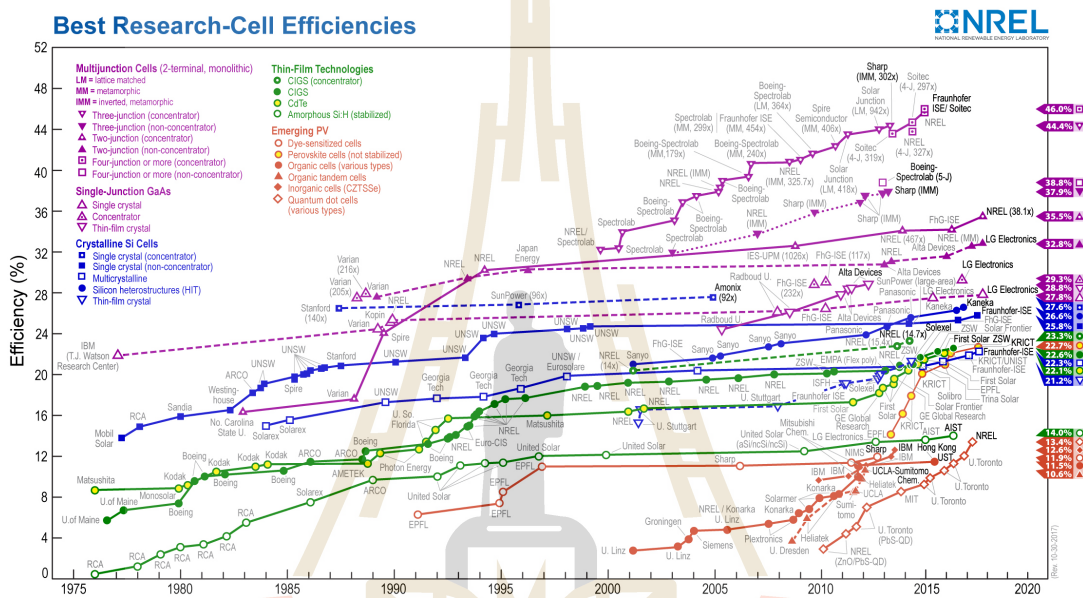
ส่วนสำคัญหลักของโครงสร้าง PERL ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานและลดการสูญเสียภายในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก

1. พีระมิดหัวกลับที่ผิวรับแสง (Inverted pyramids) ช่วยลดการสะท้อนกลับที่พื้นผิว และเพิ่มพื้นที่รับแสงมากขึ้นทำให้กระแสไฟตอนมากขึ้น

2. ผิวพาสซีเวชัน (Surface passivation) เป็นชั้นฉนวนบางๆ ที่ผิวด้านบนและด้านหลัง เพื่อลดจุดบกพร่องของรอยสัมผัสทำให้เกิดการรวมรวมของพาหะดีขึ้น ช่วยลดการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิว (Surface recombination) และเกิดสนามไฟฟ้าที่บริเวณชั้นฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ

3. บริเวณซีเลคทีฟอีมิเตอร์ (Selective emitter) ประกอบด้วยบริเวณรับแสงที่เจือสารความเข้มข้นต่างกัน เพื่อแปลงพลังงานในย่านแสงความยาวคลื่นสั้นสีน้ำเงินมากขึ้น และเกิดความต้านทานไฟฟ้าที่รอยสัมผัสโลหะน้อย

โครงสร้าง PERL ที่กล่าวมาข้างต้นนี้ไม่เหมาะกับกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์พาณิชย์ เพราะใช้เทคนิคการถ่ายทอผลึก (photolithography) ซึ่งมีกระบวนการที่ซับซ้อน ต้นทุนผลิตสูง อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อหากระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ซับซ้อน ลดขั้นตอนการผลิตเพื่อสามารถสร้างความมั่นคงในการวิจัยและพัฒนาประเทศด้านพลังงานทดแทน รูปที่ 1.3 แสดงความก้าวหน้าของการพัฒนาประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1976 ถึงปัจจุบัน จาก NREL (National Renewable Energy Laboratory)



รูปที่ 1.3 กราฟสรุปวิวัฒนาการของเซลล์แสงอาทิตย์รวบรวมโดย NREL (Energy, 2017)

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้สนใจการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง Selective emitter และ Local back passivation ด้วยเทคนิค Spin on dopant ที่ใช้การเตรียมแบบโซล-เจล ซึ่งมีต้นทุนต่ำด้วยการสังเคราะห์หมึกพอสฟอรัสความเข้มข้นต่างกันเพื่อเป็นสารเจือสำหรับการผลิตชั้น n-Si และผ่านกระบวนการ พิมพ์ลาย(Screen printing) เพื่อถ่ายทอผลึกและกำหนดบริเวณ n-Si (Lightly doped area) และ n^{++} Si (Heavy doped area) ที่มีความเข้มข้นของสารเจือพอสฟอรัสต่างกัน มาสร้างเป็นโครงสร้างชั้นรับแสง แม้ว่า บริเวณ n-Si สามารถดูดกลืนแสงสีฟ้า(Blue wavelength) ที่มีความยาวคลื่นสั้นพลังงานสูงได้ดีกว่า n^{+} -Si แต่พื้นที่ n-Si จะทำให้ความต้านทานรอยสัมผัส(Contact resistance) ค่าสูงทำให้ประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นในการผลิตระดับอุตสาหกรรมจึงผลิตชั้น n^{+} -Si เพื่อลดผลค่าความต้านทานไฟฟ้าได้ชั่วไฟฟ้า(R_c) ด้านบน แต่จะตอบสนองต่อแสงช่วงความยาวคลื่นสั้นได้ไม่ดี ในการศึกษานี้ได้นำวิธีการแพร่สารเจือเข้มข้นต่างกัน เพื่อให้ได้บริเวณ n^{++} -

Si และ n^+ -Si จากสารละลายโซล-เจล ที่พิมพ์ลายและแพร์ด้วยความร้อนในขั้นตอนเดียวโดยการกำหนดค่าความเข้มข้นของสารละลายในการทำลวดลาย 2 บริเวณ ที่ต้องการคือ

1. บริเวณสารเจือฟอสฟอรัสเข้มข้นต่ำ (Lightly doped n^+ -Si) เป็นบริเวณรับแสงที่มีค่า ρ_{sheet} อยู่ในช่วง 100-200 ohm/sheet เพื่อเพิ่มการตอบสนองการดูดกลืนแสงสีน้ำเงิน

2. บริเวณสารเจือฟอสฟอรัสเข้มข้นสูง (Heavy doped n^{++} layer) เป็นบริเวณใต้ขั้วโลหะไฟฟ้ากริดที่มีค่า ρ_{sheet} ต่ำกว่า 50 ohm/sheet เพื่อให้เกิดคุณสมบัติ Ohmic contact ที่ดีส่งผลต่อค่า R_c มีค่าต่ำทำให้ประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงานสูงขึ้น และ ใช้เทคนิคการเปิดช่องด้วยกรด (Acid stamp) และ การเปิดช่องด้วยระดับพลังงานสูง (Laser open pattern) เพื่อการเปรียบเทียบราคาการผลิตต่อ 1 ชิ้นงานที่สร้าง เพื่อที่จะสามารถคาดการณ์การผลิตเชิงพาณิชย์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาและออกแบบขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขั้นตอนการผสมผสานระหว่างพิมพ์ลาย (Screen) และประทับลาย (Stamp) ของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ (SE) และสนามไฟฟ้าบางบริเวณ (LBSF)
- 2) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างจุลภาค ทางแสง ทางไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ของชั้นซีเลคทีฟและสนามไฟฟ้าบางบริเวณที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนที่สร้างขึ้น
- 3) ศึกษาการใช้เทคนิคที่สอดคล้องกับเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันเพื่อให้ได้องค์ความรู้ด้วยเทคนิคการพิมพ์ลาย (Screen) และประทับลาย (Stamp) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยโครงสร้าง Selective Emitter (SE) และ Local back surface field (LBSF)

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ศึกษาและผลิตชั้นรับแสง Selective Emitter (SE) และชั้นสนามไฟฟ้าที่ด้านหลังในโครงสร้าง Local Back Surface Field (LBSF) ด้วยวิธี Spin on Dopant (SOD) พิมพ์ลาย (Screen) และ ประทับลาย (Stamp)
- 2) ศึกษาสมบัติทางโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางแสง ทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้าง SE และ LBSF

- 3) ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนต้นแบบโครงสร้าง SE และ LBSF ซึ่งขนาดไม่น้อยกว่า 9 ตารางเซนติเมตร ด้วยการผสมผสานวิธี Spin on dope (SOD) พิมพ์ลาย (Screen) และประทับลาย(Stamp)และวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1) ทบทวนการศึกษา รวบรวมข้อมูลของวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาและทดลองเกี่ยวกับเงื่อนไขสารละลายตั้งต้นเพื่อผลิตฟิล์ม PSG และ BSG สำหรับเป็นแหล่งสารเจือฟอสฟอรัสและสารเจือโบรอนในห้องปฏิบัติการ SUT
- 3) ทดลองและสร้างลวดลายโดยเทคนิคการ spin on dopant(SOD) เพื่อสร้างบริเวณ n-Si emitter และ บริเวณ n^{++} -Si บนแผ่นฐานซิลิคอนและวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า
- 4) ทดลองและสร้างลวดลายโดยเทคนิคพิมพ์ลาย(Screen) เพื่อสร้างชั้น n^{++} บนแผ่นฐานซิลิคอนและวัดค่าเปรียบเทียบสองบริเวณ
- 5) ศึกษาวรรณกรรมและที่เหมาะสมสำหรับการแพร่ (Diffusion) ของสารเจือ Lightly dope และ Heavy dope และวัดด้วยเทคนิคการวัด 4-point probe ทวนซ้ำเติมจากงานวิจัย ในห้องปฏิบัติการ SUT
- 6) ทดลองและทบทวนวรรณกรรม การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้าง SE ให้ได้ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ผ่านการพิมพ์ลาย(Screen) Heavy dope และ เซลล์โครงสร้างมาตรฐาน
- 7) ศึกษาการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ด้วยวิธีการพิมพ์ลาย(Screen) ให้เหมาะสมกับการแพร่ และใช้การ Fast Firing เพื่อใช้ทำขั้วโลหะในห้องปฏิบัติการ SUT
- 8) ศึกษาการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE และ LBSF ด้วยวิธีการพิมพ์ลาย(Screen) และ ประทับลาย (Stamp) ให้เหมาะสมกับการแพร่ และใช้การ Fast Firing เพื่อใช้ทำขั้วโลหะในห้องปฏิบัติการ SUT
- 9) วัดและวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบโครงสร้างรวมกันของ SE และ LBSF
- 10) สรุปผลการศึกษาและจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้องค์ความรู้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ และแนวทางในการปรับปรุงหรือเพื่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานให้สูงขึ้นจากโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ PER

- 2) ได้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์PERLออกมาด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำซึ่งอาจเป็นแนวทางในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป
- 3) ได้เผยแพร่บทความวิจัยระดับชาติ หรือนานาชาติ ตามภาพผนวก ข

1.6 รูปแบบการจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยการศึกษาวิทยานิพนธ์ทั้งหมด 6 บทดังนี้

บทที่ 1 ประกอบไปด้วยความสำคัญและที่มาของปัญหาในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตในการวิจัย วิธีดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการทำงานและองค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการทำงานของรอยต่อ p/n-Si ค่าต่างๆที่มีความสำคัญในเซลล์แสงอาทิตย์ การสูญเสียในเซลล์แสงอาทิตย์ การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโครงสร้างแบบ Selective Emitter แสงอาทิตย์ การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโครงสร้างแบบ Local Back Surface Field Solar Cell และ แหล่งสารเจือสำหรับการสร้างรอยต่อ p/n-Si ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 3 การสร้างชั้นฟิล์ม ARC ในระดับอุตสาหกรรม ขั้นตอนการเตรียม PSG เพื่อเป็นแหล่งสารเจือฟอสฟอรัสให้กับ SE cell การแพร่สารเจือด้วยความร้อน (Thermal Diffusion) และการสร้าง SE cell ด้วยเทคนิคการประทับลาย การเตรียมสารละลายกรดเพื่อประทับลายช่องเปิดให้กับโครงสร้าง LBSF cell เครื่องมือการวิเคราะห์เพื่อหาผลทางแสงบนชั้นฟิล์มที่สร้างขึ้น การทำขั้วไฟฟ้าโดยใช้ความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว การวิเคราะห์หาผลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น อุปกรณ์ เครื่องมือวัดที่ใช้ดูการแพร่ของขั้วโลหะเข้าไปในโครงสร้างช่องเปิดที่สร้างขึ้น และการผลิตโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆในงานวิจัย โดยแบ่งเป็น 4 โครงสร้าง คือ โครงสร้างมาตรฐาน STANDARD cell โครงสร้าง SE cell โครงสร้าง LBSF cell และโครงสร้างแบบ ผสมผสาน SE and LBSF cell

บทที่ 4 การทดสอบวัดและวิเคราะห์ผลทางแสง ทางไฟฟ้า ของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น ผลการวิเคราะห์บนชั้นฟิล์มเพื่อหาค่าความต้านทานที่เหมาะสมในงานวิจัย การวิเคราะห์ผลลวดลายช่องเปิดที่สร้างขึ้นจากการเปิดช่องด้วยเทคนิคการประทับลายด้วยโคมโพลีอิมาย และผลของการสกัดชั้น ARC โดยทำการแช่ชิ้นงานในสารละลายกรดเพื่อวิเคราะห์หาเงื่อนไขค่าความเหมาะสมโดยชั้น PSG เกิดบนพื้นผิวด้านหน้าและ BSG เกิดบนพื้นผิวด้านหลังก่อนจะทำการแพร่ของ

อคูมึเนียมที่ช่องเปิดด้านหล้งและเงินที่ด้านหน้าเข้าในในชันงาน และ วัตผลทางไฟฟ้าของโครงสร้าง 4 โครงสร้างที่สร้างชัน

บทที่ 5 ได้กล่าวถึง การวิเคราะห์หาต้นทุนและความคุ่มค่า เปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตที่ใช้ ในเชิงพาณิชย์ และ ต้นทุนที่ใช้ในแลปวิจัย เพื่อหาค่าความคุ่มค่าต่อไป

บทที่ 6 สรุปการทดลองทั้งหมดที่ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้ รวมถึงข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ (SE) และ สนามไฟฟ้าบางบริเวณที่ผิวด้านหลัง (LBSF) ได้มุ่งเน้นถึงวิธีการที่สามารถผลิตได้อย่างรวดเร็ว เหมาะกับการผลิตในเชิงพาณิชย์ รวมถึงการใช้เทคนิควิธีต้นทุนต่ำ ในบทนี้ได้กล่าวถึง ผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากการสืบค้นข้อมูลโดยใช้ฐานข้อมูลออนไลน์ และ วารสารอิเล็กทรอนิกส์ ได้นำมาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ และนำมาปรับใช้กับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Greenblatt, A.M. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 1994) ได้ศึกษากระบวนการเกิดโซล-เจล ของซิลิกา-เจล (Sol-gel of Silica-gel) ที่ได้จากสารละลาย Tetraethyl orthosilicate (TEOS) จากงานวิจัยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดโซล-เจล มีอยู่ 2 ประเภท คือ เติมกรด (Acid) หรือ เบส (Base) ลงไปในสารละลายที่เตรียมให้เกิดปฏิกิริยาโดยผลที่ได้หากเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะได้โซล-เจลที่เกาะเกี่ยว เป็นสาย (Polymerization) และในทางกลับกันถ้าเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเบสจะได้โซล-เจลที่ลักษณะเป็นรูพรุน โดยอัตราส่วนผสมของโซล-เจล ที่สร้าง ประกอบไปด้วย TEOS , เอทานอล (Ethanol) และน้ำ (DI water) ในอัตราส่วน TEOS : Ethanol : DI water เท่ากับ 1 : 2 : 0.3

Aberle, A.G. (ปี ค.ศ. 2000) กล่าวถึงการสร้างชั้นฉนวนบนผิวหน้า (Surface passivation) ของเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง รวมไปถึงการเปิดช่องที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อลดผลของอัตราการรวมตัวใหม่ที่ผิว โครงสร้างซีเลคทีฟ (Selective) ทั้งด้าน n-Si (high-low junction) และด้าน p-Si (high-low junction) ซึ่งโครงสร้างซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ (SE) ด้านบนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนความยาวคลื่นสั้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเพิ่มขึ้น

Antoniadis, H. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2010) ได้ศึกษาการสร้าง SE cell ด้วยหมึกซิลิคอน (Silicon ink) โดยใช้เทคนิคการพิมพ์ลาย (Screen printing) ซึ่งหมึกซิลิคอนประกอบด้วยผงซิลิคอนขนาดเล็กระดับนาโนที่ผ่านการแพร่สารเจือในเข้มข้นสูง ๆ โดยนำหมึกซิลิคอนไปพิมพ์ลาย (Stamp) ได้ ขั้วไฟฟ้าด้านบนเพื่อให้เกิดการแพร่ของสนามไฟฟ้าที่ดี จากการสร้าง SE cell ด้วยเทคนิควิธีนี้ ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพได้ถึง 19%

Röder, T.C. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2010) ได้ศึกษาการสร้าง SE cell โดยการปรับปรุงด้วยวิธีการใช้เลเซอร์ทำการแพร่สารเจือ (Laser doping) บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าด้านบน ซึ่งแสงเลเซอร์ที่ใช้มีความยาวคลื่นเท่ากับ 532 nm ความถี่ของสัญญาณพัลส์มีค่าเท่ากับ 20 kHz และใช้ระยะเวลาเท่ากับ 65 ns ซึ่งชั้น n-Si มีค่า ρ_{sheet} เท่ากับ 110 Ω/Sq และชั้น n-Si บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นด้วยแสงเลเซอร์มีค่า ρ_{sheet} เท่ากับ 11 Ω/Sq จากการสร้าง SE cell ด้วยเทคนิควิธีดังกล่าวจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพ 18.0%

Tang, Y. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2011) ได้ศึกษาการเตรียมสารละลายสำหรับการแพร่สารเจือเพื่อสร้างชั้น n-Si บนแผ่นฐานซิลิคอนชนิด p-Si ด้วยวิธีเคลือบสารละลายแบบหมุนเหวี่ยง (Spin-on doping method, SOD) สารละลายประกอบไปด้วย Tetraethyl orthosilicate (TEOS), น้ำ (DI water) และเอทานอล (Ethanol) ในอัตราส่วน TEOS : Ethanol : DI water เท่ากับ 10 : 20 : 3 หลังจากนั้นเติมกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid, H₃PO₄) ในอัตราส่วนระหว่าง TEOS : H₃PO₄ โดยศึกษาอุณหภูมิการแพร่ที่ 750 ถึง 950 °C และ ใช้เวลาการแพร่ 10 ถึง 120 นาที จากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าความเข้มข้นของ H₃PO₄ ระหว่าง 1.5 : 1 ถึง 6 : 1 ส่งผลกับค่า ρ_{sheet} ให้ค่าอยู่ระหว่าง 1 Ω/Sq ถึง 1000 Ω/Sq ผลที่ได้ซึ่งเมื่อใช้อุณหภูมิต่ำจะทำให้ค่า ρ_{sheet} สูงขึ้น

Lee, E. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2011) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพ SE cell โดยใช้หน้ากากชั้นออกไซด์ เพื่อป้องกันการแพร่สารเจือลงในบริเวณที่ไม่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ชั้นป้องกันการแพร่โดยเปิดช่องบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าและแพร่ให้ได้ค่า ρ_{sheet} อยู่ในช่วง 20-30 Ω/Sq หลังจากนั้นทำการล้างสกัดชั้นออกไซด์แล้วสร้างหน้ากากครั้งที่ 2 เพื่อเปิดช่องแพร่สารเจือเข้มข้นต่ำลงบนชั้นรับแสงให้ได้ค่า ρ_{sheet} อยู่ในช่วง 80-100 Ω/Sq การสร้างหน้ากากนี้อาศัยกระบวนการสร้างลวดลายด้วยแสง (Photolithography process) จากการสร้าง SE cell ด้วยเทคนิควิธีดังกล่าวจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพ 19.0%

Jäger, U. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2011) ได้ศึกษาประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum Efficiency, QE) ของการแพร่สารเจือเข้มข้นสูงสำหรับ SE cell จากงานวิจัยได้ทำการแพร่สารเจือเข้มข้นสูง ให้ค่า ρ_{sheet} มีค่าอยู่ในช่วง 19 Ω/Sq ถึง 26 Ω/Sq จากนั้นทดสอบประสิทธิภาพทางควอนตัมพบว่าที่ค่า ρ_{sheet} ที่ 19 Ω/Sq ให้ค่า QE ต่ำที่สุดซึ่งจะส่งผล ให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่คลื่นแสงสีน้ำเงินได้ต่ำ และเมื่อเพิ่มค่า ρ_{sheet} ทำให้ QE เพิ่มขึ้น แสดงถึงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่คลื่นแสงสีน้ำเงินเพิ่มขึ้น

Song, K. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2012) ได้ศึกษาการสร้าง SE cell ด้วยวิธีการสกัดชั้น n-Si (Etch barrier or Etching back) ด้วยสารเคมี โดยใช้ กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) และกรดไนตริก (Nitric Acid) มีอัตราส่วนระหว่าง HF : HNO₃ เท่ากับ 200 : 1 และ 100 : 1 จากนั้น

นำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการแพร่สารเจือมีค่า p sheet เท่ากับ $30 \Omega/\text{Sq}$ มาแช่ในสารละลาย HF : HNO_3 ตามเวลาที่กำหนด พบว่าเมื่อเวลาการสกัดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า p sheet เพิ่มขึ้น และโครงสร้างของพื้นผิวที่ถูกสกัดมีลักษณะเรียบเหมือนกับแผ่นฐานที่ยังไม่ผ่านกระบวนการสกัดพื้นผิว

Zhong, S. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2013) ได้ศึกษาการสร้าง SE cell จากสารละลายฟอสฟอรัส (Phosphorus ink) พิมพ์ลายลงบนแผ่นฐานซิลิคอนชนิด p -Si บนบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้า จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการแพร่สารเจือทำให้บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้ามีค่า p sheet เท่ากับ $30 \Omega/\text{Sq}$ และบริเวณรับแสงมีค่า p sheet เท่ากับ $70 \Omega/\text{Sq}$ จากการสร้าง SE cell ด้วยเทคนิควิธีนี้ ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพได้ถึง 19.1%

Kim, M. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2014) ได้ศึกษาการใช้เลเซอร์และการสกัดชั้น n -Si เพื่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง โครงสร้าง SE cell ในงานวิจัยนี้สร้างชั้น n -Si บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้า (n^{++} -Si) โดยการใช้เลเซอร์ยิงลงบนบริเวณดังกล่าวให้มีค่า p sheet เท่ากับ $40 \Omega/\text{Sq}$ ให้มีค่า p sheet เท่ากับ $32 \Omega/\text{Sq}$ ที่บริเวณ SE จากนั้นนำไปจุ่มสารละลายเพื่อสกัดชั้นรับแสงให้มีค่า p sheet เท่ากับ $120 \Omega/\text{Sq}$ ซึ่งจากการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีดังกล่าว SE cell สามารถมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานถึง 19.2%

Lin, D. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2014) ได้ศึกษาการสร้างสนามไฟฟ้าด้านหลังบางบริเวณ โดยการใช้สารละลายโบรอน แล้วแพร่สารโดยการใช้แสงเลเซอร์ เพื่อให้เกิด p^{++} -Si จากนั้นสร้างบริเวณ SE โดยการเคลือบสารละลายฟอสฟอรัส แล้วแพร่สารเจือด้วยแสงเลเซอร์ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แสงเลเซอร์ที่มีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 15 วัตต์ ใช้แสงความยาวคลื่น 404 nm ความเร็วในการเคลื่อนที่ 0.5 m/s สำหรับการแพร่โบรอนด้านหลัง และแสงเลเซอร์ที่มีกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 15 วัตต์ ใช้แสงความยาวคลื่น 981 nm ความเร็วในการเคลื่อนที่ 4.0 m/s สำหรับการแพร่ฟอสฟอรัส ด้วยโครงสร้าง SE cell ที่สร้างขึ้นนี้ทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงถึง 20.0%

Jeong, K.T. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2014) ได้ศึกษาการสร้าง SE cell โดยการใช้สารละลายฟอสฟอรัสพิมพ์ลายลงบนแผ่นซิลิคอน p -Si ที่บริเวณก่อนทำขั้วไฟฟ้า จากนั้นผ่านกระบวนการแพร่สารเจือ 3 ขั้นตอนประกอบด้วย ที่ 840°C นาน 15 นาที เพื่อแพร่สารเจือเข้มข้นสูงที่บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าจะเกิดเป็นบริเวณ Heavily doped area และปล่อยให้อุณหภูมิลดลง จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอน Pre-deposition ที่ 790°C นาน 20 นาที และขั้นตอน สุดท้ายที่ 810°C นาน 10 นาที เป็นขั้นตอนของการแพร่สารเจือเข้มข้นต่ำ ที่บริเวณรับแสง Lightly doped area ให้มีค่า p sheet เท่ากับ $100 \Omega/\text{Sq}$ และบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าค่า p sheet ประมาณ $50 \Omega/\text{Sq}$ ซึ่งการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นี้มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่ 17.4%

Dullweber, T. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2016) ได้ศึกษามลของกระแสอัมมิตัวที่เท่ากับ

22 fA/cm² เพื่อประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ PERC ในอุตสาหกรรม ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 22 % โดยใช้วิธีการสร้างด้วยวิธี Gas Phase Etch Back (GPEB) ในการสกัดบริเวณรับแสงที่มีความเข้มข้นของสารเจือสูง จะได้ค่า ρ_{sheet} เท่ากับ 150 Ω/Sq จากการสร้างเซลล์ในบทความนี้จะได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง

Pene,H. และคณะผู้วิจัย (ปีค.ศ.2014) ศึกษาการสร้างสารละลายโซล-เจลที่ประกอบด้วยฟอสฟอรัสและโบรอนแบบฟิล์มบาง สำหรับการแพร่สารเจือโครงสร้าง n⁺/p และ n⁺/p/p⁺ โดยใช้ Tetramethoxysilane (TEOS), Isopropanol และ H₃PO₄ เป็นสารตั้งต้น ทาการเคลือบสารด้วยเทคนิคการหมุนเหวี่ยงและแพร่สารที่อุณหภูมิ 800-1000°C โดยพบว่าค่าความต้านทานแผ่นอยู่ระหว่าง 8-200 $\Omega/sheet$ ซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งสารเจือสำหรับโครงสร้าง n⁺⁺ และ n⁺ และ p⁺ และ p⁺⁺ ที่จะสร้างขึ้นในงานวิจัยได้

Ikeda, T. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ.2016) ศึกษาการสร้าง Local back surface field ด้วยเทคนิค Laser doping ที่ด้านหลังของแผ่นเซลล์และทาการพิมพ์ลายโลหะอลูมิเนียมเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่ง BSF ที่สร้างจะช่วยให้การลดการรวมตัวใหม่ที่พื้นผิว ทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงถึง 19.2%

Cacciato และคณะผู้วิจัย (ปีค.ศ.2013) ได้ทำการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERL ในระดับอุตสาหกรรม โดยการใช้เทคนิค laser เปิดช่องสร้างลวดลายบนชั้นฉนวนไดอิเล็กทริกที่ด้านหลัง สำหรับการสร้างโครงสร้างแบบ LBSF ซึ่งได้เซลล์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงกว่าเซลล์ที่เป็น Al-BSF ประมาณ 1%

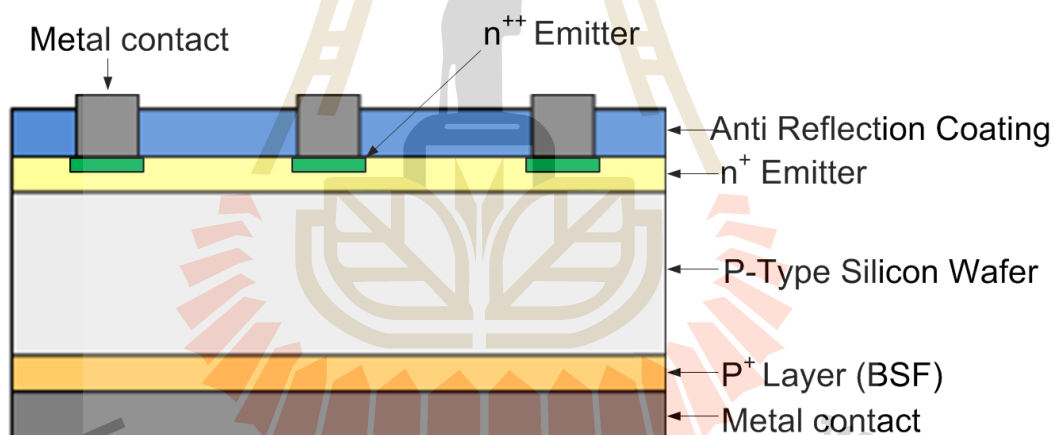
Singh, V. และคณะผู้วิจัย (ปีค.ศ. 2014) ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Back surface field โดยใช้กรดเป็นแหล่งสารเจือด้วยเทคนิคการ (Spin on dopant: SOD) พบว่า BSF Film ที่สร้างขึ้น จะช่วยลดการรวมตัวของพาหะที่ผิวด้านหลัง ทำให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นมากกว่า Aluminum BSF เป็น 12.9% โดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้อีกจากการเพิ่มชั้นป้องกันการสะท้อนแสงที่ด้านหน้าและด้านหลัง

Phiwpha, N. (ปี ค.ศ. 2013) ได้ศึกษาการฉีดยาไฮโดรฟลูออริก (HF) เพื่อสร้างลวดลายโครงสร้างแบบ Local back surface field (LBSF) บน SiO₂ ลงบนแผ่นฐานซิลิคอน เพื่อเป็นชั้นพาสซีเวชันที่ด้านหลัง และทา การแพร่ซีมอะลูมิเนียมผ่านบริเวณช่องของ SiO₂ ที่ถูกเปิด เกิดเป็น p⁺-Si ซึ่งเป็นสนามไฟฟ้าที่ผิวรอยต่อขึ้น โดยให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 14.64% ซึ่งสูงกว่าเซลล์โครงสร้างมาตรฐานถึง 1.66%

Armel, D.P. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2014) ศึกษาการสร้างระบบโซลเจล (Sol-gel) ที่ประกอบด้วยฟอสฟอรัสและโบรอนแบบฟิล์มบาง สำหรับการแพร่สารเจือโครงสร้าง n^+/p และ $n^+/p/p^+$ โดยใช้ Tetraethyl orthosilicate (TEOS), Isopropanol (IPA) และ Phosphoric acid (H_3PO_4) หรือ Boric acid (H_3BO_3) เป็นสารตั้งต้น ทำการเคลือบสารด้วยเทคนิคการหมุนเหวี่ยง (Spin coater) และเข้ากระบวนการแพร่ที่อุณหภูมิ 850 – 1000 °C โดยพบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นอยู่ระหว่าง 8 – 200 Ω/Sq ซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งสารเจือสำหรับโครงสร้าง n^+/p และ $n^+/p/p^+$ ได้

2.3 องค์ประกอบและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในปัจจุบันแบ่งได้ตามโครงสร้างของผลึกซิลิกอนได้ 3 ชนิด คือ ผลึกเดี่ยว (mono-crystalline), ผลึกหลายรูป (multi-crystalline, mc-Si) และ อะมอร์ฟัส (amorphous) โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาโครงสร้างผลึกแบบหลายรูป เพราะมีราคาถูกกว่าผลึกเดี่ยว และมีการพัฒนาต่อยอดและใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเซลล์แสงอาทิตย์อย่างแพร่หลาย



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบหลังของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อ p/n

2.3.1 ชั้นป้องกันการสะท้อนแสง เป็นชั้นฟิล์มบางที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดการสะท้อนแสงกลับที่ผิวน้อยที่สุด โดยวัสดุที่นิยมนำมาใช้งาน ได้แก่ ซิลิคอนออกไซด์ (SiO_2), ซิลิคอนไนไตรด์ (SiN_x) หรือ ซิลิคอนออกซิไนไตรด์ (SiO_xN_y) โดยอาจทำการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนแสงจากวัสดุต่างชนิดกันหลายๆ ชั้นได้ (Multilayer) ซึ่งจะช่วยลดการสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นกว้างกว่าการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนแสงเพียงชั้นเดียว

2.3.2 ชั้นผิวขรุขระรูปทรงพีระมิดหัวตั้ง เป็นชั้นที่เพิ่มพื้นที่ผิวรับแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ให้เกิดการแปลงผันพลังงานได้สูงขึ้น

2.3.3 ชั้นรอยต่อพีเอ็นของวัสดุสารกึ่งตัวนำ เพื่อให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นภายในบริเวณรอยต่อ ทำให้มีอิเล็กตรอนและโฮลที่ผลิตจากพลังงานแสงเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าด้านบนและด้านล่าง เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า โดยความลึกของชั้นรอยต่อประมาณ $0.5-1.5 \mu\text{m}$ เพื่อให้แสงทะลุลงบริเวณรอยต่อ และสามารถดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง $480-600 \text{ nm}$ ที่ให้ความเข้มแสงสูงสุด

2.3.4 แผ่นฐานซิลิคอน โดยทั่วไปมีความหนาประมาณไม่เกิน $300 \mu\text{m}$ และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นไม่เกิน $10 \Omega/\text{Sq}$

2.3.5 ชั้น Back surface field (BSF) เกิดจากความแตกต่างของสารเจือในชั้นพี ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำและขั้วโลหะไฟฟ้า เป็นผลให้เกิดระยะทางในการแพร่พาหะสูง ทำให้ช่วงอายุของพาหะยาวขึ้น

2.3.6 ขั้วโลหะไฟฟ้าด้านหลังรับแสงจะมีลักษณะเป็นลายกริด เพื่อไม่ให้บังการรับแสง และได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ซึ่งรวบรวมอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น ส่วนขั้วไฟฟ้าโลหะด้านหลังจะมีการเคลือบแบบเต็มพื้นที่ผิว สำหรับรวบรวมโฮลและยังช่วยเพิ่มโอกาสการสะท้อนแสงกลับเข้าสู่ภายในเซลล์

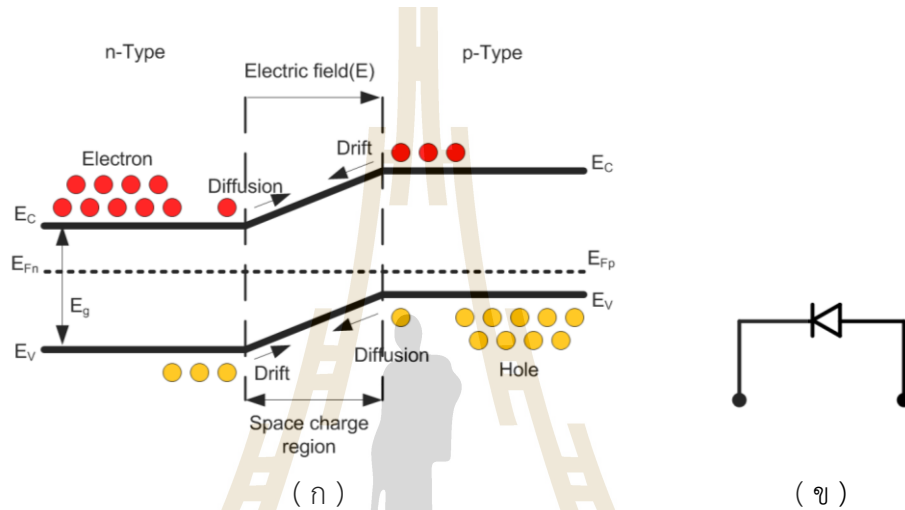
2.4 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si

เมื่อวัสดุสารกึ่งตัวนำ รอยต่อ p/n-Si มีกลไกการทำงานแบ่งเป็นสองกรณี คือ เมื่อได้รับแสง จะเกิดปรากฏการณ์สามารถแปลงพลังงานแสงตกกระทบให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงดังนั้นในปัจจุบันจึงนิยมนำสารกึ่งตัวนำรอยต่อ p/n-Si มาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนกับไดโอด (Diode) เป็นโครงสร้างรอยต่อ p/n-Si โดยเติมสารเจือหมู่ 3 ที่ชั้น p-Si และหมู่ 5 ที่ชั้น n-Si เพื่อให้เกิดประจุที่รอยต่อหลอดพาหะ และพาหะโฮลและอิเล็กตรอนที่ชั้น p-Si และ n-Si ตัวอย่างเช่น เมื่อเติมธาตุสารเจือฟอสฟอรัส (P) ลงในธาตุหลัก ซิลิคอน (Si) จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนพาหะข้างมาก ซึ่งเรียกอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส นี้ว่าอะตอมผู้รับ (Donor) และเรียกสารกึ่งตัวนำว่าสารกึ่งตัวนำชนิด (n-type) ในกรณีเดียวกันถ้าหากเติมธาตุสารเจือโบรอน (B) ลงในธาตุหลัก ซิลิคอน (Si) จะทำให้เกิดโฮลเป็นพาหะข้างมาก เรียกว่าสารกึ่งตัวนำ ชนิด p-Si ดังนั้นเมื่อนำวัสดุสารกึ่งตัวนำ รอยต่อ p/n-Si มาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แล้วสามารถพิจารณาได้ 2 กรณี

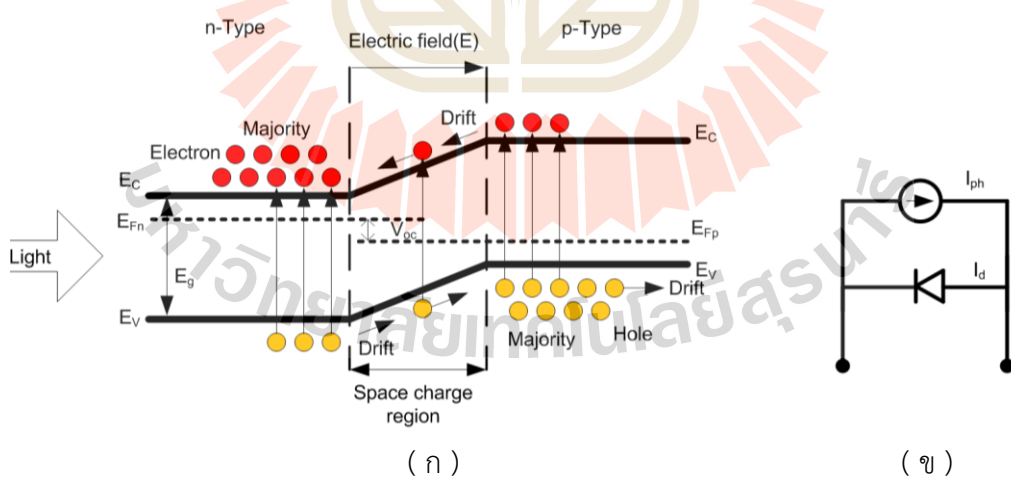
2.4.1 การทำงานในสภาวะมืด (Dark state)

เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างรอยต่อ p/n-Si ที่อยู่ในสภาวะมืดหรือสภาวะสมดุล (Equilibrium) กล่าวคือผลรวมของโฮลและอิเล็กตรอน มี ค่าเท่ากับศูนย์ แสดงแถบพลังงานดังรูป 2.2 จากรูปรอยต่อ p/n-Si ภายใต้ที่มีดันทันมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่รอยต่อ ทำให้เกิดกำแพงศักย์ต่อต้านการเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อพาหะอิเล็กตรอนและโฮลจึงทำให้เกิดสภาวะสมดุลขึ้น เนื่องมาจาก

การแพร่ (Diffusion) ของอิเล็กตรอนด้าน n-Si ไปด้าน p-Si เท่ากับการพัดพา (Drift) ในสนามไฟฟ้าภายใน ดังที่กล่าวมาข้างต้น และการแพร่ของโฮลจากด้าน p-Si ไปด้าน n-Si เท่ากับการพัดพา (Drift) ในสนามไฟฟ้าภายใน ซึ่งการแพร่และการพัดพาทั้งสองมีทิศทางตรงกันข้าม จึงทำให้กระแสรวมของอิเล็กตรอนและโฮลนั้นมีค่าเป็นศูนย์ และการกระจายตัวของพาหะข้างน้อยแต่ละด้านของอุปกรณ์รอยต่อ p/n-Si ภายใต้อิทธิพลแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 (ก) กลไกการเดินทางของพาหะในแถบพลังงานของรอยต่อ p/n-Si ที่ภายใต้สภาวะมืด และ (ข) วงจรสมมูลไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะมืด



รูปที่ 2.3 (ก) กลไกการเดินทางของพาหะในแถบพลังงานของรอยต่อ p/n-Si ที่ภายใต้สภาวะสว่าง และ (ข) วงจรสมมูลไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะสว่าง

2.4.2 การทำงานในสภาวะสว่าง(Luminate stage)

เมื่อมีแสงตกกระทบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีพลังงานแสงหรือพลังงานโฟตอนมากกว่าหรือเท่ากับแถบพลังงานช่องว่าง (Energy band gap, E_g) ของวัสดุสารกึ่งตัวนำ จะเกิดการผลิตคู่พาหะอิเล็กตรอนและโฮลส่วนเกิน (Excess carriers) ในวัสดุขึ้น ทำให้ที่รอยต่อ p/n-Si อยู่ในสภาวะไม่สมดุล (Non-equilibrium) เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นจากพลังงานโฟตอนนั้นเคลื่อนที่แบบพัดพา (Drift) ในสนามไฟฟ้า ทำให้อิเล็กตรอนส่วนเกินที่ผลิตได้ในชั้น p-Si เดินทางข้ามรอยต่อนี้ไปชั้น n-Si ไปรวมรวมกับอิเล็กตรอนในชั้น n-Si เพื่อเคลื่อนที่ไปยังขั้วโลหะภายใต้อิทธิพลของการพัดพาในสนามไฟฟ้า เกิดกระแสอิเล็กตรอนแบบพัดพาที่มีค่าเพิ่มขึ้นส่วนกระแสโฮลมีการเกิดในลักษณะเช่นเดียวกัน ซึ่งเดินทางสวนทางกับกระแสอิเล็กตรอน ดังนั้นในสภาวะที่ไม่สมดุลนี้จึงเกิดระดับพลังงานเฟอร์มิของทั้งสองด้านต่างกันเท่ากับ V_{OC} แสดงกลไกการเดินทางของพาหะได้ในรูปที่ 2.3 อย่างไรก็ตาม ในกลไกดังกล่าวยังมีปริมาณกระแสไฟฟ้าไดโอด (I_D) ที่เกิดจากกลไกการแพร่ (Diffusion) จากพาหะส่วนมาก (Majority carriers) ของแต่ละด้านพยายามข้ามรอยต่อมาอีกด้านหนึ่ง ทำให้กระแสไดโอดมีปริมาณน้อยและมีทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสส่วนเกินที่ได้รับการกระตุ้นจากแสงเรียกกระแสไดโอดนี้ว่า กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (I_0)

2.5 ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อมีแสงตกกระทบบเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดการสร้างคู่พาหะอิสระ หรือเรียกว่าพาหะที่เกิดจากพลังงานโฟตอน และที่บริเวณรอยต่อพีเอ็นจะเกิดการสะสมประจุบวกและลบ เรียกว่า Space charges region หรือสนามไฟฟ้าภายในเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อพัดพาโฮลและอิเล็กตรอนให้เดินทางไปยังขั้วไฟฟ้าแต่ละด้าน กระแสจากคู่พาหะที่ผลิตได้จากโฟตอนมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสไดโอด แสดงกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ในสมการที่ (1) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหล (I) และแรงดันไฟฟ้า (V) แสดงในรูปที่ 2.4

$$I = I_D - I_L = I_0 \left(e^{\frac{qV_{OC}}{kT}} - 1 \right) - I_L \quad (1)$$

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟารวมที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น A

I_D คือ กระแสไฟฟ้าจากความเป็นไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น A

I_L คือ กระแสโฟตอนหรือกระแสที่ผลิตได้จากแสงตกกระทบบ มีหน่วยเป็น A

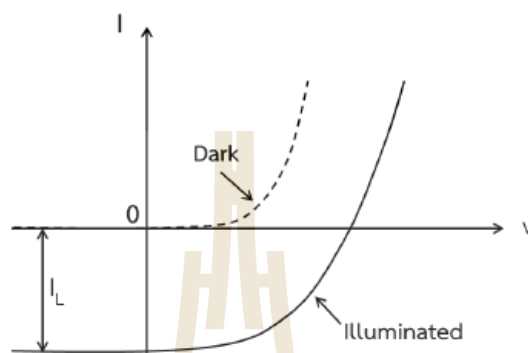
I_0 คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse saturation current) ของไดโอด มีหน่วยเป็น A

q คือ ค่าคงที่ของประจุไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

V_{oc} คือ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร มีหน่วยเป็น V

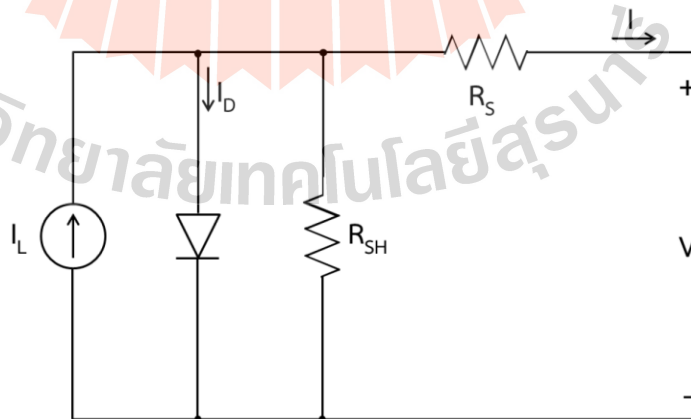
k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} J/K

T คือ อุณหภูมิในหน่วย Kelvin (K)



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหล (I) และแรงดันไฟฟ้า (V) ภายใต้สภาวะมืดและสภาวะสว่าง

เมื่อทำการเปิดวงจรไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงขึ้นที่ขั้วทั้งสอง และเซลล์แสงอาทิตย์จะมีความต้านทานไฟฟ้าภายในเกิดขึ้น 2 ชนิด คือ ความต้านทานอนุกรม (R_s) ที่เกิดจากความต้านทานไฟฟ้าของเนื้อผลึกและบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำและขั้วโลหะไฟฟ้า และความต้านทานขนาน (R_{sh}) ที่เกิดจากรอยต่อของชั้นพีและเอ็นภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลไฟฟ้าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์

กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit current, I_{SC}) เป็นค่าของกระแสไฟฟ้าสูงสุดเมื่อแรงดันไฟฟ้าลัดวงจรเป็นศูนย์ในสมการที่ (กล่าวก่อนหน้านี) จะได้ว่า $I_{SC} = I_L$ ในเงื่อนไขอุดมคติ สมมติให้พลังงานโฟตอนมีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ และสัมพันธ์กับความกว้างของ Space charge region ทำให้เกิดคู่พาหะอิเล็กตรอนและโฮล รวมกันเป็นกระแสไหลออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปสู่วงจรภายนอก โดยแสดงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในสมการที่ (2)

$$I_L = qAG(L_e + W + L_h) \quad (2)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดของเซลล์แสงอาทิตย์

G คือ อัตราการผลิตคู่พาหะอิเล็กตรอนและโฮล

L_e คือ ระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอน

L_h คือ ระยะทางการแพร่ของโฮล

W คือ ความกว้างของบริเวณสนามไฟฟ้าภายใน หรือ Space charges region

ดังนั้น เมื่อต้องการกระแสส่วนเกินที่ได้รับการกระตุ้นจากแสง (I_L) มากขึ้นอัตราการผลิตคู่พาหะอิเล็กตรอนและโฮล รวมทั้งระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลจึงจำเป็นต้องมีค่ามาก ถึงจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นได้แรงดันไฟฟ้าวงจรมีค่ามาก (Open circuit voltage, V_{OC}) เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด เมื่อกระแสเปิดวงจรมีค่าเป็นศูนย์จากสมการที่ (1) จะได้แรงดันไฟฟ้าวงจรมีค่า ดังสมการที่ (3)

$$V_{OC} = \frac{nKT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (3)$$

ฟิลแฟกเตอร์ (Fill factor, FF) เป็นตัวบ่งบอกคุณภาพของรอยต่อ p/n-Si หรือบ่งบอกถึงผลกระทบของค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) และความต้านทานขนาน (R_{sh}) ที่ส่งผลถึงคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยฟิลแฟกเตอร์แสดงในสมการที่ (4)

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (4)$$

โดยที่ V_{MP} คือ แรงดันไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด มีหน่วยเป็น V

I_{MP} คือ กระแสไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด มีหน่วยเป็น A

ในทางอุดมคติค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าเท่ากับหนึ่ง จากเทอมผลคูณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับเทอมผลคูณของแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและกระแสไฟฟ้าลัดวงจร แต่โดยทั่วไปฟิลแฟกเตอร์มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ซึ่งบ่งบอกถึงผลกระทบจากค่าความต้านทาน

ไฟฟ้าแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าต้องการให้ฟิลแพกเตอร์มีค่ามาก จำเป็นต้องศึกษาหาสาเหตุของผลกระทบต่อความต้านทานไฟฟ้าแสงในเซลล์แสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Energy conversion efficiency, η) เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าเข้าและกำลังไฟฟ้าออกโดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$\eta = \frac{V_{MP} \times I_{MP}}{P_{IN}} \times 100 \% \quad (5)$$

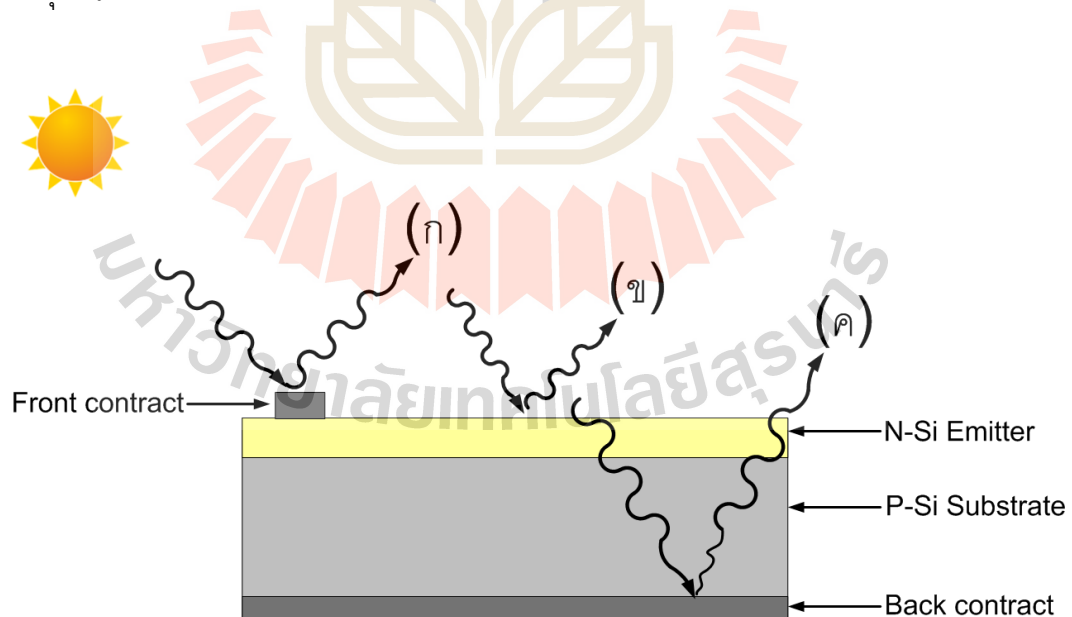
โดยที่ P_{IN} มีค่าเท่ากับ 1000 W/m^2 ที่แสงเทียมมาตรฐานแสง AM 1.5

ในปัจจุบัน ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนที่ผลิตในภาคอุตสาหกรรมมีค่าประมาณ 18 - 22% ซึ่งพลังงานแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์บางส่วนถูกนำไปใช้ประโยชน์บางส่วนสูญเสียไม่ได้ใช้เป็นประโยชน์ เช่น แสงบางส่วนที่เกิดการสะท้อนกลับและแสงที่ทะลุผ่านทำให้ประสิทธิภาพถูกจำกัด จากปัจจัยของคุณสมบัติทางแสงของวัสดุผลึกซิลิคอน

2.6 การสูญเสียในเซลล์แสงอาทิตย์

การสูญเสียในเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งได้เป็นการสูญเสียทางแสง (Optical losses)

และการสูญเสียทางไฟฟ้า (electrical losses) แสดงในรูปที่ 2.6 โดยส่วนใหญ่จะเกิดจากสาเหตุดังนี้



รูปที่ 2.6 การสูญเสียทางแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) การบังแสงจากชั้นไฟฟ้าด้านบนผิวรับแสง (ข) การสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง และ (ค) การสะท้อนกลับที่ผิวด้านหลัง

2.6.1 การสูญเสียทางแสง

ขั้วโลหะไฟฟ้าบนผิวด้านรับแสงทำให้เกิดการบังแสงขึ้น แก้ไขโดยการลดขนาดและระยะห่างของขั้วโลหะไฟฟ้าให้เหมาะสม หรือใช้เทคนิคการฝังขั้วไฟฟ้าในร่องขนาดเล็กแทน เพื่อรวบรวมพาหะอิสระให้มากขึ้น

การสะท้อนแสงที่ผิวด้านรับแสงที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์เกิดจากค่าดัชนีการหักเหแสงของวัสดุและอากาศที่มีค่าต่างกัน จากหลักการของสเนลล์(Snell's law) จะมีมุมแสงตกกระทบค่าหนึ่งที่เราเรียกว่ามุมวิกฤติ จะทำให้เกิดการสะท้อนแสงกลับที่ผิวทั้งหมด วิธีการลดการสะท้อนแสงวิธีหนึ่ง คือ การเคลือบฟิล์มป้องกันการสะท้อนแสงที่มีค่าดัชนีหักเหแสงอยู่ระหว่างค่าดัชนีหักเหแสงของอากาศและซิลิคอน

การสะท้อนกลับที่ผิวด้านหลัง การทะลุผ่านของแสงที่มีย่านพลังงานโฟตอนต่ำกว่า E_g (1.1eV) ของวัสดุซิลิคอนเช่น แสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 1100 ถึง 1500 nm วัสดุซิลิคอนจะไม่สามารถดูดกลืนได้ ซึ่งความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์กับพลังงาน (eV) แสดงในสมการที่ (6)

$$E(eV) = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda(nm)} \quad (6)$$

โดยที่ h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ 6.626×10^{-34} Js

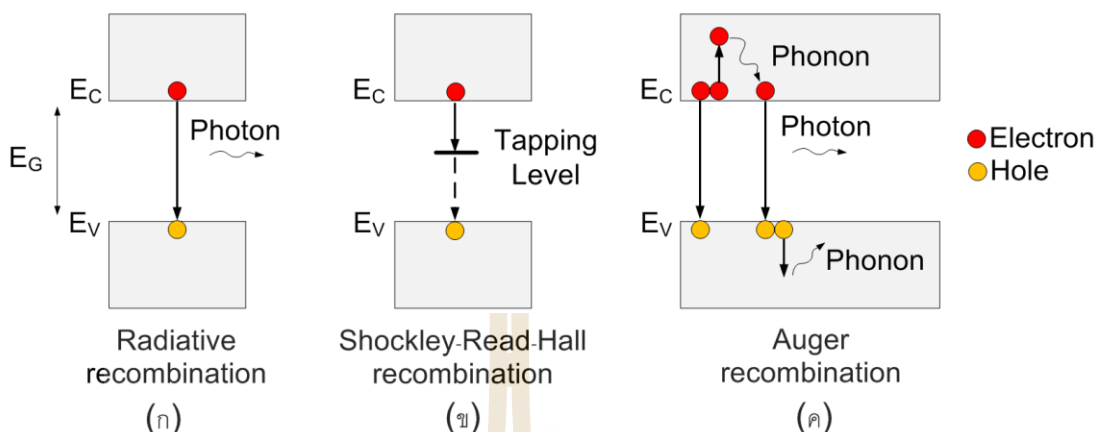
C คือ ค่าความเร็วของแสง 3×10^8 m/s

λ คือ ความยาวคลื่น หน่วยเป็น นาโนเมตร

อย่างไรก็ตาม ถ้าพลังงานโฟตอนมีค่ามากกว่า E_g มากเกินไป ในช่วงแสงตั้งแต่ช่วงแสงสีแดงจนถึงแสงสีน้ำเงิน จะทำให้เกิดพลังงานส่วนต่าง ซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานโฟนอน (Phonon) หรือความร้อนทำให้เกิดการสูญเสียของโครงสร้างผลึกของโซลาร์เซลล์ไม่สามารถนำพลังงานแสงช่วงดังกล่าวมาผลิตเป็นไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.6.2 การสูญเสียทางไฟฟ้า

การสูญเสียเนื่องจากการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ถูกกระตุ้น (Recombination) ก่อนที่จะออกสู่ภายนอกเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำให้กระแสไฟฟ้าจากการสร้างคู่พาหะอิเล็กตรอนและโฮลลดลง โดยกลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะมี 3 ชนิด โดยแสดงในรูปที่ 2.7 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.7 กลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะในแบบต่างๆ ของวัสดุสารกึ่งตัวนำ (ก)การรวมตัวใหม่แบบเปล่งแสง, (ข)การรวมตัวใหม่ที่ตำแหน่งบกพร่องและ (ค) การรวมตัวใหม่แบบออร์เจอร์

การรวมตัวใหม่แบบเปล่งแสง (Radiative recombination) เกิดขึ้นในวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง (Direct band gap) เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ เมื่ออิเล็กตรอนจากแถบคอนดักชัน (Conduction band) มารวมตัวกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ (Valence band) จะเกิดการปล่อยพลังงานในรูปของพลังงานแสงที่เท่ากับช่องว่างพลังงาน (Energy band gap) ของวัสดุในส่วนของซิลิคอนที่มีช่องว่างพลังงานแบบอ้อม (Indirect band gap) ซึ่งมีจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันในตำแหน่งโมเมนตัมไม่ตรงกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ จึงเกิดการรวมตัวใหม่แบบเปล่งแสงน้อย

การรวมตัวใหม่ที่ตำแหน่งบกพร่อง (Shockley-Read-Hall recombination) พบได้ทั้งภายในโครงสร้างผลึกและที่พื้นผิวของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ ซึ่งจุดบกพร่องจะเกิดเป็นสถานะดักจับ (Trapping level) บริเวณแถบกลางในช่องว่างพลังงาน แต่ถ้าจุดบกพร่องอยู่ใกล้ขอบของแถบพลังงาน โอกาสของการรวมตัวใหม่นี้จะลดลง

การลดการรวมตัวใหม่ จึงต้องสร้างประจุไฟฟ้า เพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวขึ้น โดยประจุไฟฟ้าสร้างได้ 2 วิธีคือ การสร้างชั้นรอยต่อที่มีความเข้มข้นของสารเจือต่างกันและการสร้างชั้นฉนวนบางๆ เพื่อเป็นที่รวบรวมประจุ (Fixed charges) เกิดประจุภายใต้ชั้นฉนวน

การรวมตัวใหม่แบบออร์เจอร์ (Auger recombination) เกิดได้มากที่สุดเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ โดยระหว่างที่อิเล็กตรอนตัวหนึ่งที่แถบคอนดักชันตกกลับมารวมตัวกลับโฮลที่แถบวาเลนซ์ ได้ไปชนกับอิเล็กตรอนหรือโฮลที่อยู่ด้านข้างอีกตัว ทำให้ได้อิเล็กตรอนหรือโฮลตัวนั้นได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจนโดดข้ามไปยังระดับพลังงานที่สูงกว่า และตกกลับลงมาที่ระดับพลังงานเดิม เกิดการคายพลังงานโฟนอนในรูปของพลังงานความร้อน ซึ่งพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น ทำให้โครงผลึกสั้น (Lattice

vibration) และเสีयरูป ทำให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานมีค่าจำกัด โดยทั่วไปจะเกิดในวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือสารเจือในปริมาณความเข้มข้นสูง

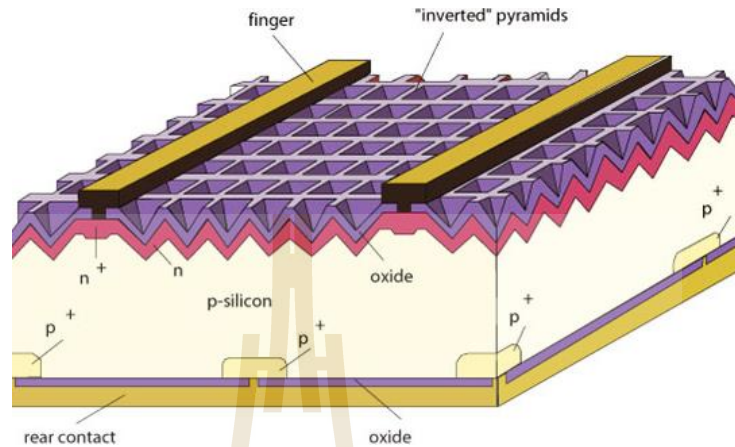
การลดการรวมตัวใหม่หรือการที่พาหะมีอายุการเดินทางที่ยาว จะทำให้เกิดการรวบรวมพาหะที่ชั่วไฟฟ้าได้มากขึ้น จึงผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้นและส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานดีขึ้น และยังมีการตัวแปรที่สำคัญ ที่มีส่วนทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการทำงานของโซลาร์เซลล์ ซึ่งก็คือ อุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะไม่ส่งผลต่อกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ ในขณะที่แรงดันไฟฟ้า จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วทุก ๆ การเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง 0.5% และใน กรณีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ มาตรฐานที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ คือ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เช่น กำหนดไว้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ มีแรงดันไฟฟ้าที่วงจรเปิด (Open Circuit Voltage , V_{oc}) ที่ 21 V ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ก็จะหมายความว่า แรงดันไฟฟ้าที่จะได้จากแผงแสงอาทิตย์เมื่อยังไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะเท่ากับ 21 V ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 25 องศาเซลเซียส เช่น อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จะทำให้แรงดันไฟฟ้าของ แผงแสงอาทิตย์ลดลง 5 % ($0.5\% \times 10$) นั่นคือ แรงดันของแผงแสงอาทิตย์ที่ V_{oc} จะลดลง 1.05 V ($21\text{ V} \times 5\%$) เหลือเพียง 19.95 V ($21\text{ V} - 1.05\text{ V}$) สรุปได้ว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แรงดันไฟฟ้าก็จะลดลง ซึ่งมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงแสงอาทิตย์ลดลงด้วย

2.7 การปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโครงสร้างแบบซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ (Selective Emitter Solar Cell)

การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถแบ่งได้จากปัจจัย 4 ส่วนหลักๆคือ

- 1.การสูญเสียการรวมตัวใหม่ของพาหะ (Recombination Loss) คือ การสูญเสียการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นในส่วนต่าง ๆ ของเซลล์ได้แก่ผิวเซลล์ทั้งด้านบนและด้านหลังบริเวณรอยสัมผัส
- 2.การสูญเสียจากความต้านทานแผง (Resistance Loss) คือ การสูญเสียจากความต้านทานแผงเกิดขึ้นจากความต้านทานภายในเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่ ค่า R_{SH} และ R_S ที่เกิดจากรอยต่อของอุปกรณ์นอกรอยต่อ p/n-Si
- 3.การสูญเสียที่เกิดจากการบดบัง (Shadowing Loss) คือ การสูญเสียที่เกิดจากการบังแสงของขั้วไฟฟ้าด้านรับแสง ที่บดบังพื้นที่รับแสง
- 4.การสูญเสียทางแสง (Optical Loss) คือ การสูญเสียทางแสง ที่เกิดจากแสงการสะท้อนแสงกลับที่ผิว (Reflectance, %R)

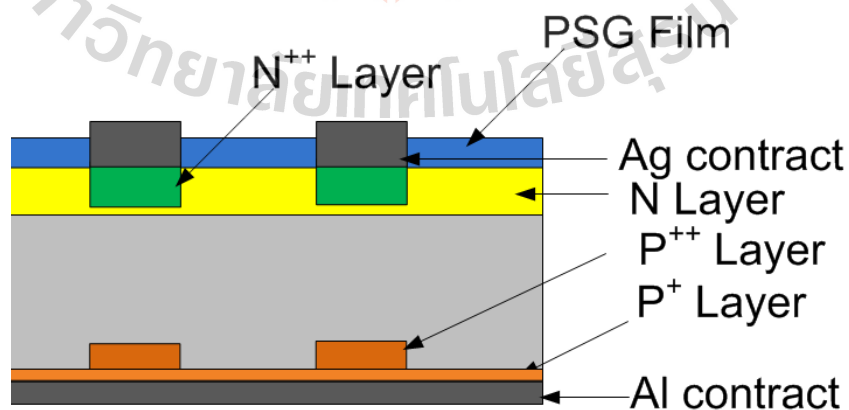
ถ้าสามารถลดปัจจัยเหล่านี้ก็จะสามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้เพิ่มสูงขึ้นได้



รูปที่ 2.8 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERC ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง 25%

(Prog. Photovolt: Res. Appl. 2009; 17:183–189)

รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้าง PERC (Passivated Emitter with Rear Locally diffused) ที่ให้ประสิทธิภาพสูง 25% ซึ่งประกอบด้วยการออกแบบเพื่อลดผลของการสูญเสียทั้ง 4 แบบ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อพิจารณาส่วนที่ลดการสูญเสียจากการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิวด้านบนหรือชั้น n-Si พบว่าชั้นรับแสงมีความเข้มข้นของสารเจือไม่เท่ากัน โดยที่บริเวณรับแสงมีความเข้มข้นสารเจือต่ำ (Lightly doped n-Si) ประมาณ $150\text{--}220 \Omega/\text{Sq}$ ส่วนบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้ากริดมีความเข้มข้นของสารเจือสูง (Heavily doped $n^{++}\text{-Si}$) ต่ำกว่า $50 \Omega/\text{Sq}$ ในบริเวณดังกล่าวนี้เราเรียกว่า SE จากการที่มีความหนาแน่นของสารเจือต่ำ เพื่อลดของการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ย่านพลังงานโฟตอนสูงหรือเพิ่มการดูดกลืนแสงสีน้ำเงินให้สูงขึ้นได้ เมื่อแสงสีน้ำเงินตกกระทบ และบริเวณที่ 2 เป็นบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า จากการที่มีความหนาแน่นของสารเจือสูง เพื่อให้สมบัติโอห์มมิกที่ดี



รูปที่ 2.9 โซลาร์เซลล์ที่มี โครงสร้างของ Selective Emitter Solar Cell ที่ด้านบน และ Local Back Surface Field Solar Cell ที่ด้านล่าง

2.8 การปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโครงสร้างแบบสนามไฟฟ้าบางบริเวณ(Local Back Surface Field Solar Cell)

หลักการเกิดสนามไฟฟ้าที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ ใช้หลักการแพร่ของอะลูมิเนียมจากขั้วไฟฟ้า ด้านหลัง เพื่อให้เกิดบริเวณ p^+-Si มีการใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 โดยปัจจุบันได้ใช้กระบวนการอบขั้วไฟฟ้าด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว (Fast firing) เพื่อให้เกิดบริเวณ p^+-Si ขึ้นใกล้กับพื้นผิวรอยสัมผัสระหว่างแผ่นฐาน $p-Si$ และขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม ซึ่งเรียกว่า Back Surface Field, BSF) ซึ่งจะทำการเปิดช่องเข้าไปเพื่อให้เกิดการแพร่ด้วยความร้อนสูง เกิดเป็นสนามไฟฟ้าแคบบางบริเวณขึ้นทำให้เกิด $p^{++}-Si$ ขึ้นหลักการทํางานคล้ายๆกับของซีเล็คทีฟพีเอ็มไอเตอร์ทำให้เกิดความต่างของบริเวณขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการรวบรวมกระแสพาหะเพิ่มขึ้นทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีปริมาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น

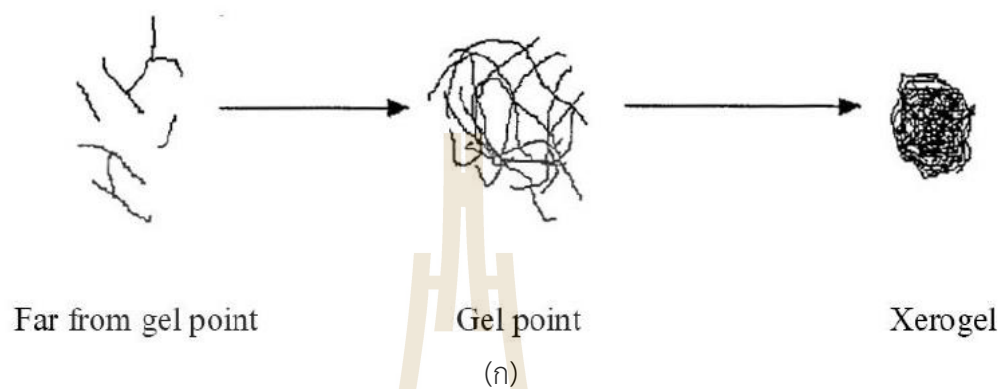
2.9 แหล่งสารเจือสำหรับการสร้างรอยต่อ $p/n-Si$ ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์

โดยทั่วไปแหล่งสารเจือที่ใช้สำหรับการสร้างรอยต่อ $p/n-Si$ มีอยู่ 3 ชนิด คือสารเจือที่อยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้สารประกอบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid, H_3PO_4) โดยมี สถานะเป็นของแข็ง โดยเตรียมได้จากการสังเคราะห์โซล-เจล (Sol-gel) ซึ่งข้อดีของการสังเคราะห์ Sol-gel คือสังเคราะห์ได้ง่าย สามารถกำหนดความเข้มข้นของอะตอมสารเจือได้ และมีราคาถูก

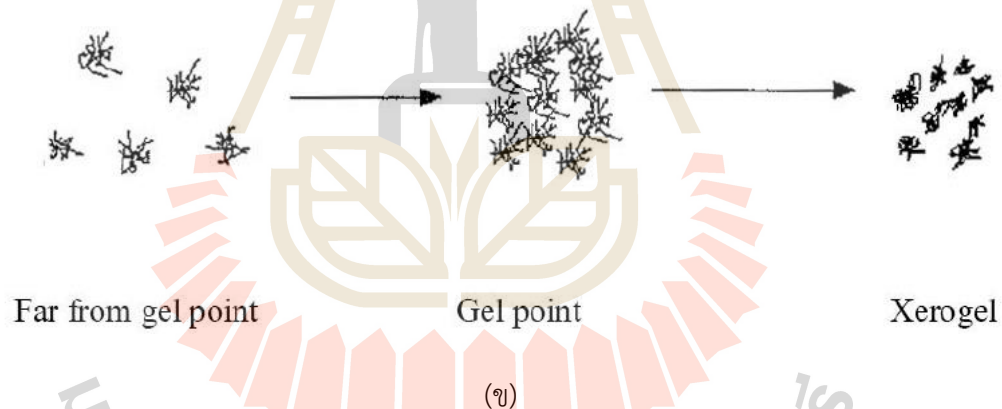
การสังเคราะห์ Sol-gel เพื่อเป็นแหล่งสารเจือสำหรับการแพร่ นั้นแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือ ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และ การควบแน่น (Condensation) ในการศึกษานี้ได้ใช้วิธีการสังเคราะห์ Sol-gel ด้วยวิธี Hydrolysis ซึ่งวิธี Hydrolysis คือปฏิกิริยาที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบเข้าไปสลายพันธะโมเลกุลใหญ่แต่กตัวเป็นสารโมเลกุลเล็ก ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สารละลาย (Tetraethyl Orthosilicate:TEOS) กับน้ำ DI เป็นสารตั้งต้น และใช้ C_2H_5OH (ETOH) เป็นตัวช่วยทำละลาย

เนื่องจากกระบวนการเกิด Sol-gel หรือกระบวนการ Polymerization นั้นใช้เวลานานจึงได้เติมตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysis) ลงไปในกระบวนการ เพื่อให้เกิดกระบวนการ Polymerization ได้เร็วขึ้น ซึ่งการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเลือกเติมได้ 2 ชนิด คือตัวเร่งชนิดที่เป็นแบบกรด (Acid-catalyzed) และแบบเบส (Base-catalyzed) โดยการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับการใช้งาน ซึ่งความแตกต่างระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากรด และเบส ดูได้จากรูปที่ 2.9 เปรียบเทียบการเกิดพันธะ Polymerization โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแบบการเติมกรด เพื่อให้เกิดเป็นฟิล์มที่มีคุณภาพดี และลักษณะการเกิดเป็นแบบสายยาว

Acid-Catalyzed Hydrolysis



Base-Catalyzed Hydrolysis



รูปที่ 2.10 (ก) รูปแบบการเกิดเป็นเจลจากการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด และ (ข) รูปแบบการเกิดเป็นเจลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่แบบเบส

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 แผ่นภาพเปรียบเทียบขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างทั่วไปอุตสาหกรรมและในห้องปฏิบัติการ

3.2 Preparation and characterization of SOL-GEL

3.2.1 การเตรียมสารละลายฟอสฟอรัสสำหรับการแพร่สารเจือแบบ SOD ให้กับโซลาร์เซลล์

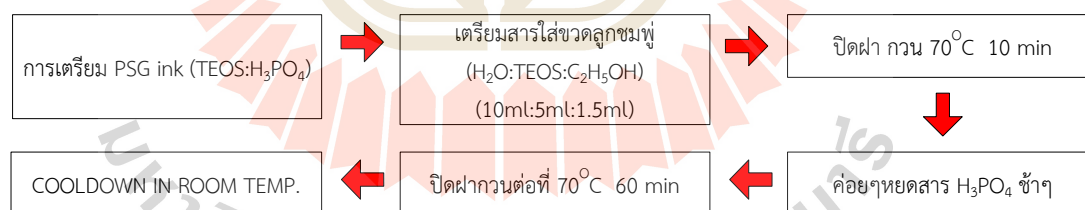
การเตรียมสารตั้งต้นในรูปของสารละลายเพื่อเป็นแหล่งสารเจือฟอสฟอรัสหรือเรียกว่า PSG ink ประกอบไปด้วย H_2O : TEOS : C_2H_5OH มีอัตราส่วนโดยปริมาตรเท่ากับ 10 ml : 5 ml : 1.5 ml และ H_3PO_4 ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่กำหนด เมื่อผสมสารละลายฟอสฟอรัสโดยกวนที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 10 นาที หลังจากนั้นเติม H_3PO_4 ลงไปอย่างช้าๆ 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 และค่อยๆ หยดสารละลาย H_3PO_4 อย่างช้าๆ ทำให้สารละลายเป็นของเหลวใส เมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้สารละลายเปลี่ยนสภาพเป็นเจลที่มีคุณภาพดี และเป็นฟิล์มที่ดีในที่สุด หากเติมสารละลาย H_3PO_4 เร็วเกินไปจะทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลให้สารละลายข้นและจับตัวเป็นก้อนวุ้น เมื่อนำไปผลิตใช้งานฟิล์มที่ได้จะเกิดผิวแตกเสียหาย



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนภาพการเตรียมสารละลาย PSG

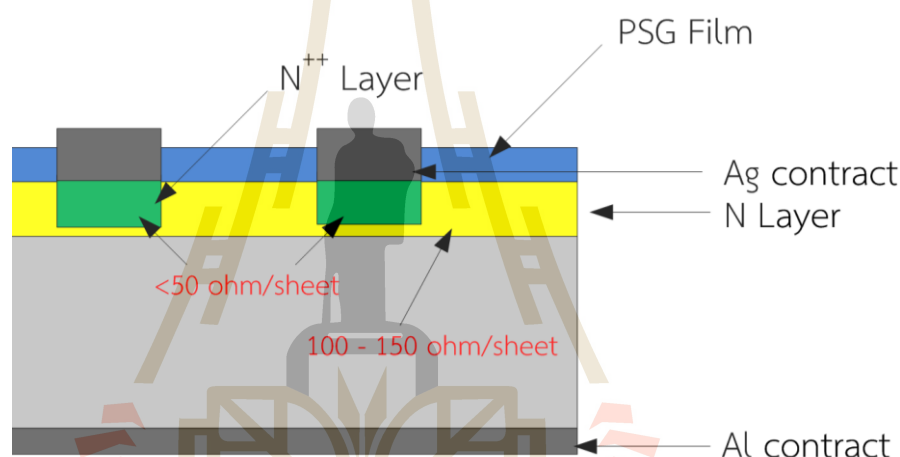
3.3 Preparation and characterization of selective emitter solar cell

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 หรือบริเวณรับแสงนั้นมีความอยู่ในช่วง $100 \Omega/Sheet$ ถึง $150 \Omega/Sheet$ และค่า ρ_{Sheet} ของชั้น n^{++} -Si หรือบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่า $50 \Omega/Sheet$



รูปที่ 3.3 โครงสร้าง selective emitter solar cell

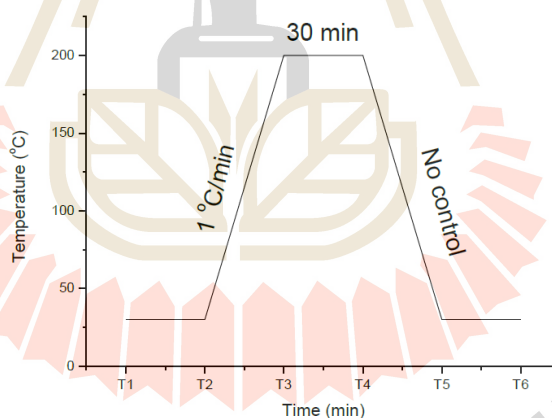
3.3.2 การผลิตฟิล์มด้วยวิธีหมุนเหวี่ยง (Spin coating)

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

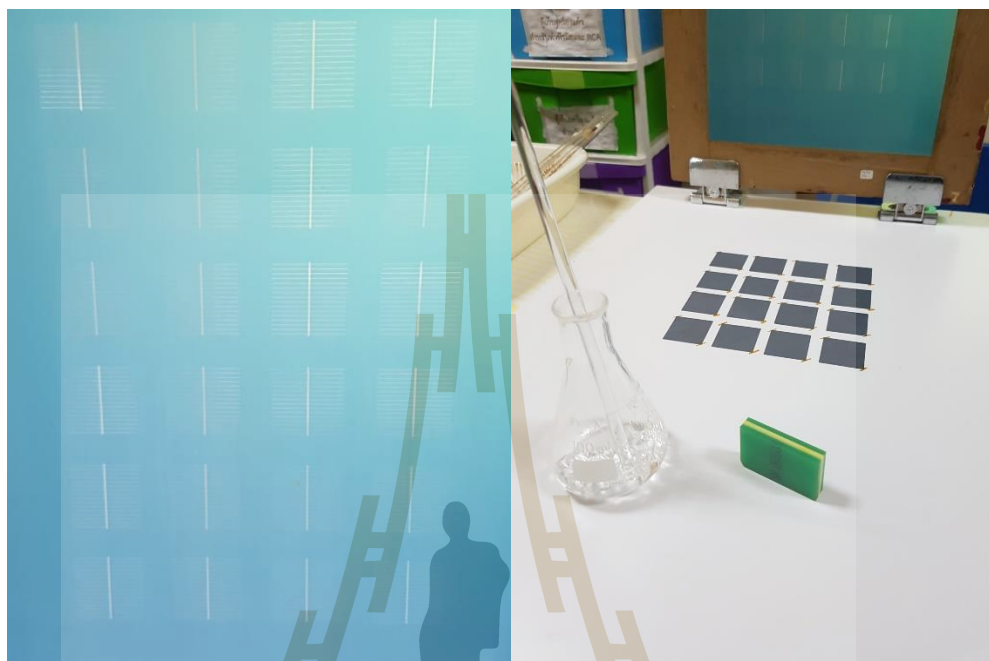


รูปที่ 3.5 กราฟ อัตราการขึ้น และ ลง ในระหว่างกระบวนการอบชั้นฟิล์ม PSG

3.3.3 การสร้างลวดลายฟิล์ม PSG ด้วยวิธีพิมพ์ลาย (Screen printing)

เมื่อสร้างชั้นฟิล์ม PSG เข้มข้นต่ำสำหรับบริเวณชั้น n-Si ขั้นตอนการสร้างบริเวณ PSG เข้มข้นสูงซึ่งมีลักษณะเป็นลวดลายกริดสามารถพิมพ์ลวดลาย (Screen printing) ด้วยสารละลาย PSG เข้มข้นสูงในเงื่อนไข 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

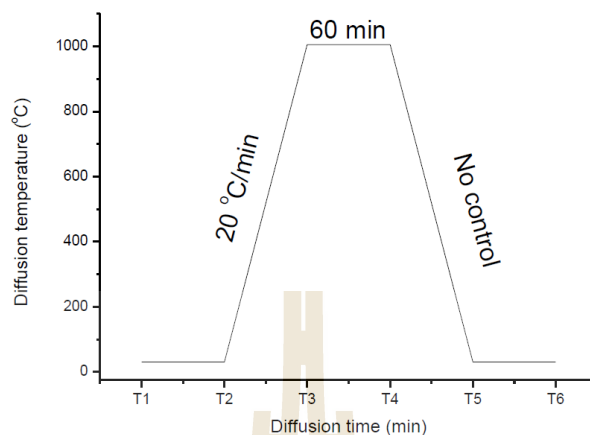
กระบวนการแพร่อุณหภูมิสูงจะได้บริเวณ n^{++} -Si ได้ชั่วไฟฟ้าภาพถ่าย แสดงลวดลายที่ใช้พิมพ์สารละลาย PSG เข้มข้นสูง ดังรูปที่ 3.6



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

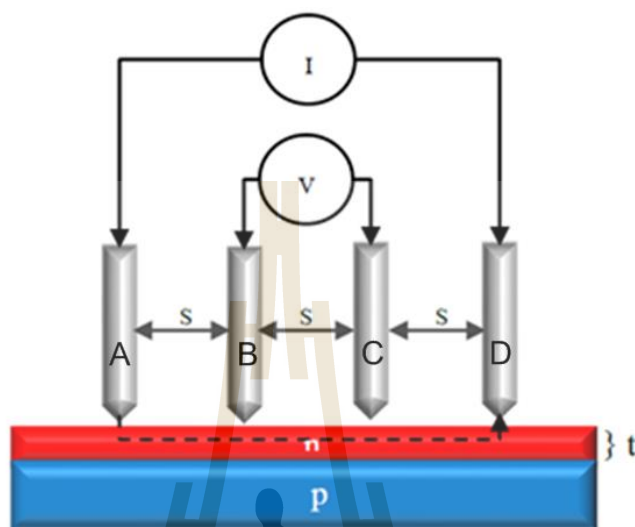
3.3.5 ความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าบริเวณบนแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์(Resistivity)



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

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

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

โดยที่ ρ คือค่าความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็น $\Omega \cdot cm$

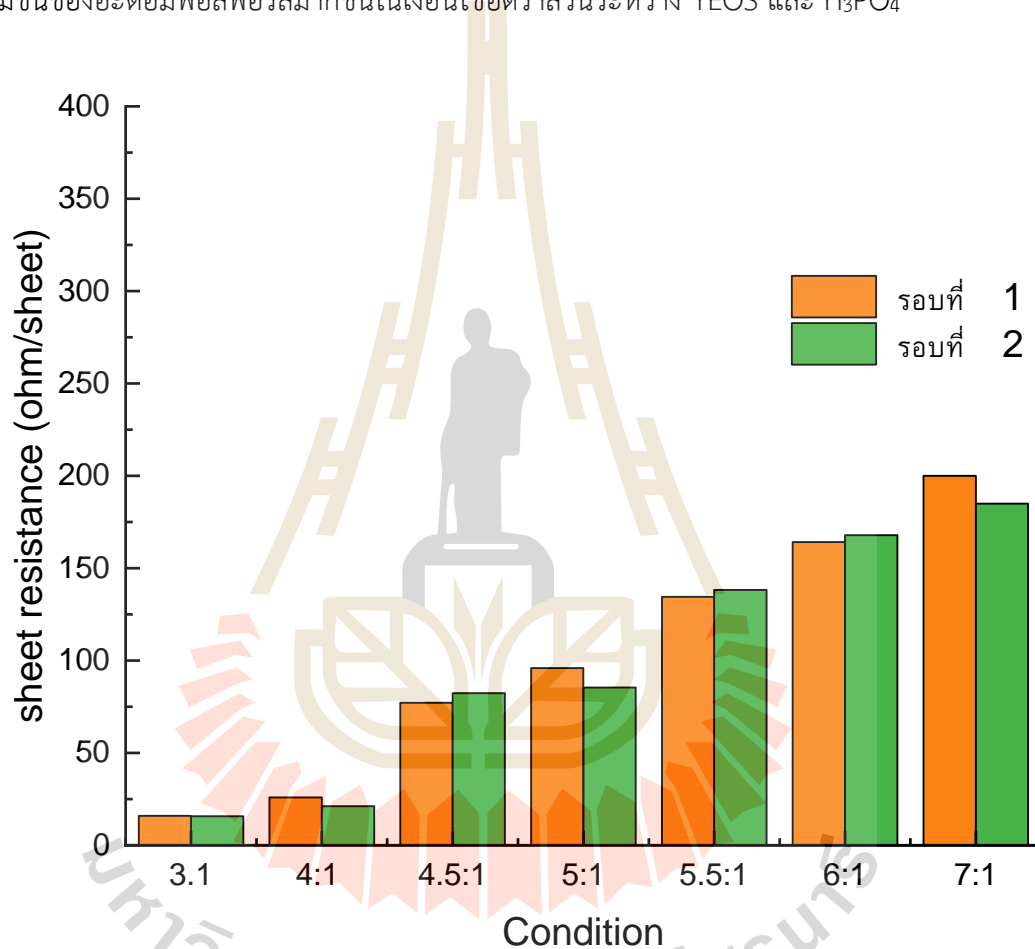
ρ_{sheet} คือค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นมีหน่วยเป็น $\Omega/Sheet$

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

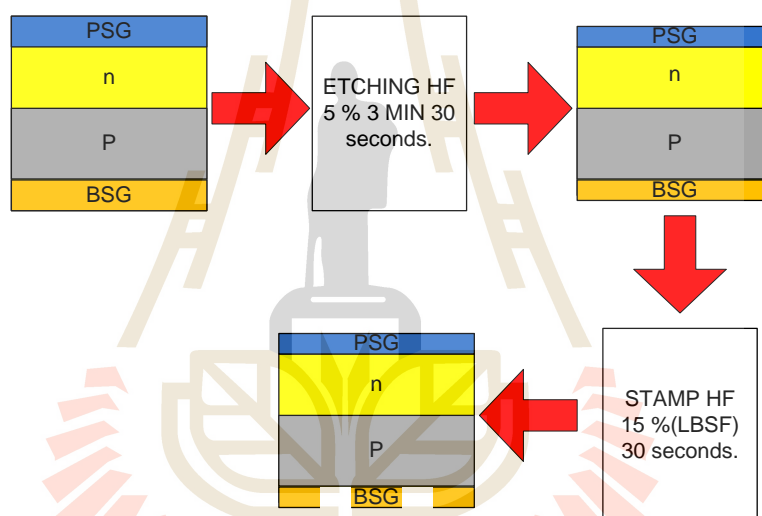


รูปที่ 3.10 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าของชั้นฟิล์ม PSG ในเงื่อนไขต่างๆของ H_3PO_4 : TEOS

3.4 Preparation of local back surface field solar cell

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

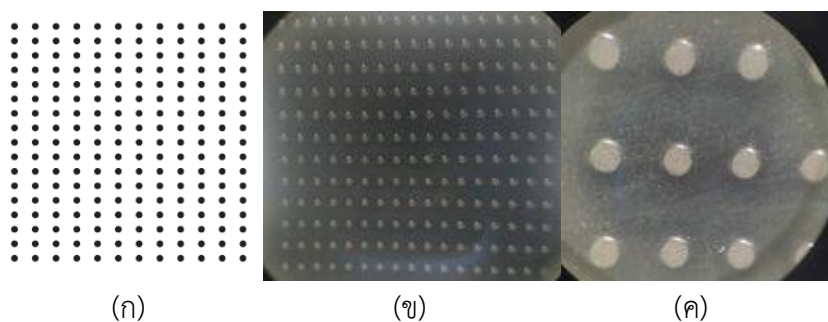
การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE เป็นตัวตั้งต้นกระบวนการและนำไปสกัดชั้นความหนาของชั้นฟิล์มทั้งสองด้าน ผ่านกระบวนการสกัดพื้นผิวให้ขรุขระด้วยสารละลาย ด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออริก (HF) ความเข้มข้น 5 % เป็นเวลา 3.30 นาที หลังจากนั้นทำการเปิดช่องด้านหลังด้วย โดยใช้ชั้น BSG ที่เกิดขึ้นในกระบวนการแพร่ด้วยความร้อนสูง 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 เนื่องจากแฟรชโฟมเป็นวัสดุที่มีความเป็นรูพรุนสูงสามารถดูดซับสารละลายได้ดี จึงมีความเหมาะสมในการกักเก็บสารละลายและปล่อยออกมาเพียงแค่บางบริเวณ



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 เริ่มจากการออกแบบลวดลายหน้ากากที่บดบังแสงป้องกันแสงแฟลชตามที่ต้องการ จากนั้นนำ Flash foam และแบบลวดลายหน้ากากที่เตรียมไว้เข้าเครื่อง Flash Stamp แสงแฟลชจะทำปฏิกิริยากับ Flash foam ซึ่งจะได้ลวดลายเป็นลักษณะบริเวณช่องเปิดและช่องปิดตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 3.13

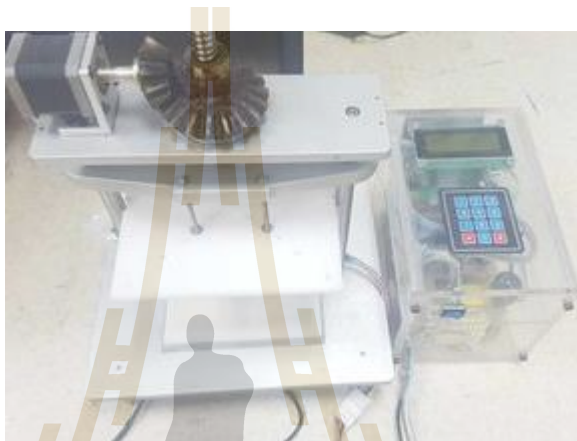


รูปที่ 3.13 เครื่อง Flash Stamp กึ่งอัตโนมัติ

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

การกำหนดสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดใกล้เคียง 12.5 % ของพื้นที่ด้านหลังเลือกใช้ลวดลายแบบลายแบบจุด ในการผลิตในระดับอุตสาหกรรม มีการใช้แสงเลเซอร์ในการเปิดช่องชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริก

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



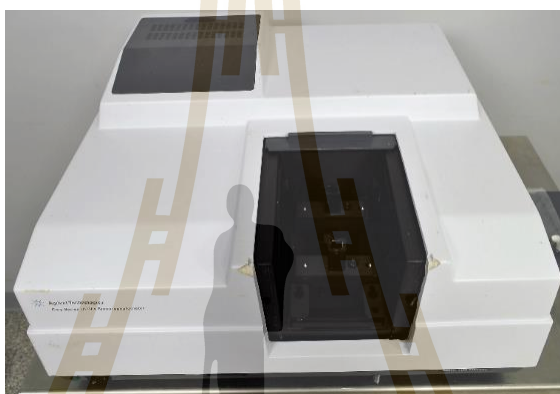
รูปที่ 3.14 เครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติ

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 เพื่อคำนวณช่องเปิดระหว่างแพรชโพนั่ม 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)



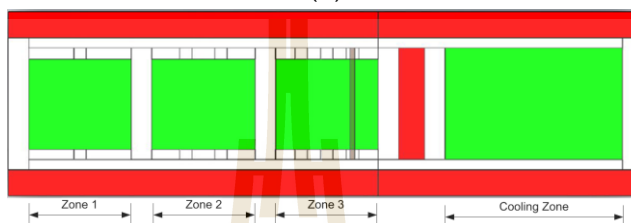
รูปที่ 3.15 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer (UV-Vis) รุ่น Cary 300

3.5 การสร้างขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิก (Ohmic contact)

ขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าด้านหน้าที่รับแสงจะมีลวดลายกริดของโลหะเงิน (Ag) เพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังเป็นขั้วโลหะอะลูมิเนียม (Al) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งจำเป็นต้องมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างขั้วโลหะกับเซมิคอนดักเตอร์แบบรอยสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic contact) ที่แสดงพฤติกรรมของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในลักษณะเป็นกราฟเชิงเส้นมีความโค้งชัน I-V เพื่อบ่งบอกถึงค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำและไม่เกิดพฤติกรรมเรียงกระแส (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 โดยเกิดการเจือของอะลูมิเนียมในทันทีใกล้กับพื้นผิวซิลิคอน และเกิดเป็นบริเวณ p^{++} -Si บางบริเวณ (LBSF) ขึ้น

การศึกษหาเงื่อนไขการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วที่ใช้แผ่นซิลิคอนรอยต่อ p/n-Si ขนาด 3 cm x 3 cm ที่สร้างขึ้น ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น Emitter ประมาณ 100 - 200 Ω /sheet และมีการเกิดชั้น PSG ที่ด้านหน้าและ BSG ที่ด้านหลังที่ผ่านการสกัดพื้นผิวและเปิดช่องแล้วจากนั้นนำมาสร้างขั้วไฟฟ้าลวดลายกริดด้วยกาวเงิน (Ag paste) ที่ด้านหน้ารับแสงให้ตรงกับลวดลาย Heavy dope (3:1) ที่สร้างขึ้น และด้านหลังถมกาวอะลูมิเนียม (Al paste) ให้ทั่วทั้งพื้นที่ช่องเปิดที่ทำการเปิดช่องด้วยกรดไว้ให้ทั่วทั้งพื้นที่ด้านหลัง โดยใช้เทคนิคพิมพ์ลาย Screen Technic และผ่านการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว Fast Firing ด้วยเตาเผารุ่นที่ 2 ที่เงื่อนไขภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ 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 จากนั้นนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ไปวัดประสิทธิภาพในเงื่อนไขการผลิตทั้งหมดของงานวิจัย

การวัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่องระบบจำลองแสงอาทิตย์ Solar simulator Model # SS100AAA และตัวจ่ายไฟฟ้า Precision source ยี่ห้อ KEYSIGHT รุ่น B2901A และโปรแกรม Agilent B2900A Quick IV Measurement ที่สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงดังรูปที่ 3.17 ภายใต้การจำลองแสงเทียมที่มีคุณสมบัติสเปคตรัมที่ AM 1.5 มีค่าความเข้มข้นของแสงมาตรฐานเท่ากับ 1000 W/m² ปรับค่าความสว่างที่ตกกระทบพื้นผิวของชิ้นงานที่ 126,000 Lux





รูปที่ 3.17 เครื่องวัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยระบบจำลองแสงเทียม



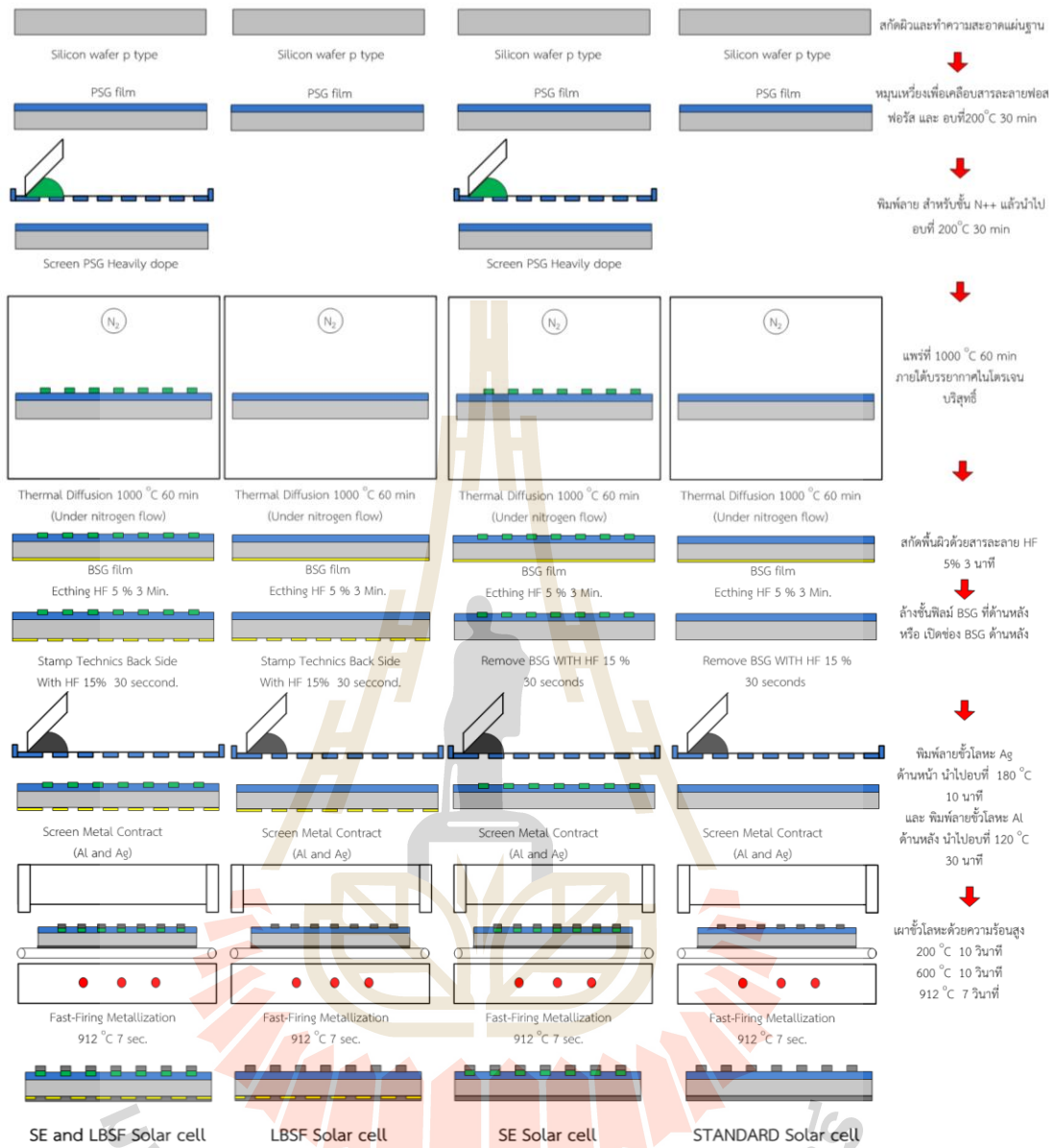
รูปที่ 3.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด : Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) รุ่น JSM-7800F

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 HNO₃ (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 แตกต่างกันเพียงการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานและโครงสร้าง SE จะต้องทำการล้างกำจัดชั้นฟิล์ม 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 ด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยงและการพิมพ์ลาสารละลาย 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



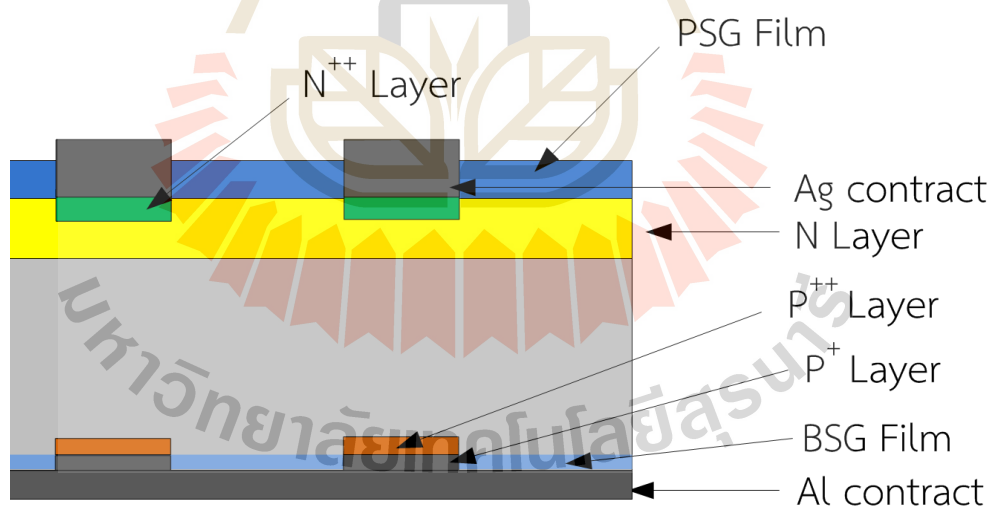
บทที่ 4

ผลการวัดทางแสง ค่าทางไฟฟ้า และการวิเคราะห์ของเซลล์แสงอาทิตย์

โครงสร้างผสมผสาน SE และ LBSF

4.1 บทนำ

จากบทที่ 3 ได้กล่าวถึงการผลิตชั้น ARC ในอุตสาหกรรม และการเตรียมสารละลาย sol-gel เพื่อใช้ในการเตรียมสารละลาย SOD (Spin on Doped) หรือ PSG ink low dope เพื่อสร้างชั้น n-Si บนแผ่นฐานซิลิคอนชนิด p-Si จากการเตรียมสารละลาย PSG ink heavy dope ที่มีความเข้มข้นของสารเจือฟอสฟอรัสต่างกัน ส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น n-Si มีค่าต่างกัน เพื่อเป็นแหล่งสารเจือต่างบริเวณด้วยการแพร่ด้วยความร้อนสูง (Thermal diffusion) เพื่อที่จะสร้างชั้น n-Si 2 บริเวณให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ และหลังจากกระบวนการแพร่ด้วยความร้อนสูงแล้วได้ทำการสกัดชั้น PSG และ BSG ที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปทำชั้น LBSF ด้วยการเปิดช่องบางบริเวณของ BSG ด้วยสารละลายกรด เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบผสมผสานแสดงในรูปที่ 4.1 ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.1 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างผสมผสาน SE and LBSF

ดังนั้นในบทที่ 4 ผู้ศึกษาจะกล่าวถึงผลการวัดและวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวัด การวิเคราะห์ค่าทางแสง และการวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าโดยที่ในบทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างแบบทั่วไป , เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างแบบซิลิคอนที่ฟอสฟอรัส (SE cell) , เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างแบบพาสซีเวชันด้านหลังบางบริเวณ (LBSF cell)

และ โครงสร้างแบบผสมผสาน (SE AND LBSF cell) ซึ่งสร้างขึ้นด้วยเทคนิคจำเพาะเพื่อสร้างเซลล์ ด้วยต้นทุนต่ำคือ วิธีสารละลายหมุนเหวี่ยง SOD (Spin on Doped) , วิธีทำลวดลาย SCREEN , วิธีการสร้างลวดลายด้วยแสงจากโฟม (Flash Foam) วิธีการประทับลาย (STAMPING) ได้แสดง รายละเอียดการวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

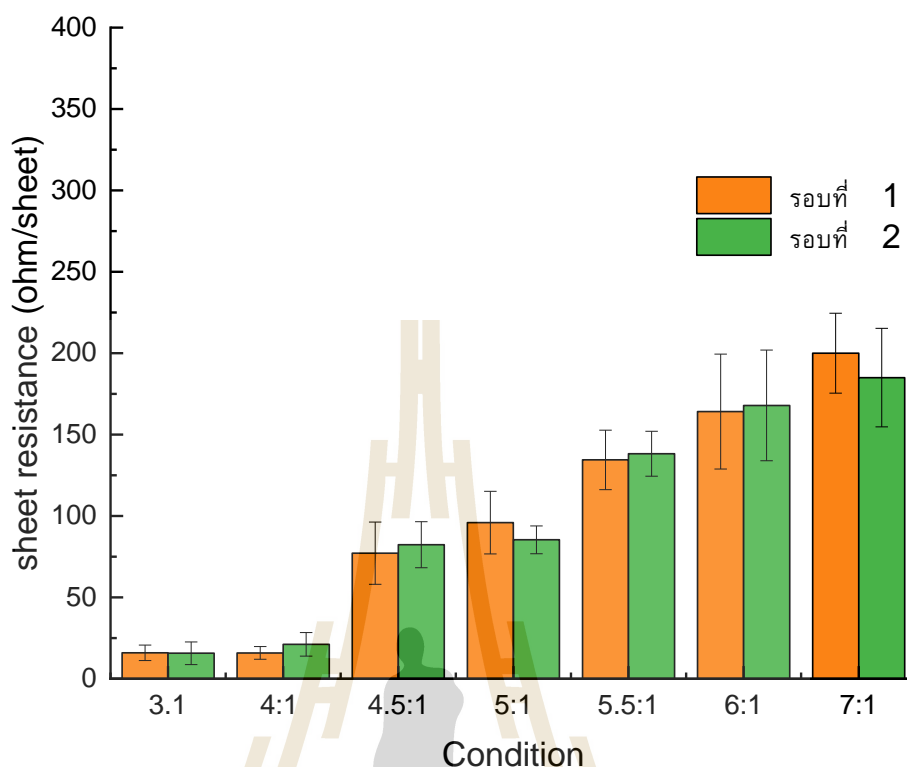
4.2 ผลและการวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์

4.2.1 การวิเคราะห์ผลค่าความต้านทานบนชั้นฟิล์มที่สร้างขึ้น

หลังจากผลิตชั้นฟิล์ม PSG ด้วยสารละลาย H_3PO_4 ได้วัดผลของค่าความต้านทาน ไฟฟ้าจำเพาะแผ่น (Sheet Resistance, Ω /sheet) ของชั้น n-Si ด้วยเทคนิคการวัดแบบ 4-point probes เพื่อวัด ค่า Sheet Resistance ของชั้น n-Si เนื่องจากแหล่งสารเจือ PSG ink มีเงื่อนไข ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสต่างกันจึงทำให้ค่า Ω /sheet ของชั้น n-Si ที่เกิดขึ้นจึงมีค่าไม่เท่ากัน เช่นกัน และใช้หลักการวัดค่า Ω /sheet ของชั้น n-Si ด้วยการวัดแบบ 4-point probes โดยแสดง ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณการเติมสาร H_3PO_4 ในเงื่อนไขที่ใช้สำหรับสร้างสารละลาย PSG และการวัดค่า ความจำเพาะของแผ่นฐานในเงื่อนไขอัตราส่วนของสารละลาย TEOS : H_3PO_4

เงื่อนไข สารละลาย TEOS : H_3PO_4	H_2O (ml)	TEOS (ml)	C_2H_5OH (ml)	H_3PO_4 (ml)	Sheet Resistance (Ω /sheet)	Sheet Resistance (Ω /sheet)
1 : 3.0	10	5	1.5	1.667	15.97	15.68
1 : 4.0				1.250	25.86	21.15
1 : 4.5				1.111	107.12	112.36
1 : 5.0				1.000	95.93	85.35
1 : 5.5				0.909	134.45	138.23
1 : 6.0				0.833	164.12	167.90
1 : 7.0				0.714	200	185



รูปที่ 4.2 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าของชั้นฟิล์ม PSG ในเงื่อนไขต่างๆ

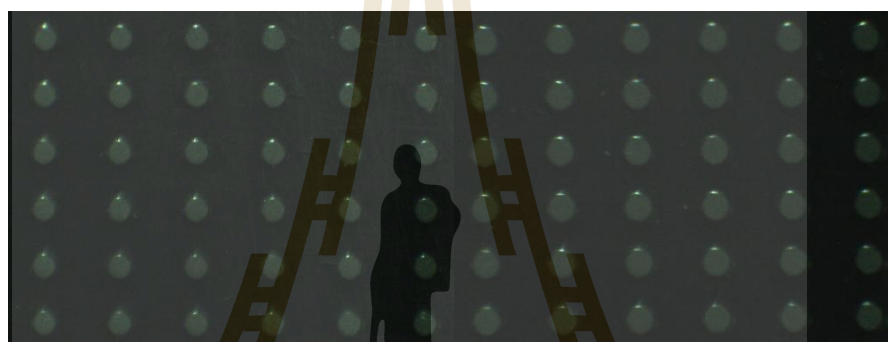
อัตราส่วนความเหมาะสมตั้งแต่ของอัตราส่วนระหว่าง TEOS : H_3PO_4 เริ่มที่ 3:1 ถึง 7:1 โดยในเงื่อนไขทั้งหมดได้เลือกเงื่อนไขการเตรียมสารละลายความเข้มข้นต่ำที่ 7:1 และ สารละลายความเข้มข้นสูงที่ 3:1 โดยค่าความต้านทานของอัตราส่วน 3:1 ค่าความจำเพาะของแผ่นของการเตรียมรอบที่ 1 อยู่ที่ $15.97 \Omega/\text{sheet}$ และในการเตรียมรอบที่ 2 อยู่ที่ $15.68 \Omega/\text{sheet}$ เป็นการเตรียมสองรอบในเงื่อนไขมีความเหมาะสมอยู่ในช่วงทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ในทางกลับกัน อัตราส่วนที่ 7:1 โดยค่าความจำเพาะของแผ่นรอบแรกอยู่ที่ $200 \Omega/\text{sheet}$ และ การเตรียมรอบที่ 2 อยู่ที่ $185 \Omega/\text{sheet}$ นั้น ค่าความต้านทานจำเพาะของแผ่นนั้นยังไม่มี ความเหมาะสมพอมามากพอ จะต้องนำชั้นฟิล์มที่สร้างขึ้นผ่านการนำไปสกัดพื้นผิวด้วยสารละลาย HF เพื่อลด ชั้นความหนาจะทำให้ค่าความต้านทานนั้นมีความเหมาะสมที่ต่ำกว่า $150 \Omega/\text{sheet}$ และนำไปสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างต่างๆในงานวิจัยต่อไป

4.2.2 การวิเคราะห์ลวดลายช่องเปิดชั้น BSG สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF

ในการศึกษานี้กำหนดสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ที่ 8% , 12% และ 15% ตามลำดับและเป็นลวดลายแบบลายแบบจุด ซึ่งลวดลายช่องเปิดหลังจากการประทับลายด้วย สารละลาย HF 15 % แสดงดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดขนาดช่องเปิดของฟิล์ม BSG ที่สร้างบนแพรซิโพนและลวดลายพิมพ์ที่ได้จากการประทับลาย

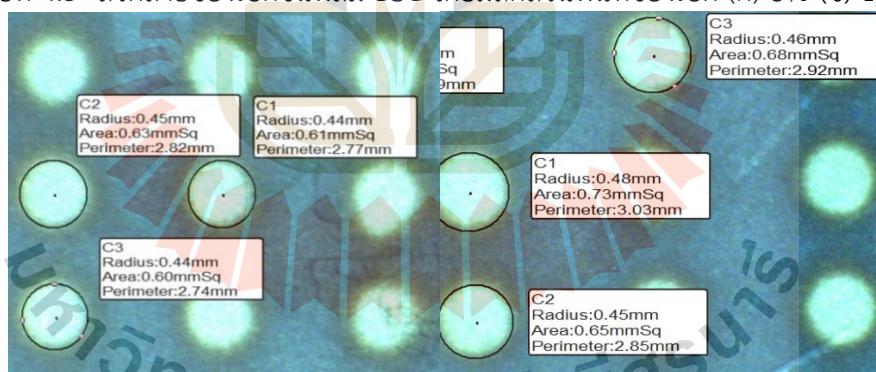
สัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (%)	ช่องเปิดจากการออกแบบ layout (%)	ลวดลายที่สร้างขึ้น acid (%)	ความคลาดเคลื่อน (%)
8	8	11.4	3.4
12	12	15.2	3.2
15	15	18.3	3.3



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.3 ลวดลายช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG โดยมีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (ก) 8% (ข) 12%



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.4 ลวดลายการเปิดช่องไดโอดีเล็กติกBSGด้วยสารละลายกรด บนแผ่นฐานซิลิคอนจากการประทับลายโดยมีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (ก) 8% (ข) 12%

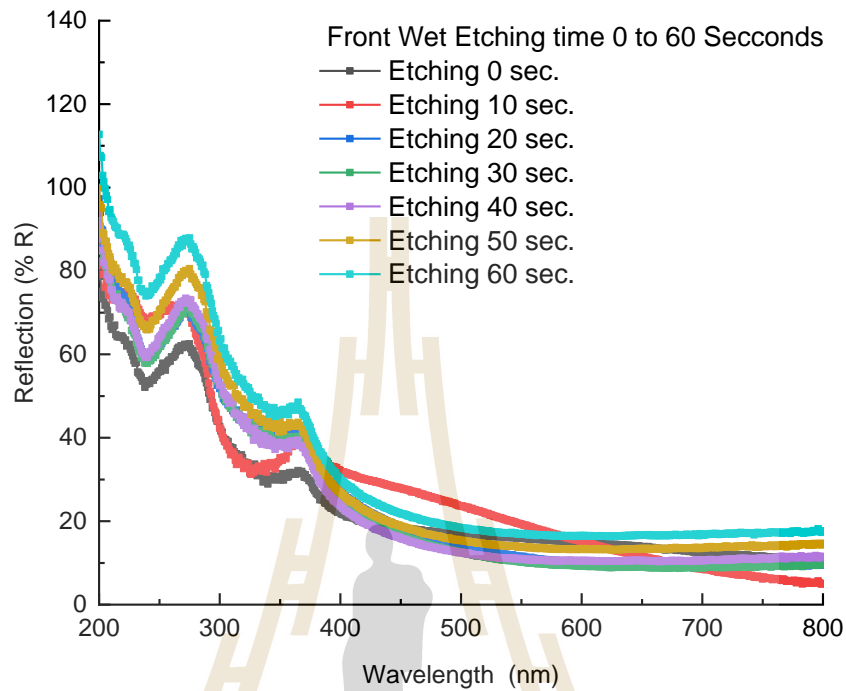
เมื่อทำการวัดขนาดลวดลายที่ได้จากการประทับลายสารละลาย HF ด้วยกล้อง Lightmicroscope พบว่ามีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 4 % โดยภาพที่ 4.3 ที่ 8 % ช่องเปิด ได้ทำการวัดลวดลายช่องเปิดBSGบนโพนีสแตมป์ทำการวัด 3 จุด ซึ่งมีค่าเส้นภาพรัศมี 0.33 ,0.34 ,0.35 mm ตามลำดับ และมีพื้นที่ 0.35 ,0.36 ,0.39 mmsq. และ มีเส้นภาพศูนย์กลางช่องเปิดเท่ากับ 0.66 ,0.68 ,0.70 mm ตามลำดับ และ 12 % ช่องเปิดได้ทำการวัดลวดลายช่องเปิดBSGบนโพนีสแตมป์ทำการวัด 3 จุด ซึ่งมีค่าเส้นภาพรัศมี 0.39 ,0.39 ,0.40 mm ตามลำดับ และมีพื้นที่ 0.48 ,0.48 ,0.50

mmsq. และมีเส้นภาพศูนย์กลางช่องเปิดเท่ากับ 0.78 ,0.78 ,1.00 mm ตามลำดับ ในส่วนของภาพที่ 4.4 ที่ 8 % ซึ่งทำการวัดบนแผ่นฐานซิลิกอนที่ทำการประทับลายโดยจะพบว่าลวดลายช่องเปิด BSG บนแผ่นฐานซิลิกอนทำการวัด 3 จุด ซึ่งมีค่าเส้นภาพรัศมี 0.44 ,0.44 ,0.45 mm ตามลำดับ และมีพื้นที่ 0.60 ,0.61 ,0.63 mmsq. และมีเส้นภาพศูนย์กลางช่องเปิดเท่ากับ 0.88 ,0.88 ,0.90 mm และ 12 % ช่องเปิดได้ทำการวัดลวดลายช่องเปิดบนแผ่นฐานซิลิกอนทำการประทับลายทำการวัด 3 จุด ซึ่งมีค่าเส้นภาพรัศมี 0.45 ,0.46 ,0.48 mm ตามลำดับ และมีพื้นที่ 0.65 ,0.68 ,0.73 mmsq. และมีเส้นภาพศูนย์กลางช่องเปิดเท่ากับ 0.90 ,0.92 ,0.96 mm ตามลำดับ โดยทำการเปรียบเทียบกับโปรแกรมที่ออกแบบลวดลายด้วย โปรแกรม Layout แสดงในตารางที่ 4.2 โดยงานวิจัยนี้ใช้ช่องเปิด 8 % เพื่อให้ลวดลายใกล้เคียงช่องเปิดที่ 12 % ที่สุด และ ด้วยวิธีการนี้ใช้ระดับพลังงานที่น้อย และสามารถนำไปลดต้นทุนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

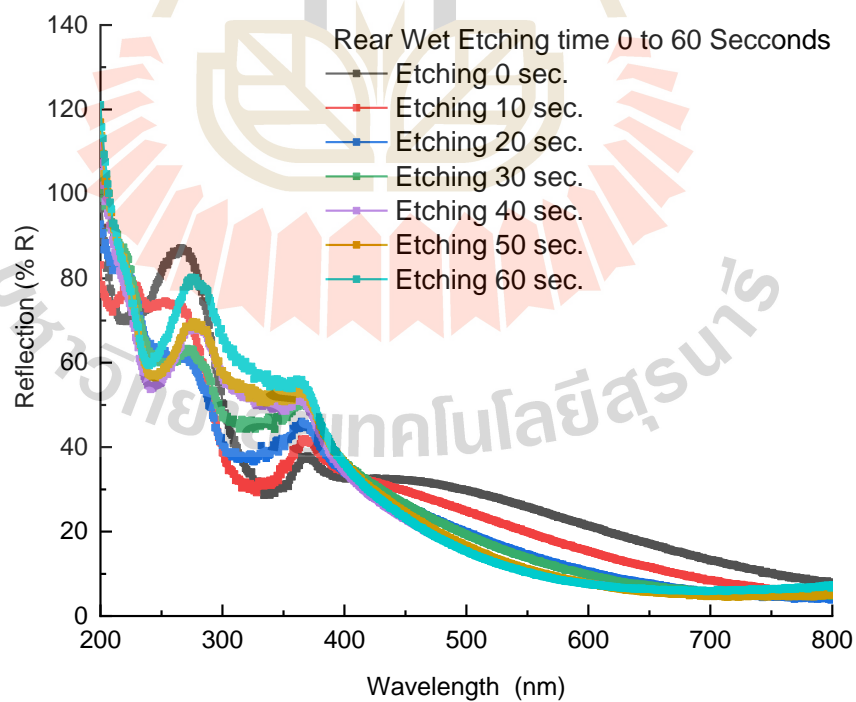
4.3 ผลการวัดค่าทางแสงของชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ (Anti-Reflection Coating, ARC)

เซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปยังคงจำเป็นต้องมีชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ (Anti-Reflection Coating, ARC) เพื่อช่วยลดผลของการสะท้อนแสงกลับที่พื้นผิวและเป็นชั้นพาสซีเวชัน (Passivation) เพื่อลดการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิว n-Si ดังนั้นเพื่อลดการสูญเสียจากแสงสะท้อนกลับที่ผิวเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งจำเป็นต้องมีชั้น ARC เคลือบอยู่ด้านบนชั้นรับแสงหรือชั้น n-Si จากผลของชั้น ARC ที่สร้างจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการเลือกวัสดุมาเป็นชั้น ARC ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างมาก เนื่องจากเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตจะใช้เทคโนโลยีขั้นสูงซึ่งมีราคาแพง ในงานวิจัยนี้ได้นำชั้น PSG ที่เป็นผลพลอยได้หลังจากกระบวนการแพร่ด้วยความร้อนสูงได้ใช้เป็นชั้น ARC ซึ่งเป็นผลผลิตที่ได้หลังจากการแพร่ที่ 1000 °C ดังนั้นต้นทุนจึงต่ำกว่าการผลิตในระบบสุญญากาศมาก จากรูปกราฟที่ 4.5 ในช่วงความยาวคลื่น 200 ถึง 800 นาโนเมตร ที่มีการสกัดชั้นผิวในเงื่อนไขตั้งแต่ 0 ถึง 60 วินาที และเป็นการเพิ่มขึ้นทีละ 10 วินาที แสดงให้เห็นว่าในช่วงความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร (invisible lights) นั้นค่าการสะท้อนแสงกลับที่ผิว (% R) มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 59.33 , 64.91 , 67.54 , 68.75 , 70.76 , 77.20 และ 84.40 ตามลำดับเมื่อทำการสกัดพื้นผิวใช้เวลามากขึ้น และ ในช่วงความยาวคลื่น 380-450 นาโนเมตร (แสงสีม่วง) จะได้ค่า %R เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 26.72 , 36.47 , 34.88 , 32.63 , 31.37 , 35.07 , 38.56 ตามลำดับเมื่อทำการสกัดนานขึ้น และในช่วง 450 – 500 นาโนเมตร (แสงสีฟ้า) นั้น จะได้ค่า %R มากขึ้นตั้งแต่ 19.78 , 30.10 , 22.83 , 20.56 , 19.53 , 22.54 , 25.65 ตามลำดับ โดยจะพบว่า เมื่อความหนาชั้น PSG ลดลงจากการสกัดชั้นที่นานขึ้นนั้นส่งผลให้ค่าการสะท้อนกลับของแสงต่ำลงและจะเพิ่มขึ้นเมื่อการสกัดใช้เวลามากถึงจุดหนึ่ง โดยพิจารณาจากช่วง แสงสีฟ้า มีค่า %R อยู่ที่ 20.56 และที่ความเข้มแสงของดวงอาทิตย์สูงสุดที่ 600 นาโนเมตรนั้น จะทำให้ค่าการสะท้อนแสงกลับต่ำที่สุดจึงเลือกใช้เงื่อนไข การสกัดชั้นที่ 30 วินาที งานวิจัยนี้จึงได้ใช้งานเงื่อนไขการสกัดพื้นผิวที่ 30 วินาทีซึ่งการสกัดด้วยเวลาเท่านี้คุ้มคุ้มได้ง่ายและส่งผลให้ค่าการสกัดที่ดีกว่าไม่สกัดพื้นผิวเลย และแสดงว่าค่าความหนาของ

ชั้น PSG ที่สร้างขึ้นนั้นมีผลต่อระดับสะท้อนแสงและค่าความเหมาะสมที่จะนำไปสร้างชั้น ARC ให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานวิจัยต่อไป



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกลับของแสงและความยาวคลื่นช่วง 200-800 นาโนเมตร ของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกPSGด้านหน้า



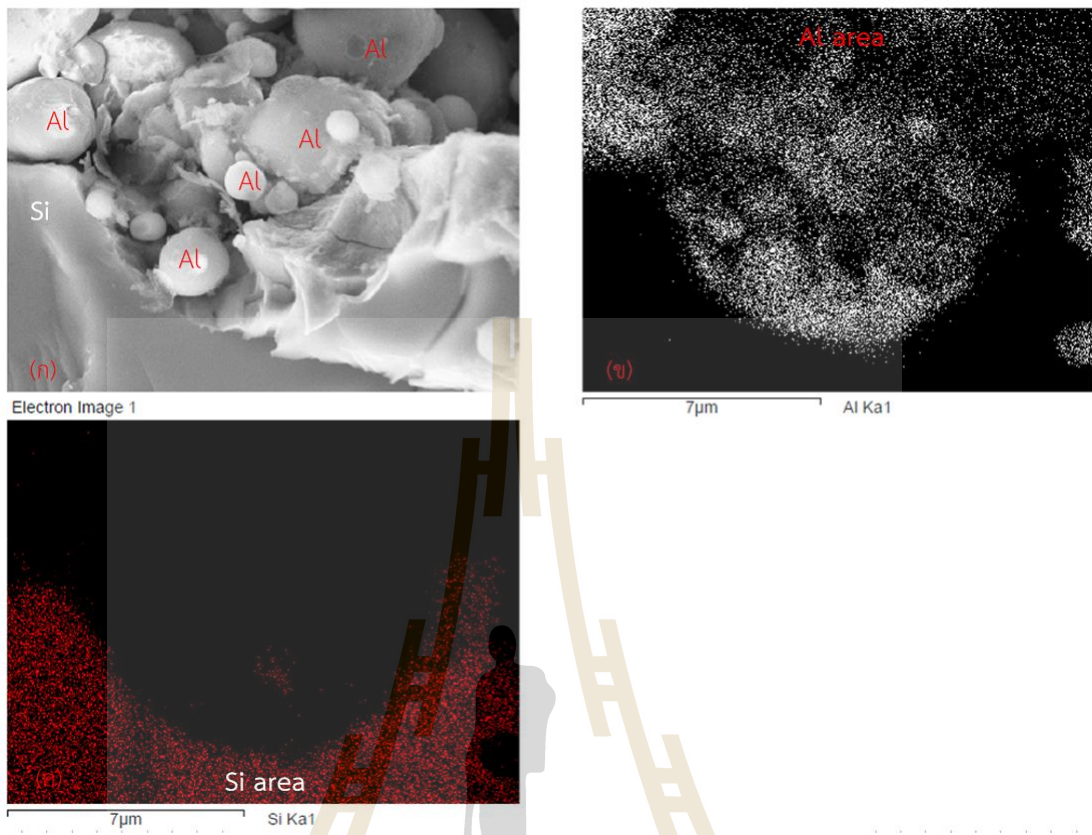
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกลับของแสงและความยาวคลื่นช่วง 200-800 นาโนเมตร ของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกBSGด้านหลัง

อย่างไรก็ตามชั้น ARC ในอุตสาหกรรม การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ นั้นนิยมเลือกใช้ ซิลิคอน ไนไตรด์ (SiN_x) เป็นชั้น ARC นั้นเพราะ ค่าดัชนีหักเหของแสง มีค่าที่ 2.1 และเมื่อนำไปวัดค่าสะท้อน กลับพบว่าค่าเฉลี่ย %R ระหว่างความยาวคลื่น 280 นาโนเมตร ถึง 800 นาโนเมตร มีค่าลดลง อย่างไรก็ตามชั้นตอนในการผลิตชั้น SiN_x นั้นจะต้องอาศัยเทคโนโลยีขั้นสูง และต้นทุนการผลิตด้าน เทคโนโลยีที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ชั้น PSG film มาสร้างเป็นชั้น ARC ให้%R ต่ำที่สุด 19.53 % ที่ความยาว คลื่น 450 ถึง 500 นาโนเมตร

หลังจากขั้นตอนของการสกัดชั้นรับแสง ARC n-Si และทำขั้วไฟฟ้าแล้ว ผู้ศึกษาได้นำชิ้นงาน ไปวิเคราะห์ทางโครงสร้างด้วยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนหรือส่องกราด (Field Electron Microscope (FE-SEM)) บริษัท JEOL รุ่น JSM-7800F โดยที่การทำงานของ SEM มีหลักการการทำงาน คือ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ไปตามเลนส์ที่กำหนด ซึ่งภายใน เครื่องมีสภาพเป็นสุญญากาศด้วยความต่างศักย์อยู่ในช่วง 0-20 kV โดยที่ทิศทางการเคลื่อนที่จะถูก ควบคุมเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnetic Lens) เมื่อลำแสงอิเล็กตรอนตกกระทบบนผิวของ ชิ้นงาน โดยจะมีสแกนคอยล์ (Scan Coil) ทำหน้าที่ส่องกราดลำแสงอิเล็กตรอนให้ไปอยู่ที่พื้นผิวของ ชิ้นงานเป็นพื้นที่เล็ก ๆ จะทำให้เกิดสัญญาณต่าง ๆ ขึ้นและในเวลาเดียวกันจะมีตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector) คอยตรวจจับสัญญาณแล้วประมวลผลเป็นภาพถ่ายอิเล็กตรอน

โดย รูปที่ 4.6 และ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกลับของแสงและความ ยาวคลื่นของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกPSGด้านหน้าและBSGด้านหลังของชิ้นงานที่สร้างขึ้น พบว่าฟิล์มพื้น หนารับแสงที่จะมีการนำไปทำขั้วโลหะต่อไปฟิล์มที่สกัดด้วยสารละลาย HF 40 วินาทีที่มีค่าการสะท้อน แสงกลับที่ผิวมีค่าที่ต่ำที่สุดประมาณ 19.53 % ในย่านการดูดกลืนแสงสีฟ้า เหมาะสำหรับเป็นชั้น ป้องกันการสะท้อนแสงด้านบนของเซลล์แสงอาทิตย์ และชั้นฟิล์มด้านหลัง มีค่าการสะท้อนแสงอยู่ใน ระดับกลางของเงื่อนไขทั้งหมด เมื่อเทียบกับการไม่สกัดพื้นผิวใดๆเลยภายใต้เงื่อนไขนี้ จึงเหมาะสม สำหรับการเตรียมชิ้นงานและดำเนินการวิจัยของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนต่ำต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.7 (ก) ภาพถ่ายอิเล็กตรอนที่ตัดขวางของแผ่น p-Si (ข) ภาพถ่ายอิเล็กตรอนที่ตัดขวางของแผ่นแสดงลักษณะของ Al ที่มีการแพร่ซึมลงไปในช่วงงานและ (ค) ภาพถ่ายอิเล็กตรอนที่ตัดขวางของแผ่น p-Si ที่โดนอลูมิเนียมแพร่ซึมเข้าไป

จากรูปที่ 4.7 (ก) ภาพถ่ายอิเล็กตรอนที่ตัดขวางของแผ่น p-Si พบว่าที่กำลังขยายที่ 8000 เท่า ลักษณะของแผ่นฐาน p-Si ถูกสร้างลวดลายช่องเปิดแบบจุดด้วยวิธีการใช้สารเคมีสกัดผิว เปิดช่องและผ่านกระบวนการทำขั้วโลหะไฟฟ้าความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว เพื่อดูการแพร่ซึมของอลูมิเนียมเข้าไปในแผ่น p-Si โดย แสดงในภาพ (ข) ซึ่งแสดงภาพถ่ายอิเล็กตรอนที่ตัดขวางของแผ่น p-Si แสดงลักษณะของ Al ที่มีการแพร่ซึมลงไปในช่วงงาน ถูกถ่ายที่กำลังขยาย 8000 เท่าและ (ค) แสดงภาพถ่ายอิเล็กตรอนที่ตัดขวางของแผ่น p-Si ที่โดนอลูมิเนียมแพร่ซึมเข้าไป ถูกถ่ายที่กำลังขยาย 8000 เท่า แสดงให้เห็นว่า อลูมิเนียมมีการแพร่ซึมเข้าไปในช่วงงานได้ โดยผ่านวิธีการ ประทับลายด้วยสารละลายกรดเพื่อเปิดช่อง แสดงตามภาพตามขวางรูปที่ 4.7 (ก) เพื่อนำมาใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานรวมถึงสามารถวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในชิ้นงานด้วยโหมดการทำงาน Energy dispersive X-ray (EDX) โดยผลที่ได้จะแสดงการแพร่ของอลูมิเนียมที่เข้าไปในช่วงงานซิลิคอนที่สร้างขึ้นตามรูปที่ 4.7 (ข) และ พื้นผิวซิลิคอนที่โดนอลูมิเนียมแพร่เข้าไป(ค) ตามลำดับ

4.4 ผลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE and LBSF , LBSF , SE และทั่วไป

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของโครงสร้างเซลล์ทั้ง 4 ชนิดโดยผลการวัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยระบบเครื่องจำลองแสงเทียมแสดงดังตารางที่ 4.3

จากตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ V_{oc} , I_{sc} , FF และค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (%) ของทั้งสี่โครงสร้าง โดยผลการวัดสองครั้ง และ มีการทำซ้ำ อีก 1 รอบ เพื่อ ยืนยันผลการทดลองจากผลการวัดพบว่า ในเงื่อนไข ต่าง ๆ สามารถแสดงให้เห็นถึงประสิทธิผลของการสร้างบริเวณ n^{++} -Si (SE) , p^{++} -Si (LBSF) และ การมีทั้งบริเวณ n^{++} -Si (SE) และบริเวณ p^{++} -Si(LBSF) และนำชิ้นงานมาเปรียบเทียบกับชิ้นงาน Ref. (Standard) พบว่าให้ค่า FF สูงกว่าชิ้นงาน Ref. อยู่ทุกโครงสร้าง อย่างไรก็ตามยังมีโครงสร้างเซลล์บางตัวที่มี FF ต่ำกว่าเซลล์มาตรฐานนั้น อาจเป็นเพราะความลึกของชั้น n -Si ดังนั้นการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างดังกล่าว แต่ประสิทธิภาพของเซลล์ต้นแบบนี้ยังมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเซลล์คุณภาพสูงที่ผลิตในระดับอุตสาหกรรม โดยอาจมีสาเหตุดังนี้

1. ผลกระทบจากกระบวนการ Fast Firing ที่ขั้วไฟฟ้าด้านบน-หลังในระดับ 912°C ซึ่งทะลุสูงเกินเพียงพอหรือต่ำกว่าค่าที่กำหนดเพื่อให้เกิดชั้นสนามไฟฟ้าที่ด้านหลัง (Back Surface Field, BSF) ที่ดีพอที่รอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าโลหะ ทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) ต่ำลง

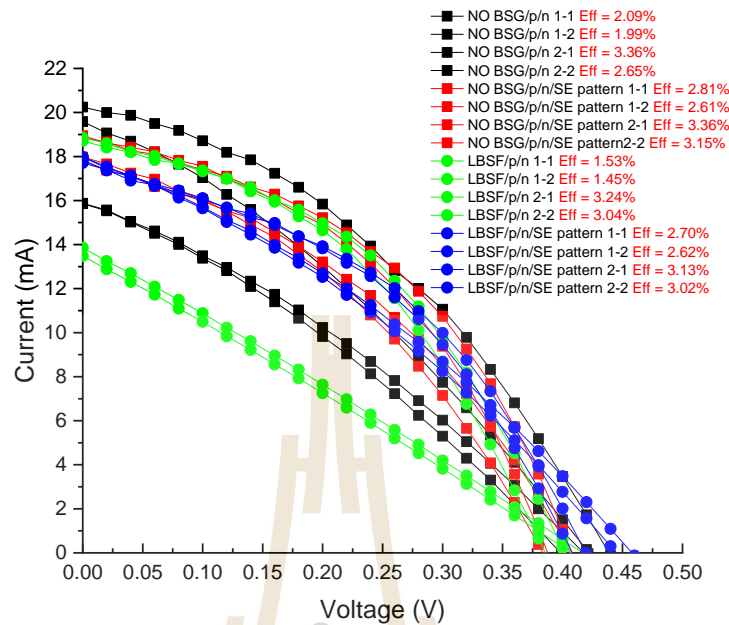
2. ค่าฟิลแฟคเตอร์ (FF) ที่ต่ำลง จากอุณหภูมิ Fast Firing สูงเกินเพียงพอหรือต่ำทำให้เกิดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ขั้วสัมผัส มีค่าสูงที่ขั้วด้านบนและด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อลดผลของค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ขั้วสัมผัส จากการปรับปรุงระบบ Firing จะสามารถเพิ่มค่า FF สูงขึ้นได้

3. ขนาดของ หน้ากากพิมพ์ลายขั้วไฟฟ้ามีช่องผ่านสารละลายขนาดใหญ่กว่าขนาดเมสที่ใช้ผลิตในอุตสาหกรรมโดยทำให้ขั้วไฟฟ้าที่พิมพ์ลายออกมานั้นมีความหนาแน่นมากกว่าการผลิตในอุตสาหกรรม เมื่อผ่านกระบวนการ Fast firing อาจทำให้เกิดบริเวณสนามไฟฟ้าด้านหลัง (Back Surface Field, BSF) มีประสิทธิภาพที่น้อยลง

ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (%) ของเซลล์ทั้งสี่โครงสร้างนั้นมีขนาด $3 \times 3 \text{ cm}$ แต่ละโครงสร้างมี 2 ชุด ผลพบว่าโครงสร้าง SE จะมีค่าประสิทธิภาพมากกว่า โครงสร้างมาตรฐาน อยู่ 0.62% ในการเตรียมชิ้นงานรอบแรก และ 0.5% ในการเตรียมรอบที่สอง , โครงสร้าง LBSF จะมีค่าต่ำกว่า โครงสร้างมาตรฐาน อยู่ -0.54% ในการเตรียมชิ้นงานรอบแรก และ 0.39% ในการเตรียมรอบที่สอง และ โครงสร้างแบบผสมผสาน SE+LBSF จะมีค่า มากกว่า โครงสร้างมาตรฐาน อยู่ 0.63% ในการเตรียมชิ้นงานรอบแรก และ 0.37% ในการเตรียมรอบที่สอง ซึ่งจะนำไปสรุปค่า จาก กราฟ I-V ในลำดับต่อไป

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างต่างๆในงานวิจัย

condition	V _{oc} (V)		I _{sc} (mA)		FF (%)		η (%)		Efficiency		V _{mp} (V)		imp (mA)	
									Gain (%)					
โครงสร้าง ทั่วไป (1)	0.42	0.40	15.87	15.85	0.31	0.31	2.09	1.99	-	-	0.22	0.22	9.51	9.03
โครงสร้าง ทั่วไป (2)	0.44	0.42	20.24	19.59	0.38	0.32	3.36	2.65	-	-	0.28	0.24	12.01	11.06
NO BSG/P/N/SE pattern (1)	0.41	0.38	17.83	17.99	0.39	0.38	2.81	2.61	0.72	0.62	0.24	0.24	11.69	10.88
NO BSG/P/N/SE pattern (2)	0.41	0.39	18.83	18.94	0.44	0.43	3.36	3.15	0.00	-0.50	0.26	0.24	12.93	13.51
LBSF/P/N (1)	0.42	0.41	13.86	13.48	0.27	0.26	1.53	1.45	-0.56	-0.54	0.22	0.20	6.97	7.25
LBSF/P/N (2)	0.40	0.39	18.71	18.86	0.43	0.42	3.24	3.04	-0.12	0.39	0.24	0.24	13.51	12.67
LBSF/P/N/SE pattern (1)	0.46	0.45	17.97	17.97	0.33	0.33	2.70	2.62	0.61	0.63	0.24	0.24	11.25	10.94
LBSF/P/N/SE pattern (2)	0.42	0.41	17.71	17.83	0.42	0.41	3.13	3.02	-0.23	0.37	0.26	0.26	12.03	11.60

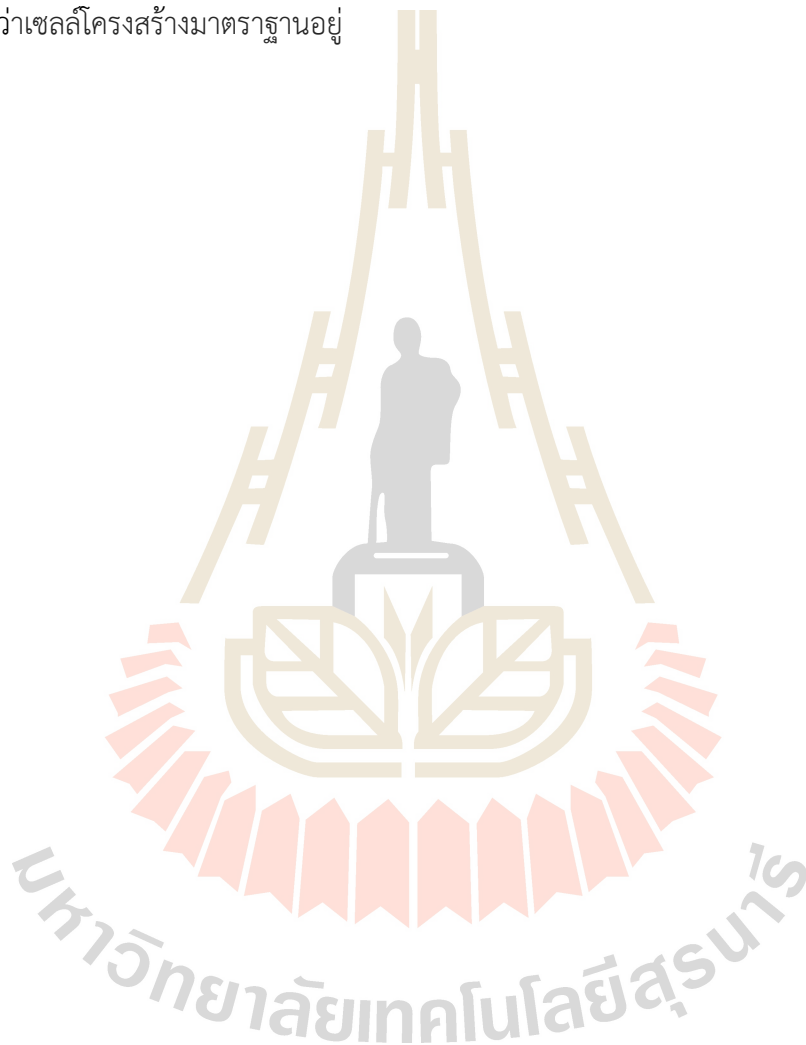


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(V) และกระแสไฟฟ้า(mA)ของเซลล์แสงอาทิตย์ในเงื่อนไขต่าง ๆ

รูปที่ 4.8 แสดงผลการวัด I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างต่างๆ พบว่าค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Eff. : %) มีขึ้นงาน 2 ชุดของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน ชั้นแรก ประสิทธิภาพจะอยู่ที่ 1.99-2.09 % ส่วนการวัดชั้นสอง ประสิทธิภาพจะอยู่ที่ 2.65-3.36 % ค่าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE ชั้นแรก ประสิทธิภาพจะอยู่ที่ 2.61-2.81 % ส่วนการวัดชั้นสอง ประสิทธิภาพจะอยู่ที่ 3.15-3.36 % ค่าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ชั้นแรก ประสิทธิภาพจะอยู่ที่ 1.45-1.53 % ส่วนการวัดชั้นสอง ประสิทธิภาพจะอยู่ที่ 3.04-3.24 % ค่าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างผสมผสาน SE+LBSF ชั้นแรกค่าประสิทธิภาพจะอยู่ที่ 2.62-2.70 % ส่วนการวัดชั้นสองค่าประสิทธิภาพจะอยู่ที่ 3.03-3.13 % เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์เทียบกับโครงสร้างเซลล์มาตรฐานจะเห็นได้ว่าจะมีประสิทธิภาพมากกว่าโครงสร้างมาตรฐานยกเว้น LBSF ชั้นแรก ซึ่งจะได้ค่าต่ำกว่าเซลล์มาตรฐาน และเมื่อนำมาพล็อตกราฟ ระหว่างกระแสลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรแล้วจะได้พื้นที่ใต้และพฤติกรรมการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างทั้งหมด โดยจะเห็นได้ว่า โครงสร้างทั้งหมดนั้นให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน

4.5 สรุป

งานวิจัยนี้ได้หาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีอยู่ในระบบอุตสาหกรรม โดยใช้เทคนิคต้นทุนต่ำที่ไม่ใช้ระดับพลังงานที่สูงมากในกระบวนการผลิต เน้นเป็นการใช้สารเคมีในกระบวนการผลิต ซึ่งวิธีการเตรียมที่ง่ายและไม่ซับซ้อน และยัง มีการเลือกใช้ PSG เป็นชั้น ARC ซึ่งเกิดขึ้นในกระบวนการผลิตเมื่อผ่านการอบด้วยความร้อนสูง มีคุณสมบัติเป็นชั้นป้องกันการสะท้อนที่ดีให้กับชั้นรับแสงเพื่อสร้างเป็นชั้นพาสซีเวชันด้านบนเซลล์อีกที โดยประสิทธิภาพที่ได้จะมีค่ามากกว่าเซลล์โครงสร้างมาตรฐานอยู่



บทที่ 5

การวิเคราะห์ต้นทุน และ ความคุ้มค่า

5.1 บทนำ

ต้นแบบเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างผสมผสมที่ประกอบด้วยชั้น SE และ LBSF ช่วยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานได้มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน วิธีการศึกษานี้จึงเป็นการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนให้สูงมากขึ้น ด้วยการนำเซลล์แสงอาทิตย์และกระบวนการผลิตมาต่อยอดซึ่งการทำชั้น ARC เป็นชั้นป้องกันการดูดกลืนแสงจากกระบวนการผลิตในห้องแลปวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาการผลิตเซลล์ตามกระบวนการมาตรฐานอุตสาหกรรม โดยเพิ่มส่วนของชั้นฟิล์ม PSG และ BSG ที่ทำการสกัดชั้นความหนาและเปิดช่องด้วยสารเคมี จะทำให้ เซลล์จะให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเพิ่มขึ้น จากเซลล์มาตรฐาน จากการเก็บผลและวิเคราะห์ในบทที่ 4 จะได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ต้นทุน และความคุ้มค่า เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนานำไปสู่การผลิตในระดับอุตสาหกรรม

5.2 การวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วย และความคุ้มค่า

ต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์มาจากส่วนหลัก ๆ ที่ประกอบด้วยค่าเครื่องจักร ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักร ค่าเสื่อมสภาพ ค่าวัตถุดิบ ค่าจ้างพนักงาน ค่าวัสดุสิ้นเปลือง ค่าสาธารณูปโภคที่เกี่ยวข้อง ค่าจัดเก็บและการบรรจุ แสดงรายละเอียดในตารางที่ 5.1 ในงานศึกษานี้ได้นำข้อมูลต้นทุนการผลิตจากบริษัทโซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) มาเป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับการผลิตเซลล์โครงสร้างต่าง ๆ ด้วยวิธีต้นทุนต่ำจากการพิมพ์ลายและประทับลาย แสดงสัดส่วนของต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าแผ่นเซลล์ลึกลับซิลิคอนมีสัดส่วนสูงสุดประมาณ 57% ของต้นทุนการผลิตเซลล์ทั้งหมด และมูลค่าการซ่อมบำรุงเครื่องจักรมีสัดส่วนน้อยที่สุดประมาณ 3% ข้อมูลทั้งหมดได้จากบริษัทโซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) ในการศึกษานี้ได้ตั้ง ได้ประมาณค่าประสิทธิภาพของเซลล์ที่มีส่วนประกอบของโครงสร้างที่สร้างขึ้นโดยให้มีค่าสูงกว่าเซลล์มาตรฐานประมาณ 0.63 % เพื่อทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนการผลิตของเซลล์มาตรฐานในอุตสาหกรรมกับ โครงสร้างที่สร้างในห้องแลป วิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ ของ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี โดย เซลล์ที่สร้างจะสามารถให้ประสิทธิภาพสูงกว่าเซลล์โครงสร้างมาตรฐาน เพื่อนำผลไปเปรียบเทียบและนำไปสู่การผลิตในอุตสาหกรรมให้มีความคุ้มค่าต่อไป

ตารางที่ 5.1 ส่วนประกอบของต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์

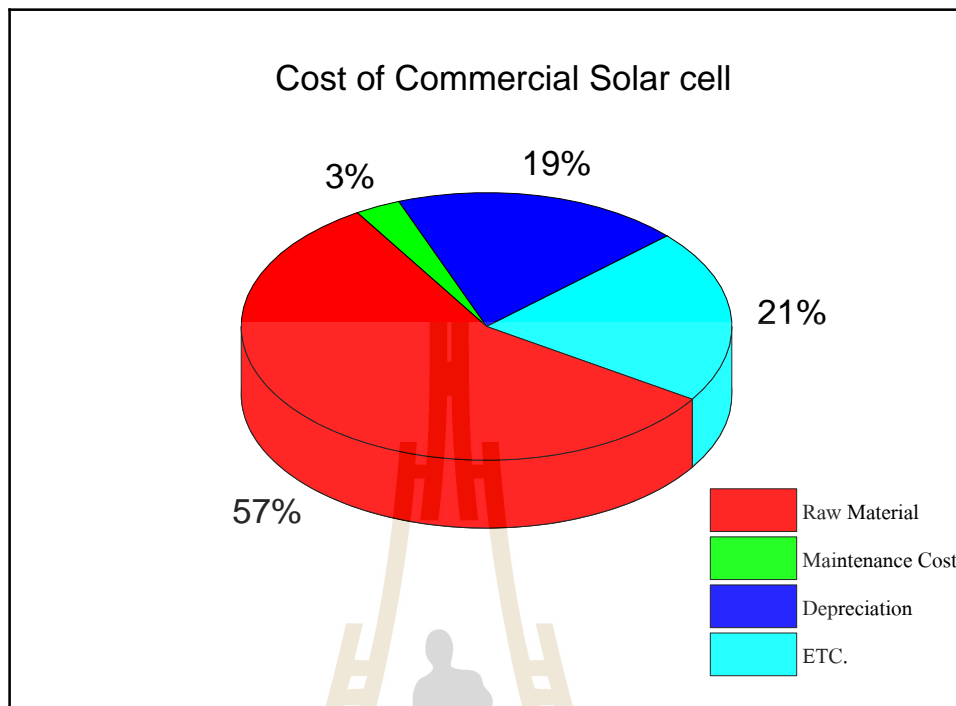
ค่าวัตถุดิบ	แผ่นฐาน	แผ่นซิลิคอนหลายผลึก ชนิด p-Si
	สารเคมี	Hydrofluoric acid (HF)
		Nitric acid (HNO ₃)
		Hydrochloric acid (HCl)
		Potassium Hydroxide (KOH)
	ก๊าซ	Silane (SiH ₄)
		Ammonia (NH ₃)
		Phosphorus oxychloride (POCl ₃)
		Oxygen (O ₂)
	วัตถุดิบทำขั้วโลหะ	Silver (Ag) Paste
Aluminium (Al) Paste		
ไหม Screen และ ยาง Squeegee		
ค่าบำรุงรักษา และ ตรวจสอบอุปกรณ์	เครื่องจักรมาตรฐาน	ค่าซ่อมบำรุง รางสายพานขนส่งชิ้นงาน, มอเตอร์, หลอดไฟ IR, ท่อส่งแก๊ส, ท่อสารเคมี และชิ้นส่วนที่มีเสื่อมสภาพอื่นๆ
ค่าเสื่อมสภาพ	เครื่องจักรมาตรฐาน	ค่าเสื่อมสภาพ อุปกรณ์ การผลิต = $\frac{\text{ราคาต้นทุนการติดตั้ง} - \text{ราคาซาก}}{\text{อายุการใช้งานของเครื่องจักร}}$
ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ		ค่าจ้างบุคลากร ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในโรงงาน ค่าน้ำ อื่นๆ

จากตารางที่ 5.1 แสดงส่วนประกอบของต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์ โดยมีอยู่ 4 ส่วนประกอบสำคัญ คือ ค่าวัตถุดิบ ค่าซ่อมบำรุง ค่าเสื่อมสภาพอุปกรณ์ และ ค่าใช้จ่ายอื่นๆ และแสดงองค์ประกอบแยกย่อยไว้ในตาราง เพื่อให้เห็นรายละเอียดต่างๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาต้นทุนการผลิตต่อชิ้นต่อไป

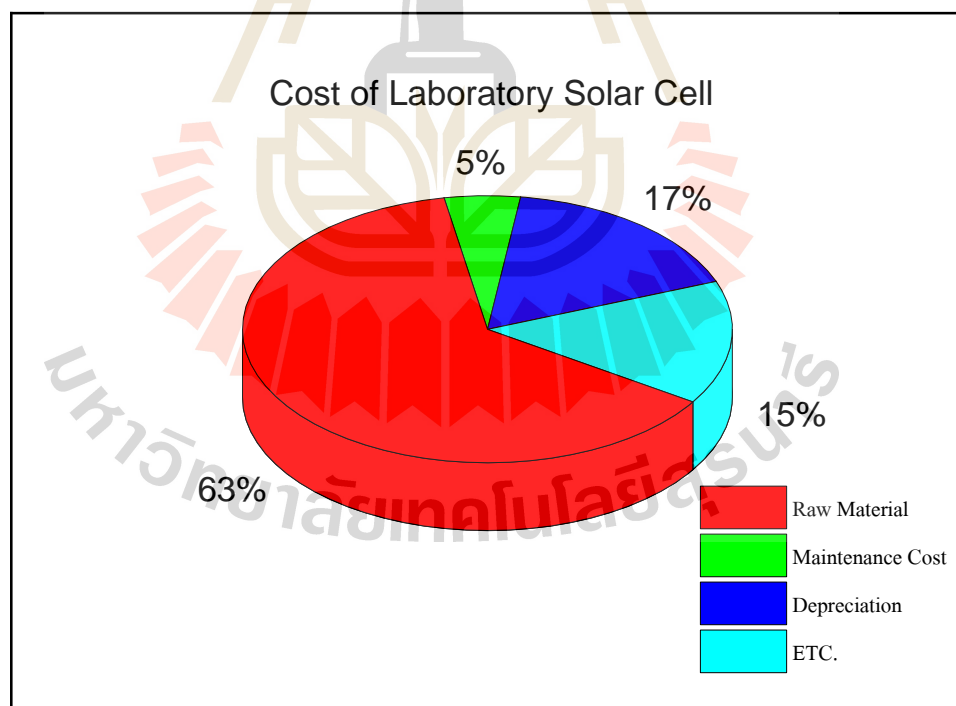
ตารางที่ 5.2 ส่วนประกอบของต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ในแลปวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์

ค่าวัตถุดิบ	แผ่นฐาน	แผ่นซิลิคอนหลายผลึก ชนิด p-Si
	สารเคมี	Hydrofluoric acid (HF)
		Ammonia (NH ₄ OH)
		Hydrochloric acid (HCl)
		Phosphoric acid (H ₃ PO ₄)
		Tetraethyl orthosilicate (TEOS)
		Ethanol (C ₂ H ₅ OH)
	ก๊าซ	NITROGEN GRADE INDUSTRIAL 99.99 %
NITROGEN GRADE PURE 99.995 %		
วัตถุดิบทำขั้วโลหะ	Silver (Ag) Paste	
	Aluminium (Al) Paste	
	ไหม Screen และ ยาง Squeegee	
ค่าบำรุงรักษา และ ตรวจสอบอุปกรณ์	เครื่องจักรมาตรฐาน เครื่องจักรประทับ ลวดลายช่องเปิด	ค่าซ่อมบำรุง รางสายพานขนส่งชิ้นงาน, มอเตอร์, หลอดไฟ IR , ท่อส่งแก๊ส , ท่อสารเคมี และชิ้นส่วนที่มีเสื่อมสภาพอื่นๆ
ค่าเสื่อมสภาพ	เครื่องจักรมาตรฐาน เครื่องจักรประทับ ลวดลายช่องเปิด	ค่าเสื่อมสภาพ อุปกรณ์ การผลิต = $\frac{\text{ราคาต้นทุนการติดตั้ง} - \text{ราคาซาก}}{\text{อายุการใช้งานของเครื่องจักร}}$
ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ		ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการผลิต ค่าน้ำ อื่นๆ

ตารางที่ 5.2 แสดงส่วนประกอบของต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ในแลปวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีอยู่ 4 ส่วนประกอบสำคัญ คือ ค่าวัตถุดิบ ค่าซ่อมบำรุง ค่าเสื่อมสภาพอุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายอื่นๆ และแสดงองค์ประกอบแยกย่อยไว้ในตาราง เพื่อให้เห็นรายละเอียดต่างๆ ซึ่งมีความแตกต่างกับระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ และนำไปสรุปเป็นอัตราส่วน ต่างๆไว้ใน รูปที่ 5.1 แสดงสัดส่วนของต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเซลล์ , ค่าการซ่อมบำรุงเครื่องจักร , ค่าเสื่อมสภาพของเครื่องจักรอยู่ที่ และ ค่าใช้จ่ายอื่นๆ โดยที่จะเห็นสัดส่วนความแตกต่างระหว่าง วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต ค่าบำรุงรักษา ค่าเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ และ ค่าใช้จ่ายอื่นๆ โดยจะพบว่า สัดส่วนของต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์ พบว่าวัตถุดิบ มีสัดส่วนสูงสุดประมาณ 57 % ของต้นทุนการผลิตทั้งหมดและมูลค่าการซ่อมบำรุงเครื่องจักรมีสัดส่วนน้อยที่สุดประมาณ 3 % ค่าเสื่อมสภาพของเครื่องจักรอยู่ที่ 19 % และค่าใช้จ่ายอื่นๆอยู่ที่ 21 %



รูปที่ 5.1 สัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของประเภทต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนในเชิงพาณิชย์



รูปที่ 5.2 สัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของประเภทต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนในแลปวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์

และ ในทางกลับกัน แสดงในรูปที่ 5.2 แสดงสัดส่วนของต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในห้องแลปปฏิบัติการและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ใน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุระนารี พบว่าวัตถุดิบมี

สัดส่วนสูงสุดประมาณ 63 % ของต้นทุนการผลิตทั้งหมดและมูลค่าการซ่อมบำรุงเครื่องจักรมีสัดส่วนน้อยที่สุดประมาณ 5 % ค่าเสื่อมสภาพของเครื่องจักรอยู่ที่ 17 % และ ค่าใช้จ่ายอื่นๆอยู่ที่ 15 % และจะนำผลตัวนี้ไปหาต้นทุนการผลิต คิดเป็น การผลิตบาท ต่อ 1 ชิ้น และต้นทุนกำลังวัตถุดิบต่อบาท และ วัตถุดิบต่อดอลลาร์สหรัฐ ออกมา และ แสดงใน ตารางที่ 5.3

โดยราคาที่จะเห็นจะแสดงราคาเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ในห้องปฏิบัติการและอุตสาหกรรมนั้น โดยจำลองเป็นการผลิต 10 ล้านชิ้นใน 1 ปี และ จัดแจง ออก มาเป็นราคาการผลิต 1 ชิ้น ของ โครงสร้างต่างๆ โดย โครงสร้างโรงงานราคาวัตถุดิบตกอยู่ประมาณ 15.03 บาท ต่อการผลิต 1 ชิ้น ส่วนของโครงสร้างใน ห้องปฏิบัติการ ตกชิ้นละ 15.03 บาท ต่อ 1 ชิ้น เช่นเดียวกันแต่มีส่วนที่เพื่อเข้ามาต่อการผลิต เช่น สารเคมี ในกระบวนการผลิตตกเพิ่มเป็น 0.375 บาท โครงสร้าง SE , สารเคมี ในกระบวนการผลิตตกเพิ่มเป็น 0.0754 บาท โครงสร้าง LBSF และ สารเคมี ในกระบวนการผลิตตกเพิ่มเป็น 0.4354 บาทโครงสร้าง SE+LBSF สรุปค่าวัตถุดิบการผลิตเป็น 15.03 บาทในโครงสร้างมาตรฐาน , ค่าวัตถุดิบการผลิตเป็น 15.41 บาทในโครงสร้างSEในห้องปฏิบัติการ,ค่าวัตถุดิบการผลิตเป็น 15.11 บาทในโครงสร้างLBSFในห้องปฏิบัติการ และ ค่าวัตถุดิบการผลิตเป็น 15.47 บาทในโครงสร้างSE+LBSFในห้องปฏิบัติการ ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักรตกราคาบาทต่อชิ้น มีการผลิต 4 โครงสร้างตก 0.78 บาท ในส่วนของโครงสร้างมาตรฐานและ โครงสร้าง SE และตก 0.7805 บาท ในส่วนของโครงสร้างLBSF และ โครงสร้าง SE+LBSF ค่าเสื่อมสภาพเครื่องจักร ตก 5 บาทต่อ 1 ชิ้น และมีค่าเครื่องประทับลาดลายด้วยสารละลายกรด คิดเป็น 0.002 บาท ต่อ 1 ชิ้น และค่าใช้จ่ายอื่นๆในโครงสร้างเชิงพาณิชย์ 5.6 บาท และผลรวมการผลิตของโครงสร้างเชิงพาณิชย์ ตกอยู่ที่ 26.41 บาทต่อชิ้น , โครงสร้าง SE ตกอยู่ที่ 26.79 บาท ต่อ ชิ้น , โครงสร้าง LBSF ตกอยู่ที่ 26.49 บาท ต่อ ชิ้น , โครงสร้าง SE+LBSF ตกอยู่ที่ 26.85 บาท ต่อ ชิ้น และ ราคากำลังผลิตตกบาท ต่อ วัตต์ ของ โครงสร้างอุตสาหกรรม เป็น 5.8421 บาท ต่อ วัตต์ และ โครงสร้าง SE 5.7015 บาท ต่อ วัตต์ โครงสร้าง LBSF 5.7377 บาท ต่อ วัตต์ และโครงสร้างผสมผสาน 5.7423 บาท ต่อ วัตต์ และเมื่อแปลงเป็นดอลลาร์สหรัฐ ต่อ วัตต์ ของโครงสร้างอุตสาหกรรม เป็น 0.1631 ดอลลาร์สหรัฐ ต่อ วัตต์ และ โครงสร้าง SE 0.1592 ดอลลาร์สหรัฐ ต่อ วัตต์ โครงสร้าง LBSF 0.1602 บาท ต่อ วัตต์ และ โครงสร้างผสมผสาน 0.1603 ดอลลาร์สหรัฐ ต่อ วัตต์ ซึ่งโดยการใช้กระบวนการสารเคมีที่ใช้ในการผลิตในห้องวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์นั้น มีแนวโน้มที่จะลดราคาการผลิตลดลงโดยให้ผลจากค่าประสิทธิภาพที่มากขึ้น

โดยการคิดต้นทุนของห้องปฏิบัติการวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะมีราคาที่ถูกกว่า เนื่องจาก โรงงาน ได้มีการใช้วัตถุดิบ ที่มากกว่า และเซลล์มาตรฐานที่ใช้ในกระบวนการเป็นการผลิตได้สั่งซื้อโครงสร้างสำเร็จรูป p/n ไม่ได้มีการสร้างชิ้นรับแสง n เอง เนื่องจากสามารถควบคุมคุณภาพการผลิตได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามการผลิตด้วยการใช้สารเคมี จะแสดงให้เห็นว่า ต้นทุนการผลิตต่อชิ้นนั้น มีราคาเพิ่มขึ้นไม่มาก ทั้งยังเป็นการประหยัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตได้ในเชิงพาณิชย์ต่อไปในอนาคตได้

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์อุตสาหกรรม กับเซลล์แสงอาทิตย์
โครงสร้างที่ผลิตในแลปวิจัยแสงอาทิตย์ในมหาวิทยาลัย

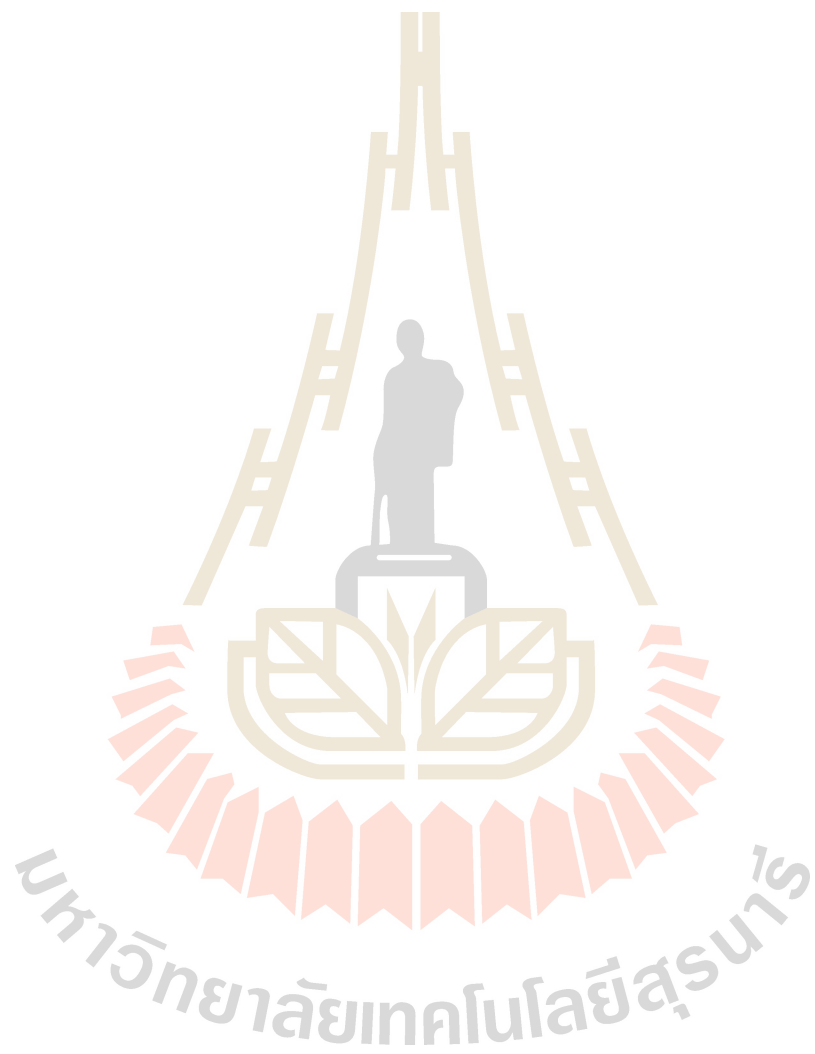
แหล่งผลิต		อุตสาหกรรม	แลปวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์		
โครงสร้าง		STANDARD CELL	SE CELL	LBSF CELL	SE + LBSF CELL
ประสิทธิภาพ	(%)	18.4	19.12	18.79	19.03
ขนาดพื้นที่รับแสง	ตร.ซม.	15.675*15.675			
จำนวนคาดการณ์การผลิตใน 1 ปี	ชิ้น	10,000,000	10,000,000	10,000,000	10,000,000
ค่าวัตถุดิบ					
วัตถุดิบมาตรฐาน					
Wafers	บาท	66,000,000	66,000,000	66,000,000	66,000,000
Chemicals	บาท	15,000,000	15,000,000	15,000,000	15,000,000
Gas	บาท	30,000,000	30,000,000	30,000,000	30,000,000
Pastes	บาท	34,720,165	34,720,165	34,720,165	34,720,165
Screen and Squeegee	บาท	4,600,000	4,600,000	4,600,000	4,600,000
		150,320,165	150,320,165	150,320,165	150,320,165
ราคาตกต่อชิ้น	บาท	15.03	15.03	15.03	15.03
วัตถุดิบที่เพิ่มเข้ามา					
Additional chemicals	บาท	-	3,600,000.00	600,000.00	4,200,000.00
Flash foam	บาท	-	-	24,000.00	24,000.00
Spin coater	บาท	-	130,000.00	130,000.00	130,000.00
ราคาตกต่อชิ้น	บาท	-	0.373	0.0754	0.4354

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์อุตสาหกรรม กับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างที่ผลิตในแลปวิจัยแสงอาทิตย์ในมหาวิทยาลัย (ต่อ)					
ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักร					
เครื่องจักรมาตรฐาน	บาท	7,800,000.00	7,800,000.00	7,800,000.00	7,800,000.00
ราคาตกต่อชิ้น	บาท	0.78	0.78	0.78	0.78
เครื่องจักรประเภทปลาย	บาท	-	-	5,000.00	5,000.00
ราคาตกต่อชิ้น	บาท			0.0005	0.0005
ค่าเสื่อมสภาพเครื่องจักร					
เครื่องจักรมาตรฐาน	บาท	50,000,000.00	50,000,000.00	50,000,000.00	50,000,000.00
ราคาตกต่อชิ้น	บาท	5	5	5	5
เครื่องจักรประเภทปลาย	บาท	-	-	20,000.00	20,000.00
ราคาตกต่อชิ้น	บาท	-	-	0.002	0.002
ค่าใช้จ่ายอื่นๆ					
ค่าใช้จ่ายอื่นๆ	บาท	56,000,000.00	56,000,000.00	56,000,000.00	56,000,000.00
ราคาตกต่อชิ้น	บาท	5.6	5.6	5.6	5.6
ผลรวมราคาทั้งหมด	บาท	264,120,165.43	267,850,165.43	264,899,165.43	268,499,165.43
ผลรวมราคาต่อชิ้น	บาท	26.41	26.79	26.49	26.85
แปลงราคา เป็นบาท ต่อ วัตต์ และ ดอลลาร์สหรัฐ ต่อ วัตต์					
กำลังวัตต์ ต่อ ชิ้น	Watt per pirce	4.52	4.70	4.62	4.68
กำลังวัตต์ ทั้งหมด	Watt	45,209,835	46,978,916	46,168,087	46,757,780
ราคาบาท ต่อ วัตต์	baht per watt	5.8421	5.7015	5.7377	5.7423

ตารางที่ 5.3 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์อุตสาหกรรม กับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างที่ผลิตในแลปวิจัยแสงอาทิตย์ในมหาวิทยาลัย (ต่อ)					
แปลงราคา เป็นบาท/วัตต์ และ ดอลลาร์สหรัฐ ต่อ วัตต์ (ต่อ)					
ราคาดอลลาร์สหรัฐ ต่อ วัตต์	USD per watt	0.1631	0.1592	0.1602	0.1603

5.3 สรุป

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการใช้ PSG และ เพื่อเป็นชั้นพาเซเวชั่น และชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ (ARC) และการใช้ชั้น BSG ที่สกัดพื้นผิวและเปิดช่องด้านหลังบางบริเวณ LBSF ที่ด้านหลัง โดยทั้งสองโครงสร้างที่กล่าวมาเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากโครงสร้างมาตรฐาน และมีต้นทุนประมาณ 0.1603 ดอลลาร์สหรัฐ ต่อ วัตต์ จากการพิจารณาความคุ้มค่าได้คาดการณ์ว่าเมื่อนำเซลล์ไปผลิตในกระบวนการมาตรฐานในระดับอุตสาหกรรมจะมีความคุ้มค่า เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตที่ถูกลงโดยการใช้สารเคมีเป็นหลัก เข้ามาในกระบวนการผลิตแทนที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูงเป็นการลดภาระค่าใช้จ่ายของโรงงานอุตสาหกรรมได้



บทที่ 6

สรุปงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปงานวิจัย

การศึกษานี้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์สารละลายฟอสฟอรัส PSG จากอัตราส่วนของสารละลาย H_3PO_4 และ TEOS เพื่อเป็นสารตั้งต้นของฟิล์มบางด้วยเทคนิค SOD ไปใช้ในกระบวนการแพร่แบบความร้อนสูงที่อุณหภูมิ $1000\text{ }^{\circ}C$ เป็นเวลา 60 นาที ผลการวัดความต้านทานไฟฟ้าแผ่นที่ต่ำที่สุดของพื้นที่สารเจือความเข้มข้นสูง (heavy dope) มีค่าน้อยกว่า $20\ \Omega/\text{sheet}$ และความต้านทานไฟฟ้าแผ่นที่สูงที่สุดของพื้นที่สารเจือความเข้มข้นต่ำ (low dope) มีค่าประมาณ $150\ \Omega/\text{sheet}$ ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับเป็นบริเวณ $n^{++}\text{-Si}$ การสังเคราะห์เป็นชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริก (Dielectric) และมีผลพลอยได้จากการบวนการแพร่ด้วยความร้อนสูงเป็นชั้นฟิล์ม PSG และ BSG ที่เกิดขึ้น ซึ่งนำมาใช้ประโยชน์เป็นชั้นพาสซีเวชันสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง ผสมผสาน ระหว่าง Selective Emitter กับ Local Back Surface Field ได้

การเปิดช่องลดความต้านทานพาสซีเวชันด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF สามารถทำได้ด้วยวิธีการประทับลายด้วยสารละลาย HF ซึ่งเป็นกระบวนการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ลดความคมชัดและมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 4 % เมื่อเทียบกับลดความต้านทานที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Layout โดยลดความต้านทานช่องเปิดที่สร้างมีขนาด 8 % บนโพลีเมตริกขนาดลดความต้านทานที่สร้างช่องเปิดรูปร่างวงกลมขนาดรัศมี 0.34 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.68 มิลลิเมตร ของช่องเปิดด้วยเทคนิคประทับลายนี้ได้ช่องเปิดบนชั้นฟิล์ม BSG รูปร่างวงกลมขนาดรัศมี 0.44 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.88 มิลลิเมตร โดยโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบโครงสร้าง LBSF และ SE+LBSF ที่สร้างขนาดไม่ต่ำกว่า $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ ด้วยเทคนิคการประทับลายนั้นยังสามารถทำได้ 2 โครงสร้าง ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE ที่มีบริเวณความต่างความเข้มข้นของพื้นที่ $n / n^{++}\text{-Si} / n^{++}\text{-Si}$ ด้านบน พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างสร้างนี้ จะให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงที่สุดคือ 3.15 % และโครงสร้างที่สองเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความต้านทานไฟฟ้าสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังที่ 11.4 % ของลดความต้านทานช่องเปิด จะให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงที่สุดคือ 3.04% และโครงสร้างมาตรฐานที่ผลิตในแลปวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์จะอยู่ที่ 2.09 % โดยให้ค่าประสิทธิภาพที่มากกว่า 1.06 % ของโครงสร้าง SE และ 0.95 % ของโครงสร้าง LBSF ตามลำดับ โดยทั้งสองโครงสร้างจะมีประสิทธิภาพมากกว่าโครงสร้างพื้นฐานที่ผลิตในแลปวิจัยและทดลองเซลล์แสงอาทิตย์

ความคุ้มค่าในเรื่องเศรษฐศาสตร์เมื่อคิดเป็นดอลลาร์สหรัฐ แล้ว มีแนวโน้มที่จะลดลงโดยโครงสร้างมาตรฐานมีต้นทุนการผลิตอยู่ที่ 0.1631 ดอลลาร์สหรัฐต่อวัตต์ และโครงสร้างผสมผสาน

SE+ LBSF มีต้นทุนการผลิตอยู่ที่ 0.1603 ดอลลาร์สหรัฐต่อวัตต์ โดยการทำให้ประสิทธิภาพที่มากขึ้น เทียบกับตัวโครงสร้างเซลล์มาตรฐานนั้นจะทำให้การลงทุนมีความคุ้มค่าและ สามารถใช้งานได้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคตต่อไป

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 ในขั้นตอนกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ควรที่จะรักษาความสะอาดทุกกระบวนการเนื่องจากมีการใช้สารเคมีในกระบวนการผลิต

6.2.2 ในการแพร่สารเจือความเข้มข้นสูงควรใช้เตาเผาที่มีการควบคุมความดัน และการให้แก๊สไนโตรเจนในกระบวนการผลิต เพื่อให้เกิดการแพร่อย่างสม่ำเสมอรวดเร็วและไม่มีสิ่งเจือปนบนชั้นฟิล์มที่ได้จากกระบวนการผลิต

6.2.3 ในการประทับลายด้วย Flash Foam ควรควบคุมปริมาณสารละลายกรดเพื่อประทับลงบนชิ้นงาน เพื่อให้ได้ลวดลายที่คมชัดและสม่ำเสมอ

6.2.4 ในการพิมพ์ลายขั้วไฟฟ้า ควรควบคุมแรงสำหรับการพิมพ์ลาย และความหนืดของกาวโลหะ(Paste) เพื่อให้ได้ลวดลายของขั้วไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ

6.2.5 ในการเผาขั้วไฟฟ้าด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว (Fast firing) ควรควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ในกระบวนการให้ความร้อนสูงอย่างยั่งยืน

เอกสารอ้างอิง

- กระทรวงพลังงาน. ชื่อเรื่อง [รายงานสถิติพลังงานปี 2561]. สืบค้นมาจาก <https://www.energy.go.th/th/annual-energy-statistics-report>
- กระทรวงพลังงาน ชื่อเรื่อง [สรุปข้อมูลรวมพลังงานทั้งประเทศไทย]. สืบค้นมาจาก <https://data.energy.go.th/factsheet/country/0/2021>
- Aberle, A.G.(2000). **Surface Passivation of Crystalline Silicon Solar Cells: A Review.** PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS. Prog. Photovolt: Res. Appl. 2000; 8: 473-487.
- Ahmad, S.M., Leong, C.S., Sopian, K., and Zaidi, S.H. (2018). **Role of firing temperature, sheetresistance, and contact area in contact formation on screen-printed metal contact of silicon solar cell.** Journal of Electronic Materials. 47(3): 2120 - 2134.
- Amonsurintawong, K., Fangsuwannarak, T., and Sopitpan, S. (2013). **Aluminum-induced crystallization of p+ silicon pinholes for the formation of rear passivation contact in solar cell.** Key Engineering Materials. 547: 31 - 40.
- Ali, K., et al. (2012). **"Spin-On Doping (SOD) and Diffusion Temperature Effect on Re-Combinations/Ideality Factor for Solar Cell Applications."** Chalcogenide Letters 9(11): 457-463.
- Antoniadis, H., Jiang, F., Shan, W., and Liu, Y. (2010). **All Screen Printed Mass Produced Silicon Ink Selective Emitter Solar Cells.** IEEE.
- Armel, D.P., Bouchaib, H., Laurent, B., Phillippe, T., and Cesar, K. (2014). **Sol-gel deposited phosphorus and boron doped thin silica films for diffused n+p and n+pp+ structures.** Physica Status Solidi. 11(11-12): 1654 - 1656.
- Balakrishnan, M., et al. (2013). **Comparison of the thermal properties of polycrystalline diamond and aluminium nitride substrates.** IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE.
- Brinker, C. J., and Scherer, G. W. **Sol-Gel SCIENCE (The Physical and Chemistry of Sol-Gel). Processing.** ACADEMIC PRESS, INC. Printed in the United States of America.
- Buckley, A. M., and Greenblatt, M. J.(1994). **Sol-Gel Preparation of Silica Gels.** Journal of Chemical Education Ed. 1994, 71(7), 599.

- Cacciato, A., et al. (2013). "Investigating manufacturing options for industrial PERL-type Si solar cells." *Solar energy materials and solar cells* 113: 153-159.
- Choi, J., et al. (2013). **A Simulation Study on the Shallow Emitter Sheet Resistance for Selective Emitter Crystalline Silicon Solar Cell with Screen Printed Etched Back Process.** *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* Vol. 10, 1767-1771.
- Dastgheib-Shirazi, A., et al. (2008). **Selective Emitter for Industrial Solar Cell Production: A Wet Chemical Approach Using A Single Side Diffusion.** *Process.* 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference.
- Dullweber, T., et al. (2016). **Emitter Saturation current densities of 22fA/cm² applied to industrial PERC solar cells approaching 22% conversion efficiency.** *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2017; 25:509-514.
- Fangsuwannarak, T., and K. Khunchana (2013). "Optical Properties of Nano-Crystalline Silicon Films Prepared By Using Sol-Gel Spin Coating Process." *The Romanian Review Precision Mechanics*(43): 106.
- Fangsuwannarak, T., Phiwpha, N., Mangkornkaew, A., and Sopiṭpan, S. (2014). **Preparation of Different Phosphorus Concentration for N+ Selective Emitter Solar Cell by Spin on Doping.** GRAND RENEWABLE ENERGY 2014 Proceedings.
- Green M.A. (2010). **Solar cells: Operating Principles, Technology and System Application.** The University of New South Wales.
- Green M.A. (2015). **The passivated emitter and rear cell (PERC): From conception to mass production.** *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 143: 190 – 197.
- Ikeda, Y., et al. (2016). "Investigation of rear localized back surface field formed from boron laser doping and screen-printed aluminum paste in high-efficiency solar cells." *Energy Procedia* 92: 404-411.
- Kim, D., et al. (2007). **Silicon solar cells with boron back surface field formed by using boric acid.** *Proc. 22nd Eur. PV Solar Energy Conf. Exhib.*
- Lee, J. Y., et al. (2004). "Boron back surface field using spin-on dopants by rapid thermal processing." *JOURNAL-KOREAN PHYSICAL SOCIETY* 44: 1581-1586.
- Lee, E., et al. (2012). "Exceeding 19% efficient 6 inch screen printed crystalline silicon solar cells with selective emitter." *Renewable energy* 42: 95-98.

- Kim, L., et al. (2014). **Laser etch back process to fabricate highly efficient selective emitter c-Si solar cells.** *Solar Energy* 109 (2014) 105-110.
- Mangkornkaew, A., and T. Fangsuwannarak (2017). **Characterization of patterns of Localized Doping Using Stamping technique for Selective n-Emitter Solar Cell Structure.** IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing.
- Pene, A. D., et al. (2014). **"Sol-gel deposited phosphorus and boron doped thin silica films for diffused n+ p and n+ pp+ structures."** *physica status solidi (c)* 11(11-12): 1654-1656.
- Scardera, G., et al. (2011). **Highly tunable single step selective emitter diffusion process using silicon ink technology.** 2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, IEEE.
- Singh, G., et al. (2014). **"Fabrication of c-Si solar cells using boric acid as a spin-on dopant for back surface field."** *RSC Advances* 4(9): 4225-4229.
- Song, K., et al. (2012). **"Selective emitter using a screen printed etch barrier in crystalline silicon solar cell."** *Nanoscale research letters* 7(1): 410.
- Tang, Y., et al. (2012). **"Preparation of n+ emitter on p-type silicon wafer using the spin-on doping method."** *Materials Science in Semiconductor Processing* 15(4): 359-363.
- Tomizawa, Y., et al. (2015). **"Laser doping of boron-doped Si paste for high-efficiency silicon solar cells."** *Japanese Journal of Applied Physics* 54(8S1): 08KD06.
- Yoshinori, I., et al. (2016). **Investigation of rear localized back surface field formed from boron laser doping and screen-printed aluminum paste in high-efficiency solar cells.** *Energy Procedia* 92: 404-411.
- Zhao, J., et al. (2004). **Recent advances of high-efficiency single crystalline silicon solar cells in processing technologies and substrate materials.** *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 82: 53 - 64.
- Zhong, S., et al. (2013). **"Mass production of high efficiency selective emitter crystalline silicon solar cells employing phosphorus ink technology."** *Solar energy materials and solar cells* 117: 483-488.
- Zeller, U., et al. (2019). **Comparison of magnetic field imaging (MFI) and magnetic field simulation of silicon solar cells.** AIP Conference Proceedings, AIP Publishing.

Zhuang, Y.F., et al. (2019). Application of SiO₂ passivation technique in mass production of silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 193: 379 - 386.





ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นฐานซีลิกอนด้วยวิธี

Radio Corporation of America (RCA)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยวิธี Radio Corporation of America (RCA)

การทำความสะอาดแผ่นฐานซิลิคอนถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธี Radio Corporation of America 1 (RCA-1) และ Radio Corporation of America 2 (RCA-2)

โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยวิธี RCA-1

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยวิธี RCA-1 เป็นวิธีที่ใช้กำจัดสารอินทรีย์บนแผ่นฐานซิลิคอน ออกจากพื้นผิว โดยใช้สารละลายที่ใช้สำหรับล้างแผ่นฐาน ประกอบไปด้วย H_2O (Deionized Water) H_2O_2 และ NH_4OH ด้วยอัตราส่วน $H_2O : H_2O_2 : NH_4OH$ เท่ากับ 5 : 1 : 1 หลังจากที่ได้สารละลาย RCA-1 แล้วให้นำแผ่นซิลิคอนลงไปแช่ในสารละลาย ณ อุณหภูมิ 70 °C นาน 10 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำ Deionized Water

2. การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยวิธี RCA-2

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยวิธี RCA-2 เป็นวิธีที่ใช้กำจัดอนุภาคของโลหะบนแผ่นฐานซิลิคอน ออกจากพื้นผิว โดยใช้สารละลายที่ใช้สำหรับล้างแผ่นฐาน ประกอบไปด้วย H_2O (Deionized Water) H_2O_2 และ HCl ด้วยอัตราส่วนของ $H_2O : H_2O_2 : HCl$ เท่ากับ 5 : 1 : 1 หลังจากที่ได้สารละลาย RCA-2 แล้วให้นำแผ่นซิลิคอนลงไปแช่ในสารละลายที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 10 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำ Deionized Water แล้วหลังจากนั้นใช้แก๊สไนโตรเจนเกรดอุตสาหกรรม 99.99 % เป่าให้แห้ง ก่อนนำไปเข้าไปกระบวนการผลิตในแต่ละกระบวนการต่อไป



ภาคผนวก ข

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

EFFECTS OF DOUBLE LAYER ANTI-REFLECTION COATING ON OPTICAL PROPERTIES AND ELECTRICAL FACTORS OF BLACK SOLAR CELLS

Warakorn Limsiri¹, Thipwan Fungsuwannarak^{1,2,*}, Kamonchanok Mekmork^{1,3}, Supanut Laohawiroj¹, Nikhil Jaden Naidoo¹ and Peerawoot Rattanawichai¹

Received: March 20, 2021; Revised: July 27, 2021; Accepted: August 16, 2021

Abstract

Solar cell coated with an anti-reflection coating (ARC) is essential for quantum efficiency improvement and light-absorbing increase. The advantage of a double layer anti-reflection coating (DLARC) to form a black solar cell with gradient index results in effective anti-reflectance. In this simulation work, the OPAL-2 simulation predicts the minimizing optical losses of various ratio thickness of DLARC layer (silicon oxynitride (SiN_xO_y) and silicon nitride (SiN_x). It was found the optimal SiN_xO_y: SiN_x ratio thickness of 0.5:0.5 to enhance the photogenerated current with a weighted reflectance (between 400 and 700 nm) around 2.03 %. In this experimental work, PV cells with SiN_xO_y/SiN_x DLARC were fabrication in the mass-scale production by varying the total thickness of DLARC layer (83-176 nm) under the optimal DLARC ratio thickness. The DLARC layer was deposited by a plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) technique to produce the refractive index of SiN_xO_y and SiN_x, of 1.74 and of 2.04, respectively. In the solar cell production process, short-circuit current values of all-black solar cells are increased by 4.17% as compared with a blue solar cell under the same firing-electrode condition. However, it was found that the decreased fill factor values of all-black solar cells in this condition are associated with more DLARC thickness, which also causes poor electrode quality such as high series-parasitic resistance. In this work, DLARC thickness of 143 nm obtains a power conversion efficiency of 18.24%, with a gain improvement of 0.53%, compared to blue PV cells coated by a single SiN_x layer with 83 nm thickness.

Keywords: Blue solar cell, black solar cell, OPAL-2 Simulation, antireflection coating, gradient-index

Introduction

The appropriate solar cell requires an anti-reflection coating (ARC) layer to suppress undesired interfacial Fresnel reflections, which leads to zero reflection at a single wavelength. The broadband wavelength of minimizing surface reflectance needs in photovoltaic (PV) application. Thus, there are many

¹ School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand. E-mail: thipwan@g.sut.ac.th

² Research Network NANOTEC-SUT on Advanced Nanomaterials and Characterization, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand.

³ Solartron Public Company Limited, Nakhon Ratchasima, 30130, Thailand.

* Corresponding author

research groups to have already suggested several techniques based on a multilayer stack of ARC (Chen and Wang, 2011; Seiffé *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2013; Alexander and May, 2020). In electronic mechanisms, the ARC film can be functional as a surface passivation layer to reduce the carrier recombination rate, which can increase the current collection on the cell surface (Dupuis *et al.*, 2009). Currently, the fabrication of a double layer anti-reflection coating (DLARC) has been studied from silicon alloys such as $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$, $\text{SiN}_x/\text{SiN}_x$ and $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ (Chen and Wang, 2011; Seiffé *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2013; Alexander and May, 2020). The DLARC film layer can reduce light reflectivity and increase the current generation by 2% compared with a single SiN_x layer because of an increase of the photon penetration into the solar cells (Chen and Wang, 2011).

However, the optimized adjustment of optical properties such as reflectance, transmittance, optical index, and thickness of the DLARC film in the term of the fabrication process is not widely studied. This article has focused on the fabrication of $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ DLARC by adjusting the thicknesses. OPAL-2 simulation was demonstrated for determining the maximize photocurrent generation in the conditions of thickness ratio of $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$. The DLARC film of the combination of $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ film and SiN_x film can be a surface passivation layer on silicon cells. Therefore, careful adjustment of the multilayer thickness has been done by a plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) technique. A refractive index value of $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ film and SiN_x film is in the range of 1.45 to 1.9 (Park *et al.*, 2017) and 1.8 to 3.2 (Santana and Morales-Acevedo, 2000) respectively. The thickness and refractive index of the film are measured by the Ellipsometer. The reflection coefficient is analyzed by UV-Visible Spectroscopy, model Cary Series UV-Vis Spectrophotometer, Agilent Technologies. In addition, program OPAL-2 was used for calculating photo generation current of PV cells with permitting ARC optimization via maximizing photocurrent for increasing the efficiency of PV cells on an industrial scale (Rudzikas *et al.*, 2020).

Experiment Details

Fabrication

The substrate with size $156 \times 156 \text{ mm}^2$ and 200 microns thickness used in this work is a multi-crystalline silicon p-type (mc-Si) doped with boron. The electrical resistance of the substrate has a range of 1-3 ohm-cm. The procedure steps of PV cells with DLARC film were shown in Figure 1.

Firstly, the surface of mc-Si sheets was etched by HF/HNO_3 solution at $8\text{-}12^\circ\text{C}$ to roughen the surface. The concentration of HF/HNO_3 solution was controlled at 5% and 20%, respectively. After that, the p-n junction was created by phosphorus diffusion in the surrounding temperature at $780\text{-}840^\circ\text{C}$ for 15 min, to form the n-type layer with sheet resistivity of 95 ohms per square centimeter which are measured by the 4-point probe technique. Then, the side surface of n-type Si was etched by HF solution with a concentration of 9.5% to protect the side short circuit and to remove the phospho-silicate glass (PSG) that obtain inevitably from the phosphorus diffusion process. In the PECVD process, DLARC films were coated on the front-side of the n-Si surface through the conveyor belt at the adjustable speed from 200 to 307 cm/min to control their film thicknesses. The PECVD used the gas mixture with the different ratio between silane gas (SiH_4) and ammonia gas (NH_3) for SiN_x layer and silane gas (SiH_4) and nitrous oxide (N_2O) for $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ layer at the pressure of 0.25 mbar and temperature of 400°C . After the PECVD process, a screen-

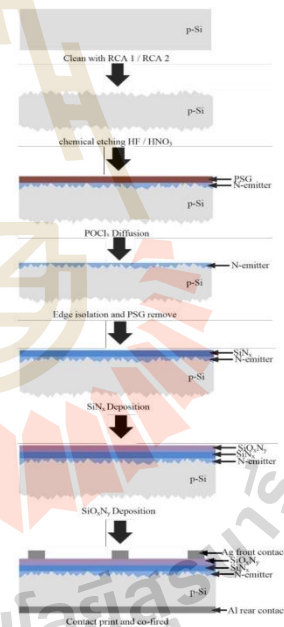


Figure 1. Fabrication process of PV cells with DLARC film

printing technique was used for metal contact production, silver and aluminum metals were are a grid electrode and a rare electrode for n-Si and p-Si of PV cell, respectively. The PV cells were taken part in the fast-firing process with a temperature of 890°C to reduce the resistance of contact with an excellent ohmic contact between the metal contact and silicon.

Electrical properties of PV cells were analyzed by Solar LED lamp simulation at the wavelength range of 370-1,100 nm with, the light intensity of 1,000 W/m² (AM1.5) and the temperatures at 25°C. In this mass-production scale, 150 PV cells were produced in each thickness condition. A PV cell in each condition was selected randomly for the characterizations including thickness, refractive index, and the coefficient of reflection.

Results and Discussion

Set-up Parameters in OPAL Simulation

Freeware program OPAL-2 is a rapid optical simulation of silicon solar cells to compute the optical losses associated with the front surface of a Si solar cell. In this paper, OPAL-2 was set-up the functionality to include any illumination angle of incidence and polarization with AM1.5g, spherical caps, which have been demonstrated to approximate isotextured polycrystalline Si with charater angle of 87 degree. PECVD technique 2.03 (Dut12) and 80% N (Sopra) were selected for the first SiN_x film and SiN_{0.5}O_{0.5} film, respectively. Both films were adjusted

from 0 to 160 microns on the 200 microns substrate width. PECVD technique 2.03 (Dut12) and 80% N (Sopra) were selected for the first SiN_x film and SiN_{0.5}O_{0.5} film, respectively. The parameters were keyed in the OPAL:2 program as shown in Figure 2.

Figure 3 depicts the relationship between photocurrent absorption and the optical loss of the ratio of SiN_x and SiO_xN_y layer on the Si solar cells, as determined by OPAL 2. The decrease of SiN_x ratio from 1 to 0.5 shows the slightly increase of the photocurrent absorption in the samples, while the reduction of optical loss is found, however, the photocurrent absorption decreases with a rise in optical loss when the SiN_x ratio decreases from 0.5 to 0. It is noticed that a ratio of 0.5:0.5 between SiN_x and SiO_xN_y provides the highest photocurrent absorption in samples and effectively lowers optical loss.

Optical Properties: OPAL-2 Simulation

The sample are defined fabricate with SiO_xN_y: SiN_x ratio of DLARC layers by OPAL-2 in Table 1 shows the photocurrent generation of the PV cells including photocurrent incident (J_{INC}), photocurrent reflected (J_R), photocurrent absorbed in the DLARC film (J_A), and photocurrent absorbed in the substrate (J_G). The OPAL-2 simulation prediction is found the 3.67% minimizing optical losses of SiN_xO_y: SiN_x ratio of 0.5:0.5 to enhance the photogenerated current with a weighted reflectance around 2.03%. The minimizing reflectance wavelength at 660 nm

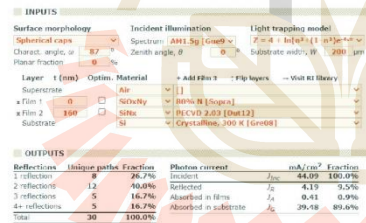


Figure 2. Parameters setting for OPAL 2 freeware

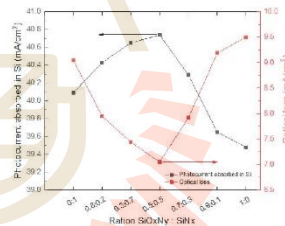


Figure 3. Calculated photocurrent absorbed in p-n Si bulk and optical loss of the samples using OPAL-2 simulation

Table 1. Calculated photocurrent generation of PV cells in the various SiO_xN_y: SiN_x ratio of DLARC layers by OPAL-2 program

Samples	Thickness		Photo current (mA/cm ²)			Optical loss (%)	Weight reflectance (%)
	SiN _x	SiO _x N _y	Reflected	Absorbed in ARC	Absorbed in P-N Si	J _R /J _{in}	%WR from 400-700 nm
1	0	160	3.99	0	40.09	9.05	12.75
2	32	128	3.57	0.09	40.43	7.95	11.34
3	48	112	3.28	0.16	40.65	7.44	10.04
4	80	80	3.11	0.24	40.74	7.05	8.82
5	112	48	3.49	0.31	40.29	7.92	9.92
6	144	16	4.05	0.38	39.65	9.19	10.95
7	160	0	4.19	0.41	39.48	9.50	10.80

Table 2. Refractive index values of DLARC films with the different total DLARC thicknesses on p-n Si substrates

Group	Belt speed (cm/min)	Thickness (nm)			Refractive index	
		SiN _x	SiO _x N _y	Total	SiN _x	SiO _x N _y
A	205	82.32	94.56	176.88	2.00	1.62
B	230	76.12	81.57	157.69	2.01	1.69
C	256	70.95	71.93	142.88	2.04	1.76
D	282	67.61	66.51	134.12	2.07	1.79
E	307	61.95	66.29	128.24	2.09	1.83
F	200	83.00	-	83.00	2.08	-

is shifted onto shorter wavelength region with an increase in SiO_xN_y fraction of DLARC layer (Rudzikas *et al.*, 2020; McIntosh and Baker-Finch, 2012).

The Optical Properties of the Produced DLARC Layer

Table 2 details the reflective index and thickness of DLARC films with SiN_x:SiO_xN_y ratio thickness of 0.5:0.5 (Wang *et al.*, 1974). The total DLARC thicknesses were adjusted about 176-128 nm depending on an increase in the speed of conveyor belt of PECVD process. The decrease of SiO_xN_y thickness strongly depends on the increasing change of its refractive index from 1.62 to 1.83,

Table 3. %WR of DLARC films on the surface of PV cells with the different thickness compared with single SiN_x film

Sample	Weight Reflectance (%WR) at wavelength range		
	280-550 nm	550-800 nm	280-800 nm
A	4.58	5.74	5.13
B	4.94	5.93	5.41
C	5.56	5.05	5.31
D	5.63	4.62	5.14
E	5.33	4.26	4.81
F	6.92	4.17	5.60

while the r-refractive index of SiN_x slightly decreases from 2.09 to 2.00 with a decrease in SiN_x thickness. This refractive index arrangement provides the appropriate DLARC film on PV cells for reducing the sun light reflection and enhancing the photon absorption.

Figure 4 showed the measured reflectance (%R) of DLARC film in in wavelength between 200-800 nm. The minimizing reflectivity occurring at 2 wavelengths in the visible range achieved through SiO_xN_y:SiN_x DLARC layer.

The Refractive index is a property of material. It doesn't depend upon glass thickness. Refractive index is one of optical constants for a material. SiN_x not related to thickness because where the thickness changes, the refractive index not change much (steady values) on the other hand SiO_xN_y is change as a result of process fabrication. the lowest %R of both SiN_x ARC and DLARC shows the wavelength around 640 nm but the DLARC film provides another second low point of %R at around 430 nm. The %WR values at 200-800 nm wavelength of all DLARC samples are less than that of single SiN_x ARC in particular the range of 280-550 nm (blue light region) as detailed in Table 3. It seems that 83 nm SiN_x ARC sample from calculated and measured have difference %WR because of the equivalent of material setting parameters such as type of microcrystalline Si and texture surface. However, the increase of DLARC thickness shows an increase in %WR at 500-800 nm (Orange light region). The low %R at a blue light region of DLARC samples with various thicknesses can imply directly to the color of the DLARC samples. The darker colors of

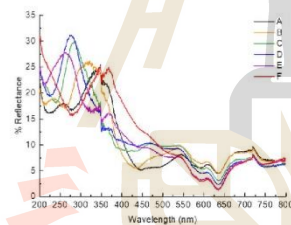
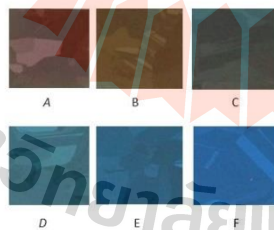
**Figure 4. Reflectance of DLARC films on the surface of PV cells with the different thickness****Figure 5. The change of PV cell colors with the different DLARC thicknesses**

Table 4. Electrical characteristics of PV cells with the different DLARC thicknesses and single SiN_x ARC

Group	PCE (%)	Fill factor (%)	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	I _{max} (A)	V _{max} (V)	R _s (ohm)
A	18.13	78.4	8.93	0.63	8.39	0.53	0.00258
B	18.22	78.4	8.97	0.63	8.42	0.53	0.00254
C	18.24	78.34	8.98	0.63	8.43	0.53	0.00254
D	18.18	78.42	8.96	0.63	8.41	0.53	0.00251
E	18.12	78.42	8.92	0.63	8.38	0.53	0.00248
F	17.71	79.29	8.62	0.63	8.11	0.53	0.00182

DLARC samples with increasing DLARC thickness are illustrated in Figure 5. Thus, SiO_xN_y:SiN_x DLARC can better absorb the high photon energy (blue wavelength) than a single SiN_x ARC sample.

The Electrical Characteristics of the PV Cells

Table 4 shows the electrical characteristic results of PV cells with the different DLARC thicknesses and single SiN_x ARC. It was observed that all samples generate the V_{oc} and V_{max} at 0.63V and 0.53V, respectively. The samples with DLARC layer (sample A-E) provide more power conversion efficiency (%PCE) than the single SiN_x ARC sample, which relate to lower %WR comparing sample F due to more photon absorption ability. It also results in more photocurrent generation with more I_{sc} and I_{max}. Although, the optimal SiO_xN_y:SiN_x ratio thickness of 0.5:0.5 was predicted to result in the improvement of %PCE of PV cells in the mass-scale production, the total DLARC thickness is still an important drawback and effects to an increase in the series resistance (R_s) in the cells. Increasing R_s value directly affects a decrease of fill factor (FF) (Green, 1982) and a suppressing PCE% improvement as depicted in Figure 6. In this paper, the PV cells with SiO_xN_y:SiN_x DLARC layer show the PCE% improvement around 18.12-18.24%.

The fill factor is the ratio of the actual maximum obtainable power to the product of the open circuit voltage and short circuit current. This is

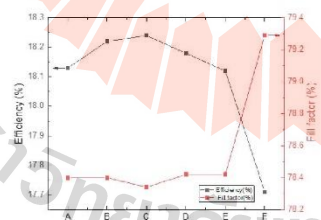


Figure 6. Fill factor and %PCE of PV cells with the different DLARC thicknesses and single SiN_x ARC

parameter in evaluating performance in solar cell technology. (Blakers *et al.*, 2013)

$$FF = FF_0 \left(1 - \frac{R_s I_{sc}}{V_{oc}}\right) \quad (1)$$

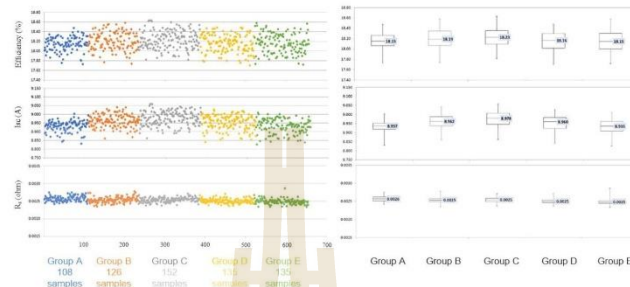
when FF : Fill factor
 FF_0 : ideal fill factors
 R_s : series resistance ; Ω
 I_{sc} : current short circuit ; A
 V_{oc} : voltage open-circuit ; V

If R_s is a lot less than this quantity or R_sH a lot larger, there will be little effect upon the fill factor. Defining a normalized resistance, R_s/R_{th} , an approximate expression for the fill factor in the presence of series resistance.

Group C have high efficiency more than other group because high I_{sc}, measurements and graph plots using the company's specialized equipment in the solar cell industry by Solartron Public Company Limited in a lot production condition in the production condition of 100 pieces condition by the terms group A produces 108 pieces, B produces 126 pieces, C produces 152 pieces, D and E produces 135 pieces. the results are shown in Figure 8, with the highest, lowest and middle values of the manufactured workpiece, and Table 5 shows the values from conditions A to F.

Conclusions

SiN_xO_y : SiN_x double layer anti-reflection coating (DLARC) on PV cell can form a black solar cell with gradient index results in an improvement of photocurrent generation. The OPAL-2 simulator predicts the minimizing optical losses of 3.67% for 0.5:0.5 SiN_xO_y : SiN_x ratio thickness of DLARC layer due to the enhancement of the photogenerated current and low %WR around 2.03%. PV cells with SiN_xO_y : SiN_x DLARC and SiN_x ARC were fabrication in the mass-scale production under the optimal DLARC ratio thickness of 0.5:0.5 condition. The minimizing reflectance of SiO_xN_y:SiN_x DLARC samples found at 2 wavelengths around 430 nm and 640 nm. However, the increase of total DLARC thickness shows an increase in %WR at

Figure 8. efficiency, I_{sc} , R_s of PV cells with the different DLARC thicknessesTable 5. Electrical measurements of PV cells with the different DLARC thicknesses and single SiN_x ARC

Group	Data type	Efficiency (%)	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	Fill Factor (%)	R_s (ohm)
A	Max	18.47	9.00	0.636	78.51	0.00269
	Mean	18.15	8.937	0.630	78.45	0.00262
	Min	17.67	8.843	0.624	78.00	0.00248
B	max	18.58	9.04	0.636	78.60	0.00253
	Mean	18.19	8.96	0.630	78.40	0.00260
	min	17.69	8.85	0.623	77.85	0.00240
C	Max	18.63	9.06	0.637	78.57	0.00253
	Mean	18.23	8.97	0.631	78.35	0.00250
	min	17.82	8.86	0.625	77.74	0.00248
D	Max	18.48	9.02	0.634	78.62	0.00253
	Mean	18.16	8.96	0.629	78.38	0.00250
	Min	17.71	8.84	0.623	78.35	0.00240
E	Max	18.58	9.01	0.637	78.81	0.00293
	Mean	18.15	8.93	0.629	78.43	0.00250
	Min	17.73	8.835	0.624	77.5	0.00248
F	Max	18.11	8.70	0.636	79.66	0.0017

500-800 nm (Orange light region). The dark colors of DLARC samples (black cells) with an increasing DLARC thickness can better absorb higher photon energy (blue wavelength) than a single SiN_x ARC sample. The samples with DLARC layer (black cells) provide the PCE% improvement around 18.12-18.24% compared with the single SiN_x ARC sample with 17.71% PCE. It also results from the more photocurrent generation with more I_{sc} and I_{max} . However, the total DLARC thickness directly effects to an increase in the series resistance (R_s) in the cells resulting in a suppressing PCE% improvement.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge Suranaree University of Technology (SUT), for financial for supports providing technical research encouragement and measurements.

References

- Alexander, Z.Ç. and May, J. (2020). Design Technics: Archaeologies of Architectural Practice: U of Minnesota Press.
- Blakers, A., Zin, N., McIntosh, K.R., and Fong, K. (2013). High efficiency silicon solar cells. *Energy Procedia*, 33:1-10.
- Chen, F. and Wang, L. (2011). Light trapping design in silicon-based solar cells. *Solar Cells-Silicon Wafer-Based Technologies*, ISBN: 978-953-307-747-5, InTech, Croatia.
- Dupuis, J., Lelièvre, J.-F., Fourmond, E., Niehiporuk, O., Le Quang, N., and Lemiti, M. (2009). $\text{SiO}_x\text{Ny-SiN}_x$ double antireflection layer for multicrystalline silicon solar cells. In: *The 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference (PVSEC 2009)*, Proceeding of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg Germany, p. 1,636-1,639.
- Green, M.A. (1982). *Solar cells: operating principles, technology, and system applications*. Englewood Cliffs, p. 96-98.
- Kim, J., Park, J., Hong, J.H., Choi, S.J., Kang, G.H., Yu, G.J., Kim, N.S., and Song, H.-c. (2013). Double antireflection coating layer with silicon nitride and silicon oxide for crystalline silicon solar cell. *J. Electrocer.*, 30(1):41-45.

- McIntosh, K.R. and Baker-Finch, S.C. (2012). OPAL 2: Rapid optical simulation of silicon solar cells. In: The 2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Austin, 3-8 June 2012, 265-271.
- Park, S., Park, H., Kim, D., Nam, J., Yang, J., Lee, D., Min, B.K., Kim, K.N., Park, S.J., Kim, S., Suh, D., Kim, D., Lee, H.S. and Kang, Y. (2017). Continuously deposited anti-reflection double layer of silicon nitride and silicon oxynitride for selective emitter solar cells by PECVD. *Current Appl. Phys.*, 17(4):517-521.
- Rudzikas, M., Šetkus, A., Stange, M., Ulbikas, J., and Ulyashin, A. (2020). Simple interference based colorization of Si based solar cells and panels with ITO/SiNx: H double layer antireflective coatings. *Solar Energy*, 207:218-227.
- Santana, G. and Morales-Acevedo, A. (2000). Optimization of PECVD SiN: H films for silicon solar cells. *Solar energy materials and solar cells*, 60(2):135-142.
- Seiffe, J., Gautero, L., Hofmann, M., Rentsch, J., Preu, R., Weber, S., and Eichel, R.A. (2011). Surface passivation of crystalline silicon by plasma-enhanced chemical vapor deposition double layers of silicon-rich silicon oxynitride and silicon nitride. *J. Appl. Phys.*, 109(3):034105.
- Wang, E., Yu, F., Simms, V., Brandhorst Jr, H., and Broder, J. (1974). Optimum design of antireflection coating for silicon solar cells.



ประวัติผู้เขียน

นาย วรากร ลีมีศิริ เกิดเมื่อวันที่ 9 มกราคม พ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษาระดับชั้น มัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย จังหวัดนครราชสีมา และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ. 2555 ขณะกำลังศึกษาได้ทำโครงการเรื่อง การศึกษาความเป็นไปได้เชิงเทคนิคในการแปรรูปขยะพลาสติกเป็นพลังงาน : TECHNICAL FEASIBILITY STUDY OF ENERGY RECOVERY FROM PLASTIC WASTES และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเมื่อปี พ.ศ. 2559 ได้ผ่านการทดสอบความรู้หลักสูตร ผู้รับผิดชอบด้านพลังงานสามัญ (อาคาร) ควบคุม และ ผ่านการทดสอบความรู้หลักสูตรผู้รับผิดชอบด้านพลังงานสามัญ (โรงงาน) ควบคุม จากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ในปี พ.ศ. 2559

ในปี พ.ศ. 2560 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะศึกษาได้รับทุนการศึกษาและวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก (OROG) ประจำปีงบประมาณ 2562 แก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับมา และ ทุน นำเสนอผลงานระดับบัณฑิตศึกษา จากสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มีผลงานวิจัยทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ : การประชุมวิชาการในระดับนานาชาติ The^{2nd} Materials Research Society of Thailand International Conference 2019 เรื่อง Gradient-index Antireflection Coating Effects on Optical Properties and Electrical Factor of Black Solar Cell Manufacturing (MRS 2019) , Pattaya , Thailand และ การประชุมวิชาการในระดับนานาชาติ The 21st International Union of Materials Research Societies - International Conference in Asia 2020 เรื่อง Effects of Double Layer Anti-Reflection Coating on Optical Properties and Electrical Factors of Black Solar Cells(IUMRS- 2020) , Chiang Mai , Thailand