

การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Local back passivation จากลวดลายของ
ฟิล์ม Borosilicate glass ด้วยสารละลายโบรอน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**STUDY OF LOCAL BACK PASSIVATION SOLAR CELL
STRUCTURE USING PATTERNS OF BOROSILICATE
GLASS FILM BY BORON SOLUTION**

Kamonchanok Mekmork



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

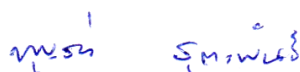
Suranaree University of Technology

Academic Year 2019

การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Local back passivation จากลวดลาย
ของฟิล์ม Borosilicate glass ด้วยสารละลายโบรอน

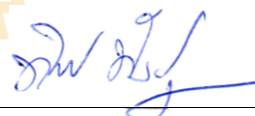
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์




(ผศ. ดร.บุญส่ง สุตะพันธ์)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ดร.รุ่งเรือง พัฒนากุล)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

และพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

รักษาการแทนคณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กมลชนก เมฆหมอก : การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Local back passivation จาก
ลวดลายของฟิล์ม Borosilicate glass ด้วยสารละลายโบรอน (STUDY OF LOCAL BACK
PASSIVATION SOLAR CELL STRUCTURE USING PATTERNS OF BOROSILI-
CATE GLASS FILM BY BORON SOLUTION) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์, 136 หน้า.

โครงสร้างด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนรอยต่อ p/n-Si มีส่วนประกอบของชั้น
ฟิล์มบางไดออกไซด์ทริกที่มีลวดลายช่องเปิดขนาดเล็ก เพื่อให้เกิดบริเวณพาหะที่ผิวสัมผัสที่แผ่น
ฐานซิลิคอนด้านหลัง เรียกว่า Local back passivation หรือ Local back surface field (LBSF) บริเวณ
นี้ยังเกิดสนามไฟฟ้าภายในชั้น ซึ่งลักษณะที่เกิดขึ้นเหล่านี้ส่งผลให้การรวมตัวใหม่ของพาหะที่
บริเวณด้านหลังลดลง ในปัจจุบันการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ในอุตสาหกรรมนิยม
ใช้วิธีที่ใช้พลังงานสูง เช่น เลเซอร์ ซึ่งจะทำให้พื้นผิวเซลล์เกิดความเสียหายได้ง่าย ดังนั้นงานวิจัยนี้
จึงได้ทำการศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนโครงสร้าง LBSF ด้วยวิธีต้นทุนต่ำจากการ
สร้างลวดลายช่องเปิดขนาดเล็กจากฟิล์มบางไดออกไซด์ทริกด้วยวิธีการประทับลาย ซึ่งเป็นหลักการ
สกัดผิวด้วยสารละลายเคมี ทำให้ไม่เกิดความเสียหายที่รอยสัมผัสซิลิคอน

งานวิจัยนี้ได้สร้างบริเวณ p⁺-Si ด้านหลังบางบริเวณด้วยการใช้สารละลายโบรอนที่มี
เปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอนเท่ากับ 0.15% โดยผ่านวิธีการประทับลายและแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ
1150°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เกิดบริเวณ p⁺-Si ที่เหมาะสมโดยมีความต้านทานไฟฟ้าแผ่น
ประมาณ 46 Ω/sheet นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มบางไดออกไซด์ทริกชนิดต่าง ๆ ได้แก่
ฟิล์มฟอสโฟซิลิเกต (Phosphosilicate glass, PSG) และฟิล์มโบโรซิลิเกต (Borosilicate glass, BSG)
จากกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน ฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) จากกระบวนการ Dry
oxidation และฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ (Si₃N₄) จากกระบวนการ Sputtering และ Plasma enhanced
chemical vapor deposition (PECVD) เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับเป็นชั้นพาหะในเซลล์
แสงอาทิตย์ซิลิคอนโครงสร้าง LBSF

โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบที่ได้พิจารณาในการศึกษานี้ แบ่งได้เป็น 2 โครงสร้าง
คือ เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG เป็นชั้นไดออกไซด์ทริก
ด้านหลัง โดยเซลล์ในโครงสร้างมีความต้านทานไฟฟ้าแผ่นด้านรับแสงในช่วง 110 - 130 Ω/sheet
โครงสร้างนี้ให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงที่สุด คือ 5.30% ในเงื่อนไขที่มีสัดส่วนพื้นที่
ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ที่ 15% และเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p⁺-Si โดย
การศึกษานี้ได้ใช้บริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si₃N₄ เป็นชั้นไดออกไซด์ทริกด้านหลัง โครงสร้างนี้ให้ค่า
ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงที่สุด คือ 8.76% ในเงื่อนไขที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้น

ฟิล์ม Si_3N_4 ที่ 15% อีกทั้งเมื่อนำเงื่อนไขที่ดีที่สุดมาจำลองด้วยโปรแกรม PC1D จากผลการจำลองพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบโครงสร้าง LBSF ด้วยวิธีการประทับลายให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานกว่า 1.43% และเมื่อนำมาคำนวณความคุ้มค่าทุนในการผลิตเชิงอุตสาหกรรม พบว่าราคาต้นทุนต่อวัตต์ลดลงมากกว่า 3.71% เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF จากผลลดาของฟิล์มบางไดโอดีกริกจากวิธีการประทับลาย จึงมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมได้



สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา กมลชนก
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา อ. น. น. น.

KAMONCHANOK MEKMORK : STUDY OF LOCAL BACK
PASSIVATION SOLAR CELL STRUCTURE USING PATTERNS OF
BOROSILICATE GLASS FILM BY BORON SOLUTION. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. THIPWAN FANGSUWANNARAK, Ph.D.,
136 PP.

LOCALBACK PASSIVATION SOLAR CELL/DOPANT SOLUTION
DIELECTRIC FILM/STAMPING

The rear structure of p/n junction silicon solar cell consists of a thin dielectric layer with its opening pattern. This will lead to perform in the surface passivation at the rear called as local back passivation or local back surface field (LBSF). The LBSF area also behaves as an internal electric field. This behavior results in a lower carrier recombination at the rear cell. Nowadays, many industrial fabrication techniques for LBSF solar cells are using high-power methods such as laser ablation. This will cause the cell surface to become easily damaged. Therefore, this research has been studied for the preparation of LBSF silicon solar cell structure with a low-cost method by using pattern-stamped approach to form a small opening pattern of a thin dielectric film. This chemical etching concept is able to avoid the silicon surface damage.

In this research, the pattern area of heavily dopant p⁺-Si on the local rear areas was demonstrated with using 0.15 at% through the stamping method and subsequent thermal diffusion at 1150°C for 30 minutes. The appropriate p⁺-Si localized arear obtains the sheet resistance at 46 Ω/sheet. Furthermore, the synthesis of various types of dielectric film, including phosphosilicate glass (PSG), borosilicate glass (BSG),

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยระดับปริญญาโท จากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน ประจำปีงบประมาณ 2561 ชื่อโครงการ การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Local back passivation จากลวดลายของฟิล์ม BSG ด้วยสารละลายโบรอน ผู้วิจัยได้รับทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก (OROG) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และทุนนำเสนอผลงานระดับบัณฑิตศึกษา จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อีกทั้งงานวิจัยนี้ได้รับการช่วยเหลืออย่างดียิ่ง จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำปรึกษาทั้งทางด้านการวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย แนวทางการดำเนินชีวิตตลอดช่วงระยะเวลาในการทำงานวิจัย อีกทั้งยังคอยให้กำลังใจและเป็นแบบอย่างที่ดีให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ดร.ทวิวัฒน์ กระจ่างสังข์ นักวิจัยประจำห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ดร.พัฒนพงศ์ จันทร์พวง นักวิจัยประจำสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) คุณบีทมา วงษ์ถั่วทอง ประธานเจ้าหน้าที่บริหาร บริษัทโซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย ตลอดจนให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการและชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ

คุณอัญชุลี รักคำนกลาง และพนักงานธุรการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่อำนวยความสะดวก ให้ความรู้และแนวทางต่าง ๆ ในการดำเนินงาน

เพื่อนร่วมวิจัยทุกท่าน ที่ห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์ อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี และเพื่อนร่วมงานทุกท่าน ที่บริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการดำเนินงานวิจัย

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้กับบิดาและมารดาซึ่งเป็นที่ยรักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉุ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	7
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	7
2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ปรีทัศน์วรรณกรรม.....	8
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.2.1 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์.....	12
2.2.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si.....	13
2.2.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์.....	15
2.2.4 การสูญเสียในเซลล์แสงอาทิตย์.....	19
2.2.5 หลักการเกิดสนามไฟฟ้าที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ (Back Surface Field, BSF).....	21
2.2.6 กระบวนการสร้างชั้น Ag - FSF.....	23
2.2.7 กระบวนการสร้างชั้น Al - BSF.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.8 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนประสิทธิภาพสูง.....	26
3 การศึกษาการสร้างและวิเคราะห์ผลของชั้นรอยต่อ ชั้นฟิล์มไดออกไซด์และ	
ขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์	30
3.1 การสร้างชั้นฟิล์มสารเจือโบรอน	30
3.1.1 การเตรียมสารละลายโบรอนสำหรับการแพร่สารเจือบริเวณ	
p ⁺ -Si.....	30
3.1.2 การสร้างลวดลายฟิล์มสารเจือโบรอนด้วยวิธีประทับลาย	
(Stamp).....	31
3.1.3 การแพร่สารเจือโบรอนด้วยความร้อน (Thermal Diffusion).....	35
3.1.4 การวัดความต้านทานแผ่นของบริเวณ p ⁺ -Si.....	36
3.2 การสร้างรอยต่อ p/n-Si ด้วยวิธี Spin on dopant (SOD).....	41
3.2.1 การเตรียมสารละลายฟอสฟอรัสสำหรับการแพร่สารเจือในชั้น	
n-Si.....	41
3.2.2 การสร้างชั้นฟิล์มสารเจือฟอสฟอรัสด้วยวิธีหมุนเหวี่ยง	
(Spin -coating).....	42
3.2.3 การแพร่สารเจือฟอสฟอรัสด้วยความร้อน (Thermal Diffusion)	43
3.2.4 ความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น n-Si ที่สร้างได้จากวิธี SOD	44
3.3 การสร้างชั้นฟิล์มไดออกไซด์ชนิดต่าง ๆ.....	44
3.3.1 การสร้างชั้นฟิล์มไดออกไซด์จากฟิล์ม PSG และ BSG.....	44
3.3.2 การสร้างชั้นฟิล์มไดออกไซด์จากฟิล์ม SiO ₂	45
3.3.3 การสร้างชั้นฟิล์มไดออกไซด์จากฟิล์ม Si ₃ N ₄	45
3.3.4 ความหนาและดัชนีหักเหแสงของชั้นฟิล์มไดออกไซด์.....	46
3.3.5 ค่าการสะท้อนแสงกลับที่ผิวของชั้นฟิล์มไดออกไซด์.....	48
3.3.6 พันธะทางเคมีของชั้นฟิล์มไดออกไซด์.....	49
3.4 การสร้างขั้วไฟฟ้าแบบ โอห์มิก (Ohmic contact)	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4 การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบโครงสร้าง Local back passivation และวิเคราะห์ผล.....	58
4.1 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างพาสซิเวชันด้านหลัง	58
4.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างที่มีบริเวณ p^+ -Si และพาสซิเวชันด้านหลัง.....	70
4.3 การจำลองผลด้วย PC1D ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 ด้านหลัง	81
5 การศึกษาเชิงเศรษฐศาสตร์ และวิเคราะห์ผล	86
6 สรุปงานวิจัย และข้อเสนอแนะ	89
6.1 สรุปงานวิจัย	89
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	90
รายการอ้างอิง	91
ภาคผนวก	96
ภาคผนวก ก ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นฐานซิลิคอนด้วยวิธี Radio Corporation of America (RCA).....	96
ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอนในสารละลาย.....	98
ภาคผนวก ค วิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัสในสารละลายฟอสฟอรัส	104
ภาคผนวก ง วิธีการคำนวณหาความลึกของอะตอมสารเจือวิธีของ Fick's first law	108
ภาคผนวก จ ขั้นตอนการเตรียม Flash foam	112
ภาคผนวก ฉ ผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะ (Lifetime) ด้วยเครื่อง Photoconductance lifetime tester.....	116
ภาคผนวก ช ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม PC1D	121
ภาคผนวก ซ บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	130
ประวัติผู้เขียน.....	136

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	แผนภาพเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF แบบต่าง ๆ3
1.2	ราคาแผงเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานเปรียบเทียบกับ โครงสร้าง PERC ของบริษัทต่าง ๆ.....4
3.1	ปริมาณส่วนประกอบของสารละลายโบรอน 30
3.2	ผลการวัดขนาดลวดลายฟิล์มสารเจือ โบรอน 35
3.3	เงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลาในการแพร่สารเจือโบรอน 36
3.4	ปริมาณส่วนประกอบของสารละลายฟอสฟอรัส 41
3.5	ผลการวัดค่าทางไฟฟ้าของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูง อย่างรวดเร็วในเงื่อนไขต่าง ๆ 54
4.1	ผลการวัดขนาดลวดลายช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG..... 61
4.2	ผลการวัดค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิด ชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง กรณีที่ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 90 - 110 Ω /sheet..... 62
4.3	ผลการวัดค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิด ชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง กรณีที่ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 110 - 130 Ω /sheet 63
4.4	ผลการวัดค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิด ชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง กรณีที่ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 130 - 150 Ω /sheet 64
4.5	ผลการวัดค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p ⁺ -Si และพาสซีเวชันด้านหลัง 73
4.6	ผลการวัดค่าช่วงชีวิตและอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่พื้นผิวของ เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p ⁺ -Si ในเงื่อนไขสัดส่วนพื้นที่ช่อง เปิดของชั้นฟิล์ม Si ₃ N ₄ PECVD ด้านหลัง..... 79

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7 การกำหนดตัวแปรสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการแปลงพลังงานด้วยโปรแกรม PC1D	82
4.8 ผลการวัดค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลอง PC1D	84
5.1 ส่วนประกอบของต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์	86
5.2 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนหลายผลึกโครงสร้างมาตรฐานอุตสาหกรรมในประเทศไทยกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p ⁺ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกด้านหลัง	88
ข.1 ปริมาตรส่วนประกอบของสารละลายโบรอนที่มีเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอน 0.15%	99
ข.2 มวลโมเลกุลและความหนาแน่นของสารตั้งต้นของสารละลายโบรอน	99
ข.3 ปริมาตร มวลและจำนวนโมลของสารตั้งต้นของสารละลายโบรอน	101
ข.4 จำนวนโมเลกุลอะตอม ความหนาแน่นอะตอมและเปอร์เซ็นต์ของอะตอมสารตั้งต้นของสารละลายโบรอน	103
ค.1 ปริมาตร มวลโมเลกุล และความหนาแน่นส่วนประกอบของสารละลายฟอสฟอรัสที่มีเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัส 0.385%	105
ค.2 ปริมาตร มวลและจำนวนโมลของสารตั้งต้นของสารละลายฟอสฟอรัส	106
ค.3 จำนวนโมเลกุลอะตอม ความหนาแน่นอะตอมและเปอร์เซ็นต์ของอะตอมสารตั้งต้นของสารละลายฟอสฟอรัส	107
ง.1 ค่าความลึกของชั้น p ⁺ -Si ที่ได้จากการแพร่สารเจือโบรอนในเงื่อนไขต่าง ๆ	111
ง.2 ค่าความลึกของชั้น n-Si ที่ได้จากการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสในเงื่อนไขต่าง ๆ	111
จ.1 ความยาวทั้งหมดและพื้นที่ของช่องเปิดและช่องปิด และสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด	113

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Local back passivation หรือเรียกว่า Local back surface field (LBSF)	2
1.2 แนวโน้มเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างต่าง ๆ จากปัจจุบันจนถึงอนาคต.....	3
1.3 ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF เทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน	6
2.1 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างรอยต่อ p/n-Si.....	13
2.2 (ก) กลไกการเดินทางของพาหะในแถบพลังงานของรอยต่อ p/n-Si ที่ภายใต้สภาวะมืดและ (ข) วงจรสมมูลไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะมืด	14
2.3 (ก) กลไกการเดินทางของพาหะในแถบพลังงานของรอยต่อ p/n-Si ในสภาวะได้รับแสงและ (ข) วงจรสมมูลไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สภาวะได้รับแสง	14
2.4 การเปรียบเทียบของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I) และแรงดันไฟฟ้า (V) ภายใต้สภาวะมืดและสภาวะได้รับแสง.....	16
2.5 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	16
2.6 การสูญเสียทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) การบ่งแสงจากขั้วไฟฟ้าบนผิวด้านรับแสง (ข) การสะท้อนแสงที่ผิวด้านรับแสงและ (ค) การสะท้อนกลับที่ผิวด้านหลัง	20
2.7 กลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะในแบบต่าง ๆ ของวัสดุสารกึ่งตัวนำ (ก) การรวมตัวใหม่แบบเปล่งแสง (ข) การรวมตัวใหม่ที่ตำแหน่งบกพร่องและ (ค) การรวมตัวใหม่แบบบอร์เจ.....	21
2.8 (ก) โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si ที่มีสนามไฟฟ้าด้านหลัง (ข) ความน่าจะเป็นในการรวบรวมพาหะ (Collection probability) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีและไม่มี BSF และ (ค) กลไกการเดินทางของอิเล็กตรอนในแถบพลังงานของรอยต่อ n/p/p ⁺ (Al-BSF).....	22

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.9 กระบวนการสร้างชั้น Ag - FSF	24
2.10 กระบวนการสร้างชั้น Al - BSF	25
2.11 Al-Si binary phase diagram	26
2.12 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Passivated emitter solar cell (PESC)	27
2.13 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Passivated emitter and rear cell (PERC)	27
2.14 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Passivated emitter and rear locally diffused cell (PERL)	28
2.15 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Passivated emitter and rear totally diffused cell (PERT)	29
2.16 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Passivated emitter and rear floating junction cell (PERF)	29
3.1 (ก) ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโบรอนและ (ข) ลักษณะของสารละลายโบรอน	31
3.2 พื้นผิวของ Flash foam (ก) ที่กำลังขยาย 300 เท่า (ข) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า	32
3.3 (ก) ลักษณะของลวดลายที่เกิดขึ้นบน Flash foam ภายหลังกการแฟลชแสง (ข) ลักษณะพื้นผิวของบริเวณช่องเปิดและบริเวณช่องปิดของ Flash foam ที่กำลังขยาย 10 เท่าและ (ค) ลักษณะพื้นผิวของบริเวณช่องเปิดและบริเวณช่องปิดของ Flash foam ที่กำลังขยาย 50 เท่า	32
3.4 เครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติ	33
3.5 เครื่อง Light microscope รุ่น Axioscope A1	34
3.6 ลวดลายฟิล์มสารเจือโบรอนขนาด 250 μm บนแผ่นฐานซิลิคอนจากการประทับลายโดยมีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (ก) 5% (ข) 10% (ค) 15% และ (ง) 20%	35
3.7 เครื่องมือวัดความต้านทานแบบสี่หัวเข็ม (4-point probes)	36
3.8 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นด้วย 4-point probes	37
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าแผ่นและอุณหภูมิการแพร่ต่าง ๆ ที่ปริมาณ โบรอนเท่ากับ 0.15 at% เป็นเวลา 60 นาที	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าแผ่นและเวลาการแพร่ต่าง ๆ เมื่อทำการแพร่สารละลายโบรอนปริมาณ 0.15 at% ที่อุณหภูมิ 1150°C.....	39
3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าแผ่นและเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอนในสารละลายโบรอน เมื่อทำการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ 1150°C เป็นเวลา 30 นาที	39
3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานจำเพาะและสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของบริเวณ p ⁺ -Si	41
3.13 (ก) ขั้นตอนการเตรียมสารละลายฟอสฟอรัสและ (ข) ลักษณะของสารละลายฟอสฟอรัส	42
3.14 เครื่อง Spin coater รุ่น WS-400B-8NPP/LITE	43
3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าแผ่นและเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัสในสารละลายฟอสฟอรัส เมื่อทำการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 60 นาที	44
3.16 เครื่องสเปกโตรริงระบบ AC ความถี่วิทยุ (RF magnetron sputtering).....	46
3.17 เครื่อง Ellipsometer รุ่น SE 400advanced.....	46
3.18 ชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริก (ก) ฟิล์ม PSG (ข) ฟิล์ม BSG (ค) ฟิล์ม SiO ₂ (ง) ฟิล์ม Si ₃ N ₄ sputtering และ (จ) ฟิล์ม Si ₃ N ₄ PECVD	47
3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและดัชนีหักเหแสงของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ	48
3.20 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer (UV-Vis) รุ่น Cary 300	48
3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกลับของแสงและความยาวคลื่นช่วง UV-Vis ของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ	49
3.22 เครื่อง Fourier Transform Infrared spectrometer (FT-IR) รุ่น Tensor 27.....	50
3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับเลขคลื่น (Wavenumber) ของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ	51
3.24 (ก) เตาเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วและ (ข) ภาพภายในของเตาเผา.....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.25 เครื่องวัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยระบบ จำลองแสงเทียม	54
3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) และ ประสิทธิภาพการ แปลงพลังงาน (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วใน เงื่อนไขต่าง ๆ	56
3.27 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลแฟคเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วในเงื่อนไขต่าง ๆ	56
3.28 บริเวณข้อผิดพลาดด้านหน้าหลังเซลล์แสงอาทิตย์หลังการเผาด้วยความร้อน สูงอย่างรวดเร็วในเงื่อนไขต่าง ๆ	57
4.1 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่ใช้ฟิล์ม BSG เป็นชั้น ไดอิเล็กทริกด้านหลัง	58
4.2 ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานเปรียบเทียบกับเซลล์ แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง	59
4.3 ลวดลายช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ขนาด 250 μm โดยมีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (ก) 5% (ข) 10% (ค) 15% (ง) 20% (จ) 25% และ (ฉ) 30%	60
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) และความหนาแน่นของ กระแสลัดวงจร (J_{sc}) ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิด ชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง ในกรณีที่ใช้ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 90 - 110 Ω/sheet	65
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลแฟคเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง ในกรณีที่ใช้ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 90 - 110 Ω/sheet	65
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) และความหนาแน่นของ กระแสลัดวงจร (J_{sc}) ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิด ชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง ในกรณีที่ใช้ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 110 - 130 Ω/sheet	66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลแฟคเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง ในกรณีที่ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 110 - 130 Ω/sheet.....	67
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) และความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (J_{sc}) ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง ในกรณีที่ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 130 - 150 Ω/sheet.....	68
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลแฟคเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง ในกรณีที่ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 130 - 150 Ω/sheet.....	69
4.10 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างที่มีบริเวณ p ⁺ -Si และพาสซีเวชันด้านหลัง	70
4.11 ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p ⁺ -Si และพาสซีเวชันด้านหลัง	71
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) และสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p ⁺ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ	74
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (J_{sc}) และสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p ⁺ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ	75
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลแฟคเตอร์ (FF) และสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p ⁺ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ	75

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) และสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มไดออกไซด์ทริกชนิดต่าง ๆ	76
4.16 เครื่อง Photoconductance lifetime tester รุ่น WCT-120	77
4.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM-6010LV	80
4.18 ภาพตัดขวางเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ด้านหลัง (ก) ที่กำลังขยาย 150 เท่า (ข) ที่กำลังขยาย 500 เท่า	80
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (V) และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (J) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลอง PC1D	84
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงควอนตัมที่ความยาวคลื่นช่วงต่าง ๆ ที่ได้จากแบบจำลอง PC1D	85
5.1 สัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของประเภทต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนในเชิงพาณิชย์	87
จ.1 แผ่น Flash foam ก่อนการแฟลชแสงสร้างลวดลาย	114
จ.2 หน้ากากทึบแสงป้องกันแสงแฟลชลวดลายช่องเปิดขนาด $250 \mu m$ โดยมีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (ก) 5% (ข) 10% (ค) 15% (ง) 20% (จ) 25% และ (ฉ) 30%	114
จ.3 เครื่อง Flash stamp รุ่น JL-V	115
จ.4 แผ่น Flash foam ภายหลังการแฟลชแสงลวดลายช่องเปิดขนาด $250 \mu m$ โดยมีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (ก) 5% (ข) 10% (ค) 15% (ง) 20% (จ) 25% และ (ฉ) 30%	115
ฉ.1 ผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน	117
ฉ.2 ผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ด้านหลังที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด 20%	118

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ฉ.4 ผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ด้านหลังที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด 10%	120
ช.1 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานด้วยโปรแกรม PC1D โดยใช้เงื่อนไขการกระตุ้นแบบ One-sun	122
ช.2 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานด้วยโปรแกรม PC1D โดยใช้เงื่อนไขการกระตุ้นแบบ Scan-QE	123
ช.3 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 ด้านหลังที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด 20% ด้วยโปรแกรม PC1D โดยใช้เงื่อนไขการกระตุ้นแบบ One-sun	124
ช.4 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 ด้านหลังที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด 20% ด้วยโปรแกรม PC1D โดยใช้เงื่อนไขการกระตุ้นแบบ Scan-QE.....	125
ช.5 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 ด้านหลังที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด 15% ด้วยโปรแกรม PC1D โดยใช้เงื่อนไขการกระตุ้นแบบ One-sun	126
ช.6 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 ด้านหลังที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด 15% ด้วยโปรแกรม PC1D โดยใช้เงื่อนไขการกระตุ้นแบบ Scan-QE.....	127
ช.7 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 ด้านหลังที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด 10% ด้วยโปรแกรม PC1D โดยใช้เงื่อนไขการกระตุ้นแบบ One-sun	128
ช.8 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 ด้านหลังที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด 10% ด้วยโปรแกรม PC1D โดยใช้เงื่อนไขการกระตุ้นแบบ Scan-QE.....	129

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่หน้าตัด
c	=	ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s
D	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ที่อุณหภูมิการแพร่จำเพาะ
D_c	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน
D_h	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล
D_0	=	ค่าคงที่ของการแพร่
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)
$\operatorname{erfc} \cdot z$	=	Complementary error function ของ z
eV	=	หน่วยอิเล็กตรอน โวลต์
FF	=	ฟิลแฟคเตอร์ (Fill factor)
G	=	อัตราการสร้างคู่อิเล็กตรอนและโฮล
h	=	ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} Js
I	=	กระแสไฟฟ้ารวม (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)
J_{sc}	=	ความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (Short-circuit current density)
J_{0e}	=	Emitter saturation current density

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

k	=	ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} J/K
L	=	ความยาวรวมของชิ้นงาน
L_e	=	ระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอน
L_h	=	ระยะทางการแพร่ของโฮล
L_{p-Si}, L_{p^+-Si}	=	ความยาวรวมของบริเวณ p-Si และบริเวณ p ⁺ -Si
N_A	=	ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้รับ (Acceptor)
N_D	=	ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้ (Donor)
$N_{(x,t)}$	=	ความหนาแน่นของสารเจือที่ตำแหน่ง x ใด ๆ และเวลา t ใด ๆ
N_0	=	ความหนาแน่นของสารเจือที่ผิว
n	=	ดัชนีหักเหแสง
n_i	=	ความหนาแน่นของพาหะ
nm	=	นาโนเมตร
P_{in}	=	กำลังไฟฟ้าอินพุต 1000 W/m^2 ที่แสงมาตรฐาน AM1.5
q	=	ค่าคงที่ของประจุไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} 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	=	หน่วย standard cubic centimeter per minute
S_{eff}	=	ความเร็วในการรวมตัวใหม่ที่พื้นผิว (Effective surface recombination velocity)
t	=	เวลาที่ใช้ในการแพร่
T	=	อุณหภูมิ
V	=	แรงดันไฟฟ้า (Voltage)
V_{mp}	=	แรงดันไฟฟ้าที่ กำลังไฟฟ้าสูงสุด
V_{oc}	=	แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open-circuit voltage)
W	=	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (Depletion region)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

x	=	ระยะทางความลึกของการแพร่สารเจือ
Ω	=	โอห์ม (Ohm)
η	=	ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Efficiency)
λ	=	ความยาวคลื่น
μm	=	ไมโครเมตร
ρ	=	สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity)
ρ_{eff}	=	ความต้านทานจำเพาะ (Effective resistivity)
$\rho_{\text{p-Si}}, \rho_{\text{p}^+\text{-Si}}$	=	ความต้านทานจำเพาะบริเวณ p-Si และบริเวณ p ⁺ -Si
τ_{Auger}	=	ช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยที่ก่อนเกิด Auger recombination
τ_{Bulk}	=	ช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยที่เนื้อวัสดุ
τ_{eff}	=	ช่วงชีวิตของพาหะ (Effective lifetime)
$\tau_{\text{Radiative}}$	=	ช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยที่ก่อนเกิด Radiative recombination
τ_{SHR}	=	ช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยที่ก่อนเกิด Recombination through traps
τ_{Surface}	=	ช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยที่พื้นผิว
Ag	=	โลหะเงิน (Silver)
Ag paste	=	กาวเงิน
Al	=	โลหะอะลูมิเนียม (Aluminium)
Al paste	=	กาวอะลูมิเนียม
ALD	=	Atomic layer deposition
ALILE	=	Aluminium Induced Layer Exchange
AlO_x	=	อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide)
Ar	=	ก๊าซอาร์กอน (Argon gas)
ARC	=	ชั้นป้องกันการสะท้อนแสง (Anti-reflection coating)
B	=	โบรอน (Boron)
B-LD	=	การเจือโบรอนด้วยเลเซอร์ (Boron laser doping)
B_2O_3	=	Anhydrous boric oxide
BSF	=	Back surface field
BSG	=	Borosilicate glass

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

CTAB	=	Cetyltrimethyl ammonium bromide (C ₁₉ H ₄₂ BrN)
Cz	=	Czochralski
EtOH	=	Ethanol (C ₂ H ₅ OH)
EUR	=	หน่วยเงินยูโร (Euro)
FT-IR	=	Fourier Transform Infrared Spectrometer
Ga	=	แกเลียม (Gallium)
GaAs	=	แกเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium arsenide)
HBO ₂	=	Metaboric acid
HCl	=	กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)
HF	=	กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid)
HNO ₃	=	กรดไนตริก (Nitric acid)
H ₂ O	=	น้ำที่ผ่านการกำจัดไอออนต่าง ๆ (Deionized water)
H ₂ O ₂	=	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)
H ₃ BO ₃	=	กรดบอริก (Boric acid)
H ₃ PO ₄	=	กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid)
IPA	=	ไอโซโพรพานอล (Isopropanol)
IR lamp	=	หลอดอินฟราเรด
KOH	=	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide)
LBSF	=	Local back surface field
LID	=	การเสื่อมสภาพที่เกิดจากแสง (Light-induced degradation)
LIP	=	วิธีการชุบแบบ Light-induced plating
mc-Si	=	ซิลิคอนหลายผลึก (Multi-crystalline silicon)
MIS	=	โลหะ - ฉนวน - สารกึ่งตัวนำ (Metal-Insulation-Semiconductor)
NECTEC	=	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
N ₂	=	ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas)
NH ₃	=	ก๊าซแอมโมเนีย (Ammonia gas)
NH ₄ OH	=	แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide)
n-Si	=	ซิลิคอนชนิดเอ็น

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

n^- -Si	=	ซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีปริมาณสารเจือต่ำ (Lightly doped)
n^+ -Si	=	ซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีปริมาณสารเจือสูง (Heavily doped)
O_2	=	ก๊าซออกซิเจน (Oxygen gas)
PECVD	=	กระบวนการเคลือบไอเคมีโดยอาศัยพลาสมา (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)
PESC	=	Passivated emitter solar cell
PERC	=	Passivated emitter and rear cell
PERL	=	Passivated emitter and rear locally diffused cell
PERT	=	Passivated emitter and rear totally diffused cell
PERF	=	Passivated emitter and rear floating junction cell
$POCl_3$	=	Phosphorus oxychloride
PSG	=	Phosphosilicate glass
P_2O_5	=	Phosphorus pentoxide
pn-Si	=	รอยต่อพีเอ็นของซิลิคอน
p-Si	=	ซิลิคอนชนิดพี
p^+ -Si	=	ซิลิคอนชนิดพีที่มีปริมาณสารเจือสูง (Heavily doped)
QE	=	ประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum efficiency)
QSSPC	=	Quasi-steady-state photoconductance
RCA	=	Radio corporation of America
RTP	=	กระบวนการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว (Rapid thermal process)
SE	=	ชั้นรับแสงบางบริเวณ (Selective emitter)
SEM	=	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)
Si	=	ซิลิคอน (Silicon)
SiH_4	=	ก๊าซไฮเลน (Silane gas)
Si_3N_4, SiN_x	=	ซิลิคอนไนไตรด์ (Silicon nitride)
SiO_2	=	ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide)
SiO_xN_y	=	ซิลิคอนออกซิไนไตรด์ (Silicon oxynitride)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

TEOS	=	Tetraethyl orthosilicate ($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$)
UNSW	=	University of New South Wales
UV-Vis	=	UV-Visible spectrophotometer



บทที่ 1

บทนำ

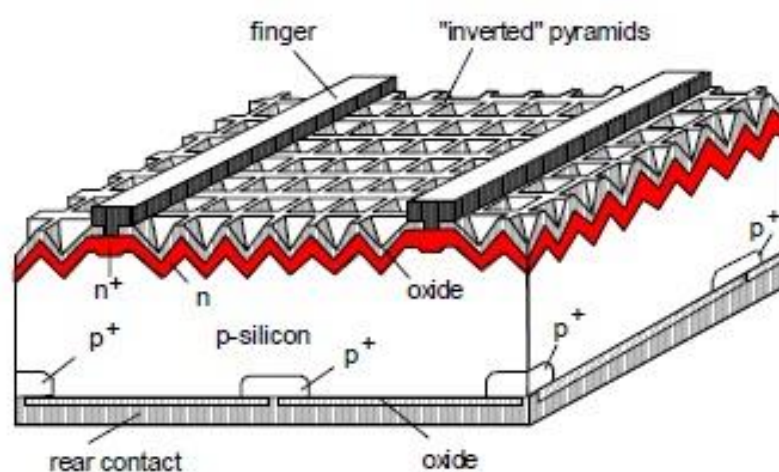
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

ปัจจุบันได้มีการนำพลังงานทดแทนมาใช้ประโยชน์เพิ่มมากขึ้น จากพลังงานลม พลังงานน้ำ รวมทั้งพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดปราศจากมลพิษและมีอยู่อย่างไม่จำกัด มาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อทดแทนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน น้ำมันและก๊าซธรรมชาติ ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงไปได้ ดังนั้นจึงมีการศึกษาและวิจัยกันอย่างต่อเนื่องเกี่ยวกับพลังงานทดแทน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถนำมาผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยตรงโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) ที่สร้างจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ

วัสดุสารกึ่งตัวนำหลายชนิดที่นิยมใช้สำหรับผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide: GaAs) แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulphide: CdS) คอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ (Copper Indium Diselenide: CuInSe₂) เป็นต้น แต่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้บนโลกนิยมใช้ซิลิคอน (Si) เนื่องจากเป็นธาตุที่มีปริมาณมากที่สุดในเปลือกโลก ไม่เป็นพิษ สามารถสกัดได้จากแร่ควอตซ์หรือทรายที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ มีโครงสร้างทั้งในรูปของผลึกและฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) ในกรณีของผลึกซิลิคอนจะใช้เทคนิคการแพร่สารเจือเพื่อสร้างรอยต่อ p/n-Si และสร้างขั้วไฟฟ้าด้านหน้าและด้านหลัง

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างต่าง ๆ ให้มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงมากขึ้น โดยเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Local back passivation หรือ Local back surface field (LBSF) แสดงดังรูปที่ 1.1 จะเป็นกลุ่มที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด คือ 24.7% ซึ่งมีส่วนประกอบในโครงสร้างที่เพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน ได้แก่ บริเวณผิวด้านหน้ารับแสง โครงสร้างเรขาคณิตทรงพีระมิดแบบกลับหัว (Inverted pyramids) ขนาดเล็ก เพื่อลดแสงสะท้อนกลับที่ผิว ซึ่งทำให้มีกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่รับแสงที่มากขึ้นและเกิดการดักแสงมากขึ้น และบริเวณด้านหน้ารับแสง โครงสร้าง Selective emitter (SE) ที่ประกอบด้วย ชั้น n-Si ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่างกันสองบริเวณ ประกอบด้วยบริเวณ n⁻-Si (Lightly doping region) เป็นบริเวณที่รับแสงจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นสูงจากปริมาณสารเจือต่ำ เพื่อให้ประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงสีน้ำเงินมากขึ้น และลดผลการรวมตัวใหม่ของพาหะให้มีค่าเหมาะสม เพื่อลดผล Dead layer ที่ผิว ทำให้กระแสลัดวงจรสูงขึ้น และบริเวณ n⁺-Si (Heavily doping region) เป็นบริเวณใต้ขั้ว

ไฟฟ้าจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นต่ำจากปริมาณสารเจือสูง เพื่อช่วยลดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่รอยสัมผัส (R_c) และให้รอยสัมผัสแบบโอห์มมิกที่ดี อีกทั้งด้านหลังเป็นโครงสร้างแบบ LBSF โดยมีการการสร้างชั้นฉนวนบาง ๆ ขึ้นที่ผิวสัมผัส เพื่อลดจุดบกพร่องที่ผิว ทำให้สามารถช่วยลดผลของการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิว บริเวณเปิดช่องชั้นฉนวนจะมีส่วนของสารเจือปริมาณสูง (Heavily doping region, p^+ -Si) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสระหว่างบริเวณ p^+ -Si และแผ่นฐานซิลิคอน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการรวบรวมกระแสพาหะที่ขั้วโลหะด้านหลังเพิ่มขึ้น ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีปริมาณกระแสและแรงดันที่สูงขึ้น

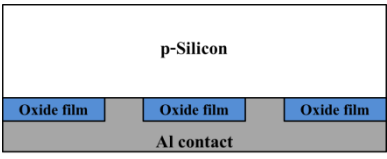
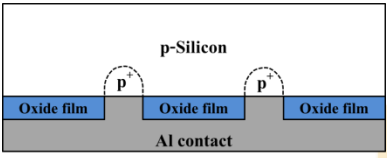
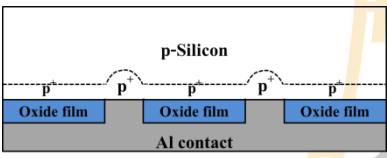
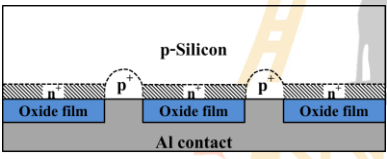


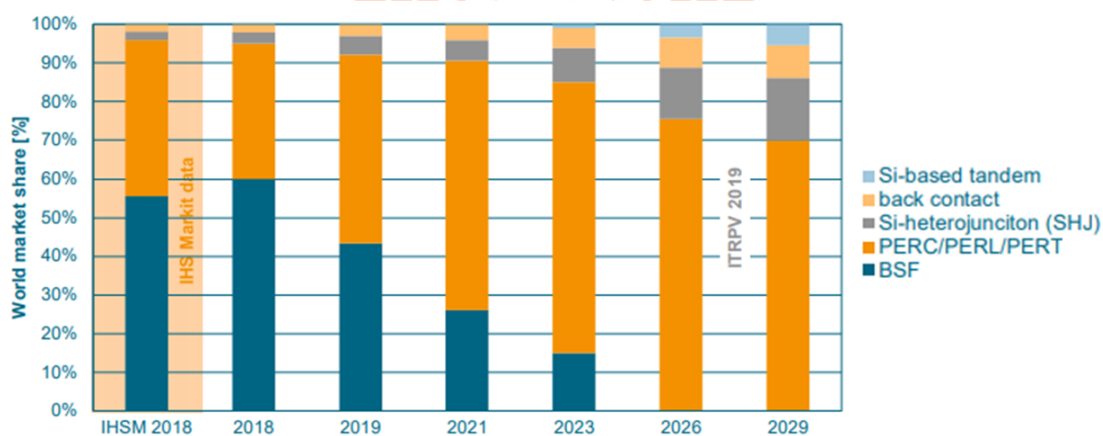
รูปที่ 1.1 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Local back passivation หรือเรียกว่า Local back surface field (LBSF) (Green, 2015)

เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF สามารถแบ่งเป็นโครงสร้างย่อยได้ 4 แบบ คือ โครงสร้าง Passivated emitter and rear cell (PERC), โครงสร้าง Passivated emitter and rear locally diffused cell (PERL), โครงสร้าง Passivated emitter and rear totally diffused cell (PERT) และโครงสร้าง Passivated emitter and rear floating junction cell (PERF) แสดงดังตารางที่ 1.1

โดยค่าทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}), ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}), ฟิลแฟกเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้าง LBSF ในแบบต่าง ๆ ที่พิจารณาเฉพาะบริเวณด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งไม่พิจารณาโครงสร้างด้านหน้ารับแสง พบว่าเมื่อเพิ่มบริเวณ p^+ -Si จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงขึ้น จากการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

ตารางที่ 1.1 แผนภาพเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF แบบต่าง ๆ (Green, 2015)

โครงสร้าง	แผนภาพการออกแบบ พื้นผิวด้านหลัง	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)
PERC		696	40.3	81.4	22.8
PERL		706	42.2	82.8	24.7
PERT		706	41.2	81.4	23.6
PERF		714	33.8	82.4	19.2



รูปที่ 1.2 แนวโน้มเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างต่าง ๆ จากปัจจุบันจนถึงอนาคต (ITRPV, 2018)

จากกราฟแสดงแนวโน้มเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างต่าง ๆ จากปัจจุบันจนถึงอนาคต ดังรูปที่ 1.2 พบว่าในอีก 10 ปีข้างหน้า (ค.ศ. 2029) อุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จะเปลี่ยนเทคโนโลยีการผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน (Back surface field, BSF) มาเป็นโครงสร้าง LBSF ซึ่งให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงกว่าในปัจจุบัน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF เพื่อตอบโจทย์การผลิตในอนาคต

ปัจจุบันได้มีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ในเชิงอุตสาหกรรม โดยส่วนใหญ่จะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERC ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานประมาณ 21 - 23% ซึ่งเมื่อนำมาประกอบเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่ามีกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานที่มีจำนวนเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากัน คือ 60 เซลล์ ราคาแผงเซลล์แสงอาทิตย์จากแหล่งผลิตต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 1.2 ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERC จากบริษัทต่าง ๆ มีราคาประมาณ 6.39 - 9.13 บาท/วัตต์

ตารางที่ 1.2 ราคาแผงเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานเปรียบเทียบกับโครงสร้าง PERC ของบริษัทต่าง ๆ (<https://www.enfsolar.com/pv/panel>)

บริษัท	เทคโนโลยี	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	ราคา (บาท/วัตต์)
TPL Solar (China)	Mono - Standard	270 - 290	6.39
	Poly - Standard	255 - 280	6.08
	Mono - PERC	300 - 320	6.39
	Poly - PERC	265 - 290	7.32
Sunpro Power (China)	Mono - Standard	250 - 290	7.32
	Poly - Standard	250 - 280	7.02
	Mono - PERC	290 - 310	8.22
	Poly - PERC	270 - 290	7.32
Exiom Solution (Spain)	Mono - Standard	295 - 315	9.13
	Poly - Standard	270 - 285	9.13
	Mono - PERC	280 - 300	9.13
	Poly - PERC	265 - 285	9.13

ตารางที่ 1.2 ราคาแผงเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานเปรียบเทียบกับ โครงสร้าง PERC ของ บริษัทต่าง ๆ (<https://www.enfsolar.com/pv/panel>) (ต่อ)

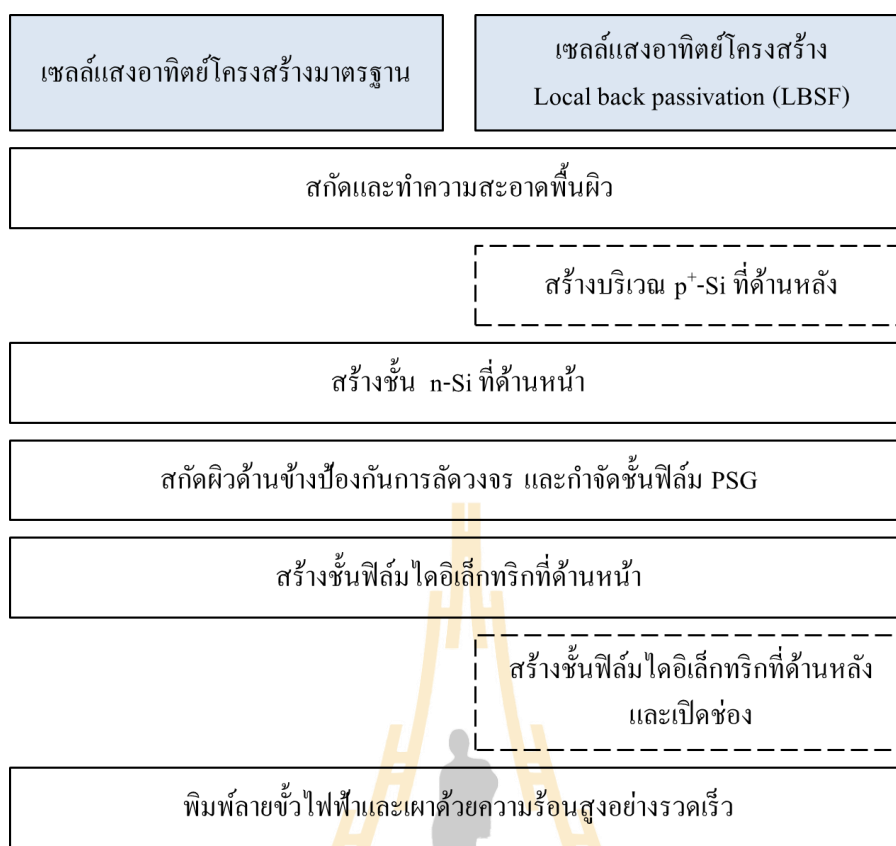
บริษัท	เทคโนโลยี	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	ราคา (บาท/วัตต์)
Luxen Solar Energy (China)	Poly - Standard	265 - 285	6.79
	Poly - PERC	305 - 325	7.35
Mysolar USA (United States)	Poly - Standard	270 - 290	7.02
	Poly - PERC	305 - 325	8.36

*หมายเหตุ ใช้อัตราแลกเปลี่ยน 1 EUR = 33 บาท (7 ตุลาคม 2562)

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERC ได้มีการสร้างลวดลายของชั้นพาสซีเวชันได้หลายวิธี เช่น กระบวนการถ่ายทอดลวดลายด้วยแสง (Photolithography), การใช้เลเซอร์ในการช่วยแพร่สารเจือ (Laser doping), การแพร่สารเจือที่เป็นก๊าซในสุญญากาศ และการฝังอะตอมสารเจือ (Ion implantation) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูงและมีขั้นตอนที่ซับซ้อน ทำให้ราคาค่าต้นทุนสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานประมาณ 5 - 20% ดังตารางที่ 1.2 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดใหม่ เพื่อหาเทคนิคการสร้างลวดลายของชั้นพาสซีเวชันที่มีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนและสามารถผลิตได้ปริมาณมาก โดยใช้วิธีการประทับลายด้วย Flash foam

ในส่วนของการแพร่สารเจือปริมาณสูงบางบริเวณที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำกับขั้วไฟฟ้า นิยมใช้อัลลอยของอะลูมิเนียมหรือสารเจือโบรอน ซึ่งทำให้เกิดบริเวณ p^+ -Si ในพื้นที่ระหว่างช่องเปิดด้านหลัง ในปี ค.ศ. 2013 Rauer, M. และคณะ ได้ทำการศึกษาความหนาแน่นสูงสุดของสารเจือที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ (Solid solubility) พบว่า โบรอนมีค่าความสามารถในการละลายในซิลิคอนที่มากกว่าอะลูมิเนียม จึงทำให้ความเข้มข้นของสารเจือที่ผิวมากกว่า เกิดเป็นสนามไฟฟ้าที่ดีส่งผลให้สามารถลดการรวมตัวใหม่ได้มากกว่า

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF อ้างอิงจากโครงสร้าง PERL โดยการสังเคราะห์สารเจือโบรอนขึ้นเองในรูปของสารละลายโบรอนในห้องปฏิบัติการ และทำการแพร่สารเจือความเข้มข้นสูงบางบริเวณ เพื่อให้เกิดบริเวณ p^+ -Si อีกทั้งยังทำการศึกษาหาแนวทางการสร้างลวดลายชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริก (Dielectric) ที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้วิธีการประทับลายด้วยสารละลาย Hydrofluoric acid (HF) ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อเป็นเทคนิคทางเลือกแทนกระบวนการถ่ายทอดลวดลายด้วยแสง และมีแนวโน้มที่จะสามารถนำไปผลิตในเชิงอุตสาหกรรมได้ โดยมีขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF เปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF เทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 สามารถสังเคราะห์สารละลายโบรอนที่มีความเข้มข้นของสารเจือในระดับที่เหมาะสม โดยมีความต้านทานไฟฟ้าแผ่นต่ำกว่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของแผ่นฐานซิลิคอน เพื่อเป็นแหล่งสารเจือสำหรับบริเวณ p^+ -Si
- 1.2.2 สามารถสังเคราะห์ชั้นพาสซีเวชันด้วยฟิล์มไดอิเล็กทริก (Dielectric) ได้ในห้องปฏิบัติการ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF
- 1.2.3 สามารถสร้างลวดลายการเปิดช่องชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกได้ด้วยวิธีการประทับลายหรือวิธีที่สอดคล้องกับการผลิตในปริมาณมาก
- 1.2.4 สามารถสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบโครงสร้าง LBSF ด้วยเทคนิคการประทับลายในเงื่อนไขที่เหมาะสม และวัดวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 สังเคราะห์สารละลายโบรอนที่มีเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอนระหว่าง 0.10 - 0.30% ภายใต้อุณหภูมิการแพร่ระหว่าง 1000 - 1150°C เป็นเวลา 15 - 60 นาที เพื่อเป็นแหล่งสารเจือสำหรับบริเวณ p⁺-Si
- 1.3.2 สร้างชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริก (Dielectric) ได้แก่ ฟิล์ม PSG (Phosphosilicate glass) ฟิล์ม BSG (Borosilicate glass) ฟิล์ม SiO₂ (Silicon dioxide) และฟิล์ม Si₃N₄ (Silicon nitride) และศึกษาสมบัติทางแสง
- 1.3.3 สร้างลดการเปิดช่องชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริก (Dielectric) ได้ด้วยวิธีการประทับลาย โดยมีสัดส่วนของพื้นที่ช่องเปิดระหว่าง 5 - 30%
- 1.3.4 ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบโครงสร้าง LBSF ขนาดไม่ต่ำกว่า 9 ตารางเซนติเมตรด้วยเทคนิคการประทับลาย โดยมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 สามารถนำองค์ความรู้การสังเคราะห์สารละลายมาต่อยอดเพื่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ด้วยเทคนิคการประทับลายซึ่งมีต้นทุนที่ต่ำ
- 1.4.2 สามารถพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้เองโดยองค์ความรู้และเทคโนโลยีต้นแบบของนักวิจัยในประเทศ ซึ่งได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง
- 1.4.3 ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์มากขึ้น เกิดความมั่นคงทางด้านพลังงานหมุนเวียนมากขึ้น
- 1.4.4 สนับสนุนแผน AEDP2015 ด้านการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ให้ได้ตามเป้าหมายอย่างคุ้มค่าต่อประเทศ
- 1.4.5 ส่งเสริมความเข้มแข็งด้านเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในประเทศ เพื่อสามารถแข่งขันได้ในต่างประเทศ

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปริทัศน์วรรณกรรม

Zhao, J. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 1996) ได้ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอน โครงสร้าง Passivated Emitter and Rear Locally diffused (PERL) ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 24% ซึ่งประกอบด้วย รอยต่อ p/n-Si ที่มีพื้นผิวด้านหน้าเป็นพีระมิดหัวกลับ ชั้นรับแสง n-Si ด้านหน้าที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นต่างกัน 2 บริเวณ และชั้น p⁺-Si ที่ด้านหลังมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นต่ำในบางบริเวณ เพื่อลดความต้านทานไฟฟ้าระหว่างผิวสัมผัสของขั้วโลหะและวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ด้านหลัง อีกทั้งชั้นไดอิเล็กทริกบาง ๆ ด้านหลังช่วยลดการรวมตัวใหม่ของพาหะ ส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง

Lee, J.Y. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2004) ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Back surface field (BSF) โดยการใช้การแพร่สารเจือโบรอนด้วยเทคนิค Rapid Thermal Process (RTP) พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นลดลงมีค่าประมาณ 40 Ω/sheet สำหรับการแพร่ที่ 1050°C เป็นเวลา 60 วินาที และค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นลดลงมีค่าประมาณ 20 Ω/sheet สำหรับการแพร่ที่ 1100°C เป็นเวลา 120 วินาที ซึ่งได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 14.6%

Kranzl, A. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2006) ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Bifacial ที่มีการใช้โบรอนแทนอะลูมิเนียมเพื่อสร้างชั้น Back surface field (BSF) ซึ่งช่วยในเรื่องของการรวบรวมการสะท้อนแสงกลับที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ ลดความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะและลดปัญหาการโค้งงอของเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง 16.1%

Kim, D.S. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2007) ศึกษากระบวนการแพร่โบรอนโดยใช้กรดบอริก เป็นแหล่งสารเจือในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Back surface field (BSF) ซึ่งได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นประมาณ 100 Ω/sheet สำหรับการแพร่ที่อุณหภูมิ 925°C เป็นเวลา 60 นาที โดยประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้เป็น 19.2%

Das, A. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2010) ศึกษาการแพร่สารเจือโบรอนโดยใช้สารละลายของกรดบอริกที่มีราคาถูกลงและไม่เป็นพิษ พบว่ามีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นอยู่ในช่วง 20 - 200 Ω/sheet สำหรับการแพร่ที่อุณหภูมิ 925 - 1000°C สามารถนำมาใช้สำหรับสร้างชั้น Emitter ที่

ด้านหน้าและชั้น Back surface field (BSF) ที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงถึง 19.7%

Wang, Z. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2012) ศึกษาการออกแบบพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการปรับปรุงพื้นผิวด้านหลัง เพื่อลดพื้นที่รอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าและแผ่นฐานซิลิคอน ด้วยการเปิดช่องชั้นไดโอดีเล็กทริกและทำการแพร่โบรอนที่มีความเข้มข้นสูงในช่องเปิด ซึ่งพบว่ามี的增加ขึ้นของกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) และแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) เนื่องจากเซลล์สามารถดูดกลืนแสงความยาวคลื่นที่ยาวได้มากขึ้น ชั้นไดโอดีเล็กทริกช่วยลดความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่พื้นผิวด้านหลัง อีกทั้งฟิล์มแพกเตอร์ (FF) ยังเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแพร่โบรอนความเข้มข้นสูงจะช่วยลดความต้านทานรอยต่อระหว่างขั้วโลหะ ทำให้มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงถึง 20.3%

Amonsurintawong, K. (ปี ค.ศ. 2012) ได้ศึกษาโครงสร้างของชั้นพาสซีเวชันกับช่องเปิดรอยสัมผัสแบบ MIS (Metal Insulator Semiconductor) เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าด้านหลังที่ผิวเฉพาะพื้นที่เปิดช่องเล็ก ๆ (Back surface field, BSF) ส่งผลให้ค่าความเร็วในการรวมตัวที่ผิวด้านหลัง (S_{eff}) ลดลง โดยการสร้างชั้นพาสซีเวชันด้านหลังด้วยการเปิดช่องสัมผัสทะลุชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) จากเทคนิคการเปิดช่องอย่างง่ายด้วยวิธี Al pining (Al spiking) ภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า $520^{\circ}C$ บริเวณอะลูมิเนียม (Al) เล็ก ๆ ทะลุเป็นช่องเล็ก ๆ ลงชั้น SiO_2 กว้างประมาณ 100 nm ถึง $1 \mu m$ และได้สร้างชั้น a-Si ลงบนชั้น Al และผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนเฟสของ Al และ a-Si หรือเรียกว่า กระบวนการ ALILE (Aluminum Induced Layer Exchange) ที่อุณหภูมิค่าประมาณ $520^{\circ}C$ ชั้น a-Si และ Al เกิดการแลกเปลี่ยนเฟสซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดการก่อตัวของ Epitaxial p^+-Si พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำชั้นพาสซีเวชันด้วยเทคนิค ALILE ให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง (13.97%) ซึ่งสูงกว่าเซลล์ที่ไม่มีโครงสร้างชั้นพาสซีเวชันถึง 1.13%

Phiwpha, N. (ปี ค.ศ. 2013) ได้ศึกษาการฉีดกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เพื่อสร้างลวดลายโครงสร้างแบบ Local back surface field (LBSF) บน SiO_2 ลงบนแผ่นฐานซิลิคอน เพื่อเป็นชั้นพาสซีเวชันที่ด้านหลัง และทำการแพร่ซีมอะลูมิเนียมผ่านบริเวณช่องของ SiO_2 ที่ถูกเปิด เกิดเป็น p^+-Si ซึ่งเป็นสนามไฟฟ้าที่ผิวรอยต่อขึ้น โดยให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 14.64% ซึ่งสูงกว่าเซลล์โครงสร้างมาตรฐานถึง 1.66%

Cacciato, A. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2013) ได้ทำการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERL ในเชิงอุตสาหกรรม โดยการใช้เทคนิค Extended laser ablation เปิดช่องสร้างลวดลายบนชั้นไดโอดีเล็กทริก (AlO_x/SiN_x) ที่ด้านหลัง สำหรับการสร้างโครงสร้างแบบ Local back surface field (LBSF) ซึ่งได้เซลล์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 19.5% ซึ่งสูงกว่าเซลล์ที่เป็น Al-BSF ประมาณ 1%

Gao, Y. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2013) ได้พัฒนาทากซิลิคอน (Silicon paste) โดยใช้อนุภาคซิลิคอนขนาดนาโนเมตรที่มีสารเจือโบรอนผสมกับตัวทำละลาย เมื่อนำมาพิมพ์ลายลงบนแผ่นฐานซิลิคอนและนำไปผ่านการแพร่ที่อุณหภูมิสูง อะตอมของโบรอนจะแพร่เข้าสู่ซิลิคอนและสามารถสร้างเป็นโครงสร้าง Back surface field (BSF) ที่ปรับเปลี่ยนความต้านทานไฟฟ้าแผ่นได้ตามความเข้มข้นของโบรอนในอนุภาคซิลิคอนขนาดนาโนเมตร ซึ่งเมื่อความเข้มข้นของโบรอนเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นลดลง

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) และแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ 850 - 1000°C โดยพบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นอยู่ระหว่าง 8 - 200 Ω /sheet ซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งสารเจือสำหรับโครงสร้าง n^+/p และ $n^+/p/p^+$ ได้

Singh, G. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2014) ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Back surface field (BSF) โดยใช้กรดบอริกเป็นแหล่งสารเจือด้วยเทคนิคการหมุนเหวี่ยง (Spin on dopant) พบว่า BSF ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อความยาวคลื่นยาวและช่วยลดการรวมตัวของพาหะที่ผิวด้านหลัง ทำให้มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 12.9% ซึ่งมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Aluminum BSF และยังสามารเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานได้อีกจากการเพิ่มขึ้นป้องกันการสะท้อนแสงหรือชั้นพาสซีเวชันที่ด้านหน้าและด้านหลัง

Kim, T. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2014) ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERL ที่ประกอบด้วยแผ่นฐานซิลิคอนผลึกเดี่ยวชนิด p-Si ขนาด 156 mm x 156 mm ผ่านการสกัดพื้นผิว การสร้างชั้น n-Si การเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนแสง SiN_x/SiO_x และการสร้างขั้วโลหะ Ni-Cu-Ag ด้วยวิธีการชุบแบบ Light-induced plating (LIP) ที่ด้านหน้าของเซลล์ ส่วนด้านหลังเซลล์มีชั้นไดอิเล็กทริก Al_2O_3/SiO_xN_y เป็นชั้นพาสซีเวชัน และขั้วโลหะอะลูมิเนียมที่เกิดผ่านบริเวณช่องเปิดเลเซอร์ พบว่าเซลล์ที่ได้มีค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรเฉลี่ย 669 mV ความหนาแน่นกระแสลัดวงจรเป็น 40 mA/cm² ฟิลแฟคเตอร์เป็น 77.3% และมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเป็น 21%

Yoshinori, I. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2016) ศึกษาการสร้าง Local back surface field (LBSF) โดยใช้ Boron-doped silicon paste เป็นแหล่งสารเจือโบรอนด้วยเทคนิค Laser doping ที่ด้านหลังของแผ่นเซลล์และทำการพิมพ์ลายอะลูมิเนียมเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งโบรอนจะช่วยลดการเกิด Kirkendall void และลดการรวมตัวใหม่ที่พื้นผิว ทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง 19.2%

Park, S. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2016) ศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยค่าความต้านทานของแผ่นฐานผ่านการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าด้านหลังเซลล์ โดยได้ทำการปรับปรุงคุณภาพของ Czochralski (Cz)-Si ingot ด้วยการเติมแกเลียม (Ga) เพื่อกำจัดการเสื่อมสภาพที่เกิดจากแสง Light-induced degradation (LID) ซึ่งทำให้เกิดความแปรปรวนของสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฐาน โดยจากการจำลอง PC1D แสดงให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรเพิ่มขึ้นเมื่อสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฐานเพิ่มขึ้น เนื่องจากช่วงชีวิตของพาหะที่เพิ่มขึ้น และจากการทดลองพบว่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรบ่งชี้ถึงสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฐาน ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดย BSF ที่มีคุณภาพสูง จะมีแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและประสิทธิภาพที่สูงกว่า BSF ที่มีคุณภาพต่ำ

Norouzi, M.H. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2017) ศึกษาชั้นพลาสมาบริเวณที่เรียกว่า pPassDop ประกอบด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์ (AlO_x) จากเทคนิค Atomic layer deposition (ALD) และซิลิคอนไนไตรด์เจือโบรอน ($\text{SiN}_x:\text{B}$) จากเทคนิค Plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) สำหรับเป็นชั้นด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Bifacial โดยชั้น $\text{AlO}_x/\text{SiN}_x:\text{B}$ จะมีความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่พื้นผิวที่ต่ำประมาณ 4 cm/s หลังจากการเผาด้วยความร้อนอย่างรวดเร็วและการเปิดช่องชั้น $\text{AlO}_x/\text{SiN}_x:\text{B}$ ด้วยกระบวนการเลเซอร์ จะเกิดบริเวณสารเจือความเข้มข้นสูงที่มีความต้านทานไฟฟ้าแผ่นต่ำกว่า 20 Ω/sheet

Yuka, T. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2017) ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Passivated emitter and rear cell (PERC) ที่สร้างบริเวณ Local back surface field (LBSF) ผ่านการเจือโบรอนด้วยเลเซอร์ (Boron laser doping, B-LD) โดยใช้ B-doped Si nano-particle paste และกาวอะลูมิเนียม (Al paste) พบว่าเซลล์ PERC ที่ใช้ B-LD มีความหนาของชั้น BSF มากกว่าเซลล์ PERC โครงสร้างทั่วไป ช่วยลดการรวมตัวใหม่ของพาหะที่พื้นผิวด้านหลัง นอกจากนี้จำนวนช่องว่างของ Kirkendall ยังลดลงและสามารถควบคุมได้น้อยกว่า 10% ซึ่งช่วยลดความต้านทานไฟฟ้าที่รอยสัมผัส ทำให้แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ฟิลแฟกเตอร์และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงขึ้น

Zhuang, Y.F. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2019) ศึกษาการสร้างชั้นฟิล์ม $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x:\text{H}$ stacks สำหรับเป็นชั้นพลาสมาบริเวณด้านหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERC พบว่าช่วยลด Emitter saturation current density (J_0) ส่งผลให้ลดการสูญเสียแสงสีน้ำเงิน 10% และเมื่อนำชั้นฟิล์ม $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x:\text{H}$ stacks มาเพิ่มที่ผิวด้านหลังเซลล์ พบว่าช่วยเพิ่มการสะท้อนแสงกลับเข้าไปภายในเซลล์ของแสงความยาวคลื่นยาวได้ และช่วยลดความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่พื้นผิวด้านหลัง จะได้เซลล์ที่มีแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรเฉลี่ย 657 mV กระแสลัดวงจรเป็น 9.86 A และมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเป็น 21.3% ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Al-BSF ประมาณ 1.3%

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้กันในปัจจุบันสามารถแบ่งตามโครงสร้างของวัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอนได้เป็น 3 ชนิด คือ ชนิดผลึกเดี่ยว (Mono-crystalline silicon cell) ชนิดหลายผลึก (Poly-crystalline silicon cell) และชนิดอสัณฐานหรืออะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous silicon cell) โดยงานวิจัยนี้ได้เน้นการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหลายผลึก (Poly-crystalline silicon cell) เนื่องจากมีราคาที่ถูกกว่าชนิดผลึกเดี่ยวและใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ซึ่งรูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้ประสิทธิภาพสูง โดยทั่วไปมีส่วนประกอบที่สำคัญต่อไปนี้

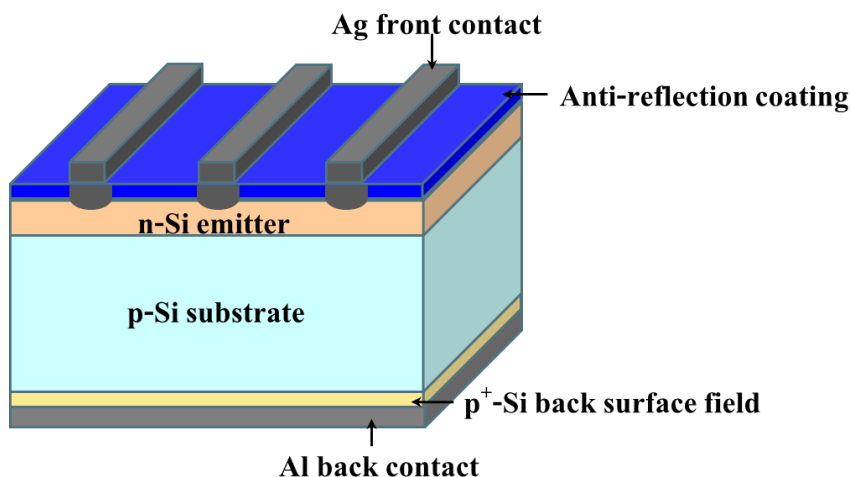
ชั้นป้องกันการสะท้อนแสง เป็นชั้นฟิล์มบางที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการสะท้อนแสงกลับที่ผิวน้อยที่สุด โดยวัสดุที่นิยมนำมาใช้งาน ได้แก่ ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซิลิคอนไนไตรด์ (SiN_x) หรือซิลิคอนออกซิไนไตรด์ (SiO_xN_y) โดยอาจทำการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนแสงจากวัสดุต่างชนิดกันซ้อนทับกันหลาย ๆ ชั้น (Multilayer) เพื่อให้ได้ค่าดัชนีหักเหแสงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นลำดับ เรียกว่า Gradient-index ซึ่งจะช่วยลดการสะท้อนแสงกลับได้ดีในช่วงสเปกตรัมแสงที่กว้างกว่าการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนแสงเพียงชั้นเดียว

ชั้นรอยต่อ p/n ของวัสดุสารกึ่งตัวนำ เพื่อให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นภายในบริเวณรอยต่อ ทำให้มีอิเล็กตรอนและโฮลที่ผลิตจากพลังงานแสงเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าด้านบนและด้านล่าง เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า โดยความลึกของชั้นรอยต่อประมาณ $0.5 - 1.5 \mu\text{m}$ เพื่อให้แสงทะลุลงบริเวณรอยต่อและสามารถดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น $480 - 600 \text{ nm}$ ซึ่งเป็นย่านที่ให้ความเข้มแสงสูงสุด

แผ่นฐานซิลิคอนที่ผ่านการสกัดผิวให้ขรุขระ โดยทั่วไปมีความหนาประมาณ $180 - 200 \mu\text{m}$ เพื่อให้สอดคล้องกับค่าความยาวในการแพร่ของพาหะในวัสดุ และมีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นในระดับกลางไม่เกิน $10 \Omega\cdot\text{cm}$

ชั้น p⁺-Si ที่ทำให้เกิด Back surface field (BSF) ที่ด้านหลังเซลล์จากความแตกต่างของอะตอมสารเจือในชั้น p-Si ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำและขั้วไฟฟ้า เป็นผลให้เกิดระยะทางในการแพร่ของพาหะสูง ทำให้ช่วงอายุของพาหะยาวขึ้น

ขั้วไฟฟ้ายกริดที่ด้านหน้ารับแสง เพื่อไม่ให้บังการรับแสงและได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ซึ่งรวบรวมอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังจะมีการเคลือบแบบเต็มพื้นที่ผิว สำหรับรวบรวมโฮลและยังช่วยเพิ่มโอกาสการสะท้อนแสงกลับเข้าสู่ภายในเซลล์

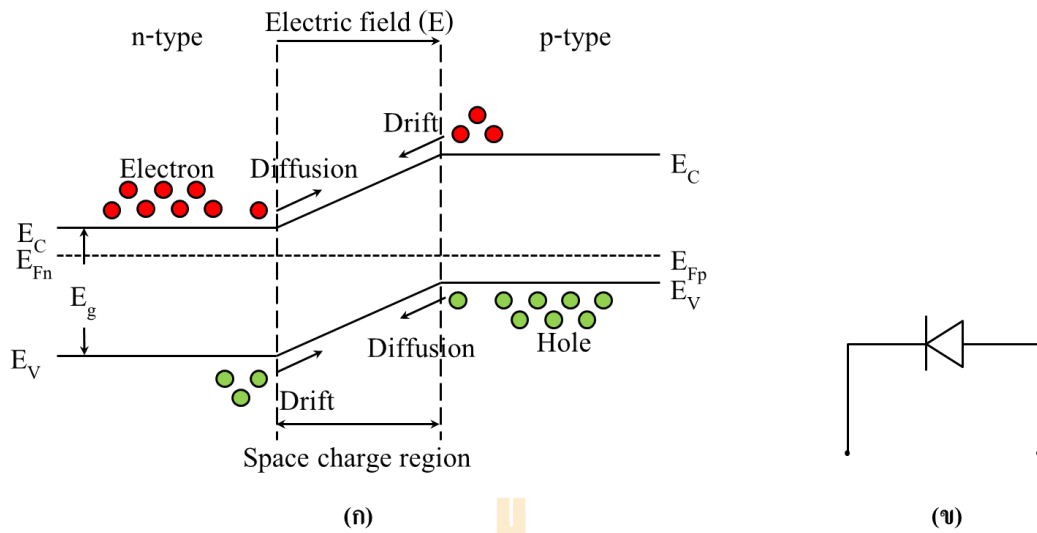


รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างรอยต่อ p/n-Si

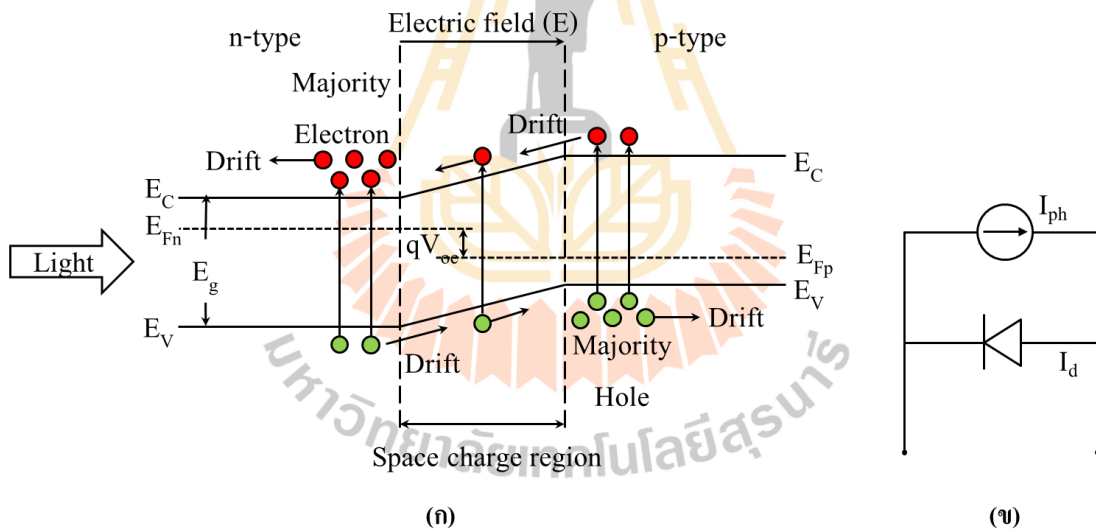
2.2.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si

เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างพื้นฐานของรอยต่อ p/n-Si มีกลไกการทำงาน ซึ่งแบ่งเป็นกรณีเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสภาวะมืด (Dark characteristic) และกรณีเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสภาวะได้รับแสง (Illuminated characteristics) ดังนี้

กรณีเมื่อไม่มีพลังงานแสงหรือพลังงานโฟตอน (Photon) ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิห้องจะไหลสวนทางกัน มีค่าผลรวมเท่ากับศูนย์ ทำให้ที่รอยต่อ p/n-Si อยู่ในสภาวะสมดุล (Equilibrium) เกิดกำแพงศักย์ในบริเวณ Space charge region ของประจุบวกจากสารเจือหมู่ที่ 5 และประจุลบจากสารเจือหมู่ที่ 3 บริเวณรอยต่อเกิดสนามไฟฟ้าภายใน (Build-in potential) ขึ้น ซึ่งจะกั้นการเคลื่อนที่ของคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นในแต่ละด้าน โดยปริมาณพาหะจากการแพร่ (Diffusion) เท่ากับปริมาณพาหะจากการพัดพา (Drift) อีกทั้งการแพร่และการพัดพามีทิศตรงข้ามกันทำให้กระแสไฟฟ้ารวมของพาหะทั้งหมดที่ข้ามรอยต่อเป็นศูนย์ ไม่มีกระแสไฟฟ้าผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์ มีเพียงศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อจากบริเวณ Space charge region เท่านั้นเสมือนการเปิดวงจร (Open circuit) แถบพลังงานของรอยต่อ p/n-Si แสดงกลไกการทำงานและวงจรสมมูลไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาวะมืดในรูปที่ 2.2



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



รูปที่ 2.3 (ก) กลไกการเดินทางของพาหะในแถบพลังงานของรอยต่อ p/n-Si ในสภาวะได้รับแสง และ (ข) วงจรสมมูลไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์สภาวะได้รับแสง

กรณีเมื่อมีแสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีพลังงานแสงหรือพลังงานโฟตอนมากกว่าหรือเท่ากับแถบพลังงานช่องว่าง (Energy band gap, E_g) ของวัสดุสารกึ่งตัวนำ จะเกิดการผลิตุพาหะอิเล็กตรอนและโฮลส่วนเกิน (Excess carriers) ในวัสดุขึ้น ทำให้ที่รอยต่อ p/n-Si อยู่ใน

สภาวะไม่สมดุล (Non-equilibrium) เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นจากพลังงานโฟตอนนั้น เคลื่อนที่แบบพัดพา (Drift) ในสนามไฟฟ้า ทำให้อิเล็กตรอนส่วนเกินที่ผลิตได้ในชั้น p-Si เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปชั้น n-Si ไปรวมกับอิเล็กตรอนในชั้น n-Si เพื่อเดินทางไปยังขั้วโลหะภายใต้ อิทธิพลของการพัดพาในสนามไฟฟ้าภายใน เกิดกระแสอิเล็กตรอนแบบพัดพาที่มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับกระแสโฮลมีการเกิดในลักษณะเช่นเดียวกัน ซึ่งเดินทางสวนทางกับกระแสอิเล็กตรอน ดังนั้นในสภาวะที่ไม่สมดุลนี้จึงเกิดระดับพลังงานเฟอร์มิของทั้งสองด้านต่างกันเท่ากับ qV_{oc} แสดง กลไกการเคลื่อนที่ของพาหะได้ในรูปที่ 2.3 อย่างไรก็ตาม ในกลไกดังกล่าวยังมีปริมาณกระแสไฟฟ้า ไดโอด (I_D) ที่เกิดจากกลไกการแพร่ (Diffusion) จากพาหะส่วนมาก (Majority carriers) ของแต่ละ ด้านพยายามข้ามรอยต่ออีกด้านหนึ่ง ทำให้กระแสไดโอดมีปริมาณน้อยและมีทิศทางตรงกันข้าม กับกระแสส่วนเกินที่ได้รับการกระตุ้นจากแสงโฟตอน (I_L)

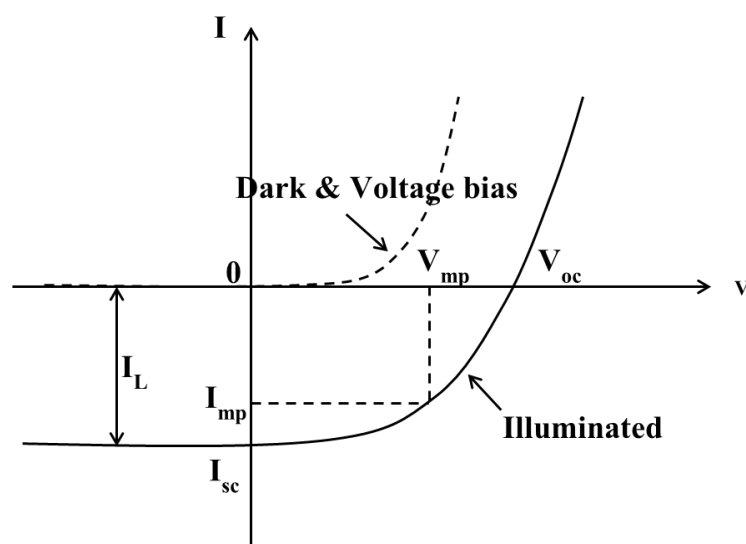
2.2.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อมีแสงตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดการสร้างคู่พาหะอิสระ หรือเรียกว่า พาหะส่วนเกินที่เกิดจากพลังงานโฟตอน (Excess carriers) และที่บริเวณรอยต่อ p/n-Si จะเกิดการ สะสมประจุบวกและลบบริเวณ Space charges region เรียกว่า Build in potential เป็นสนามไฟฟ้า ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้กระแสพัดพาโฮลและอิเล็กตรอนเดินทางไปยังขั้วไฟฟ้าแต่ละด้าน ทิศทางกระแสพาหะส่วนเกินที่ผลิตได้จากโฟตอนมีทิศสวนทางกับกระแสไดโอดที่เกิดจากกลไก การแพร่ของพาหะส่วนมากข้ามรอยต่อ แสดงกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ในสมการที่ (2.1) และ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหล (I) และแรงดันไฟฟ้า (V) แสดงในรูปที่ 2.4

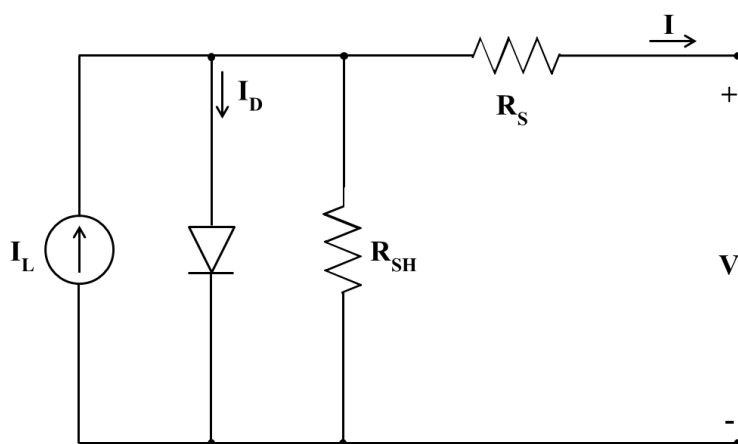
$$I = I_D - I_L = I_0(e^{qV_{oc}/kT} - 1) - I_L \quad (2.1)$$

- โดยที่
- I คือ กระแสไฟฟ้ารวมของเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น A
 - I_D คือ กระแสไฟฟ้าไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ มีหน่วยเป็น A
 - I_L คือ กระแสโฟตอนหรือกระแสส่วนเกินที่ได้รับการกระตุ้นจากแสงตกกระทบบ
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)

เซลล์แสงอาทิตย์จะมีความต้านทานไฟฟ้าแฝงภายใน 2 ชนิด คือ ความต้านทานอนุกรม (Series resistance, R_s) ที่เกิดจากความต้านทานไฟฟ้าของเนื้อผลึกและบริเวณรอยสัมผัสระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำและขั้วโลหะ และความต้านทานขนาน (Shunt resistance, R_{sh}) ที่เกิดจากรอยต่อของชั้น p-Si และ n-Si ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลการไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (I) และแรงดันไฟฟ้า (V) ภายใต้สภาวะมืดและสภาวะได้รับแสง



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit current, I_{sc}) เป็นค่าของกระแสไฟฟ้าสูงสุด เมื่อแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ในสมการที่ (2.1) จะได้ว่า $I_{sc} = I_L$ โดยในเงื่อนไขอุดมคติ สมมติให้พลังงานโฟตอนมีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานของวัสดุสารกึ่งตัวนำและสัมพันธ์กับความกว้างของ Space charge region จะสามารถกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล รวมกันเป็นกระแสไหลออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ไปสู่วงจรภายนอกได้ โดยแสดงความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในสมการที่ (2.2)

$$I_L = qAG(L_e + W + L_h) \quad (2.2)$$

โดยที่ A	คือ พื้นที่หน้าตัดของเซลล์แสงอาทิตย์
G	คือ อัตราการสร้างคู่อิเล็กตรอนและโฮล
L_e และ L_h	คือ ระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ
W	คือ ความกว้างของบริเวณ Space charges region

ดังนั้น เมื่อต้องการกระแสส่วนเกินที่ได้รับการกระตุ้นจากแสงโฟตอน (I_L) มาก อัตราการสร้างคู่อิเล็กตรอนและโฮล รวมทั้งระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล จำเป็นต้องมีค่ามาก จึงจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ให้กระแสไฟฟ้าที่สูงได้

แรงดันไฟฟ้าวงจรมืด (Open circuit voltage, V_{oc}) เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด เมื่อกระแสมีค่าเป็นศูนย์จากสมการที่ (2.1) จะได้แรงดันไฟฟ้าวงจรมืด ดังสมการที่ (2.3)

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (2.3)$$

โดยจากสมการจะพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัว (I_0) มีผลอย่างมากต่อค่าแรงดันไฟฟ้าเปิด ซึ่งเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวมีค่าต่ำที่สุดจึงจะทำให้ได้ V_{oc} สูงสุด โดยระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่มากขึ้น ช่วยลดการรวมตัวใหม่ของพาหะ จะทำให้กระแสไฟฟ้าอิมิตัวมีค่าต่ำดังสมการที่ (2.4)

$$I_0 = A\left(\frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D}\right) \quad (2.4)$$

- โดยที่ n_i คือ ความหนาแน่นของพาหะแบบ Intrinsic โดยที่อุณหภูมิห้อง n_i ของซิลิคอน มีค่าเท่ากับ $1.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
- D_e คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน
- D_h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล
- N_A คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้รับ (Acceptor)
- N_D คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้ (Donor)

ฟิลแฟกเตอร์ (Fill factor, FF) เป็นตัวบ่งบอกคุณภาพของรอยต่อ p/n-Si หรือบ่งบอกถึงผลกระทบของค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) และความต้านทานขนาน (R_{sh}) ที่ส่งผลถึงคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยฟิลแฟกเตอร์แสดงในสมการที่ (2.5)

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.5)$$

- โดยที่ V_{mp} คือ แรงดันไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด มีหน่วยเป็น V
- I_{mp} คือ กระแสไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุด มีหน่วยเป็น A

ในทางอุดมคติค่าฟิลแฟกเตอร์มีค่าเท่ากับหนึ่ง จากเทอมผลคูณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับเทอมผลคูณของแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรและกระแสไฟฟ้าลัดวงจร แต่โดยทั่วไปฟิลแฟกเตอร์มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง ซึ่งบ่งบอกถึงค่าความต้านทานไฟฟ้าแฝงในเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าต้องการให้ฟิลแฟกเตอร์มีค่ามาก จำเป็นต้องศึกษาหาสาเหตุของผลกระทบต่อความต้านทานไฟฟ้าแฝงในเซลล์แสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Energy conversion efficiency, η) เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าเข้าและกำลังไฟฟ้าออก โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.6)

$$\eta = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.6)$$

- โดยที่ P_{in} มีค่าเท่ากับ 1000 W/m^2 ที่แสงเทียมมาตรฐาน AM1.5

ในปัจจุบัน ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนที่ผลิตในภาคอุตสาหกรรมมีค่าประมาณ 18 - 22% ซึ่งพลังงานแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์บางส่วนถูกนำไปใช้ประโยชน์ บางส่วนสูญเสียไม่ได้ใช้ประโยชน์ เช่น แสงบางส่วนที่เกิดการสะท้อนกลับ และแสงที่ทะลุผ่านเซลล์จากความยาวคลื่นยาวที่ไม่สอดคล้องกับซิลิคอน เป็นต้น

2.2.4 การสูญเสียในเซลล์แสงอาทิตย์

การสูญเสียในเซลล์แสงอาทิตย์แบ่งได้เป็นการสูญเสียทางแสง (Optical losses) และการสูญเสียทางไฟฟ้า - อิเล็กทรอนิกส์ (Electrical losses) โดยกลไกการสูญเสียทางแสง แสดงในรูปที่ 2.6 จะเกิดจากสาเหตุดังนี้

การสร้างขั้วไฟฟ้าบนผิวด้านรับแสงทำให้เกิดการบังแสงขึ้น แก้ไขโดยการลดขนาดและระยะห่างของขั้วไฟฟ้าให้เหมาะสม หรือใช้เทคนิคการฝังขั้วไฟฟ้าในร่องขนาดเล็ก

การสะท้อนแสงกลับที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ การปรับปรุงทำได้โดยการสกัดพื้นผิวให้ขรุขระและการมีฟิล์มบางป้องกันการสะท้อนแสงกลับที่มีค่าดัชนีการหักเหแสงและความหนาของวัสดุฟิล์มบางที่เหมาะสม จากหลักการของ Snell's law ฟิล์มป้องกันการสะท้อนแสงจะมีค่าดัชนีหักเหแสงอยู่ระหว่างค่าดัชนีหักเหแสงของอากาศและซิลิคอน ซึ่งนิยมใช้ฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) หรือซิลิคอนไนไตรด์ (SiN_x)

การทะลุผ่านของแสงที่มีย่านพลังงานโฟตอนต่ำกว่า E_g (1.1eV) ของวัสดุซิลิคอน เช่น แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 1127 nm วัสดุซิลิคอนจะไม่สามารถดูดกลืนได้ ซึ่งความยาวคลื่นมีความสัมพันธ์กับพลังงาน (eV) แสดงในสมการที่ (2.7)

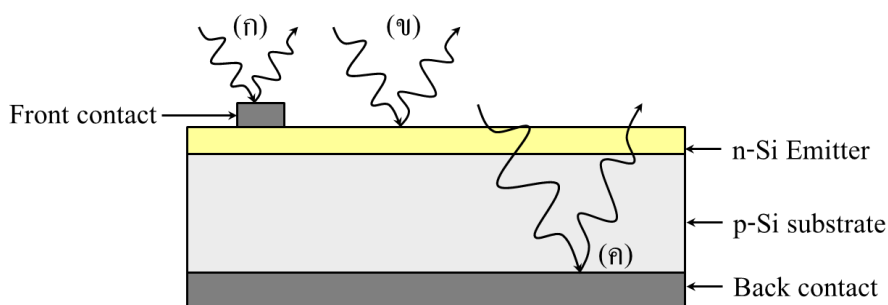
$$E(\text{eV}) = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})} = \frac{1.240}{\lambda(\mu\text{m})} \quad (2.7)$$

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

c คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s

λ คือ ความยาวคลื่น

อย่างไรก็ตาม ถ้าพลังงานโฟตอนมีค่ามากกว่า E_g มากเกินไป เช่น ตั้งแต่แสงสีแดงจนถึงแสงสีน้ำเงิน จะทำให้เกิดพลังงานส่วนต่าง ซึ่งอยู่ในรูปของพลังงานโฟนอน (Phonon) หรือความร้อน ทำให้เกิดการสูญเสียของโครงสร้างที่ไม่สามารถนำพลังงานแสงช่วงดังกล่าวมาผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



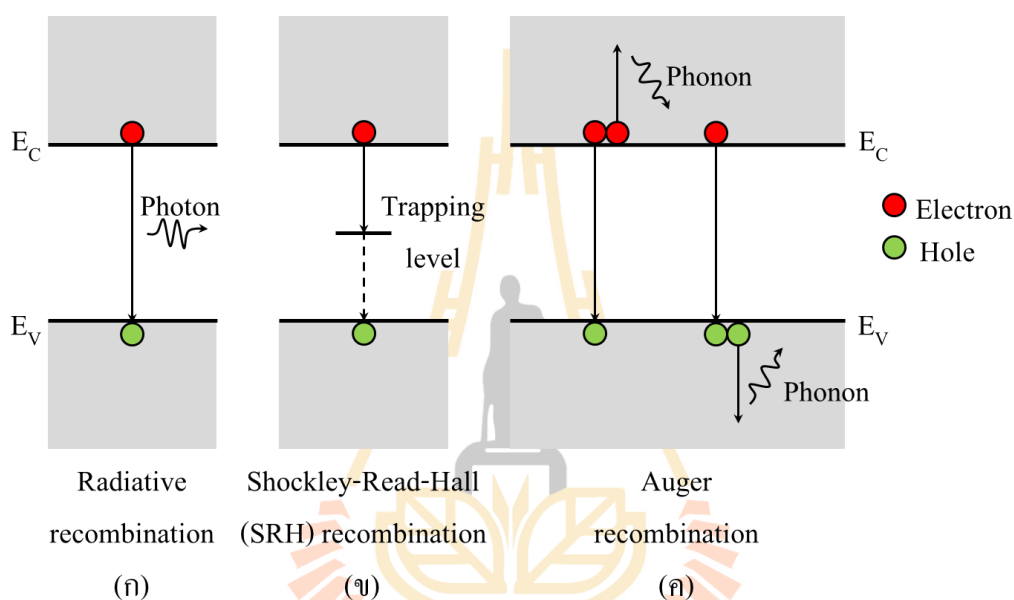
รูปที่ 2.6 การสูญเสียทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) การบังแสงจากขั้วไฟฟ้าบนผิวด้านรับแสง (ข) การสะท้อนแสงที่ผิวด้านรับแสง และ (ค) การสะท้อนกลับที่ผิวด้านหลัง

การสูญเสียทางไฟฟ้า - อิเล็กตรอนิกส์เป็นการสูญเสียเนื่องจากการรวมตัวใหม่ของพาหะ (Carrier recombination) ที่ถูกกระตุ้น ก่อนที่จะเดินทางไปยังขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ จะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ (I_L) ลดลง โดยกลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะมี 3 ชนิด โดยแสดงในรูปที่ 2.7 ดังต่อไปนี้

การรวมตัวใหม่แบบเปล่งแสง (Radiative recombination) เกิดขึ้นในวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง (Direct band gap) เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) เมื่ออิเล็กตรอนจากแถบคอนดักชัน (Conduction band) มารวมตัวกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ (Valence band) จะเกิดการปล่อยพลังงานในรูปของพลังงานแสงที่เท่ากับช่องว่างพลังงาน (Energy band gap) ของวัสดุนั้น ซึ่งในส่วนของซิลิคอน (Si) ที่มีช่องว่างพลังงานแบบอ้อม (Indirect band gap) ซึ่งมีจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันในตำแหน่งโมเมนตัมไม่ตรงกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ จึงเกิดการรวมตัวใหม่แบบเปล่งแสงน้อย

การรวมตัวใหม่ที่ตำแหน่งบกพร่อง (Shockley-Read-Hall (SRH) recombination) พบได้ทั้งภายในโครงสร้างผลึกและที่พื้นผิวของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ ซึ่งจุดบกพร่องจะเกิดเป็นสถานะดักจับ (Trapping level) บริเวณแถบกลางในช่องว่างพลังงาน แต่ถ้าจุดบกพร่องอยู่ใกล้ขอบของแถบพลังงาน โอกาสของการรวมตัวใหม่นี้จะลดลง โดยจากผลของการรวมตัวใหม่ที่จุดบกพร่อง จะพบว่าบริเวณที่มีความหนาแน่นของพาหะที่สูง จะมีอัตราการรวมตัวใหม่ที่สูง โดยเฉพาะบริเวณพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์และบริเวณรอยต่อของวัสดุสารกึ่งตัวนำกับขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียทางไฟฟ้า ดังนั้นเพื่อเป็นการลดการรวมตัวใหม่ จึงต้องสร้างประจุไฟฟ้าเพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าบริเวณพื้นผิวขึ้น โดยประจุไฟฟ้าสร้างได้ 2 วิธีคือ การสร้างชั้นรอยต่อที่มีความเข้มข้นของสารเจือต่างกันและการสร้างชั้นฉนวนบาง ๆ เพื่อเป็นที่รวบรวมประจุ (Fixed charges) เกิดประจุภายในชั้นฉนวน

การรวมตัวใหม่แบบออเจอร์ (Auger recombination) เกิดได้มากที่สุดในเซลล์แสงอาทิตย์ โดยระหว่างที่อิเล็กตรอนตัวหนึ่งที่แถบคอนดักชันตกกลับมารวมตัวกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ได้ไปชนกับอิเล็กตรอนหรือโฮลที่อยู่ด้านข้างอีกตัว ทำให้อิเล็กตรอนหรือโฮลตัวนั้นได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจนข้ามไปยังระดับพลังงานที่สูงกว่า และตกกลับลงมาที่ระดับพลังงานเดิม เกิดการคายพลังงานโฟนอนในรูปของพลังงานความร้อน ซึ่งพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะทำให้โครงผลึกสั่น (Lattice vibration) และเสียหายได้ ทำให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานมีค่าจำกัด โดยทั่วไปจะเกิดในวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือสารเจือในปริมาณความเข้มข้นสูง



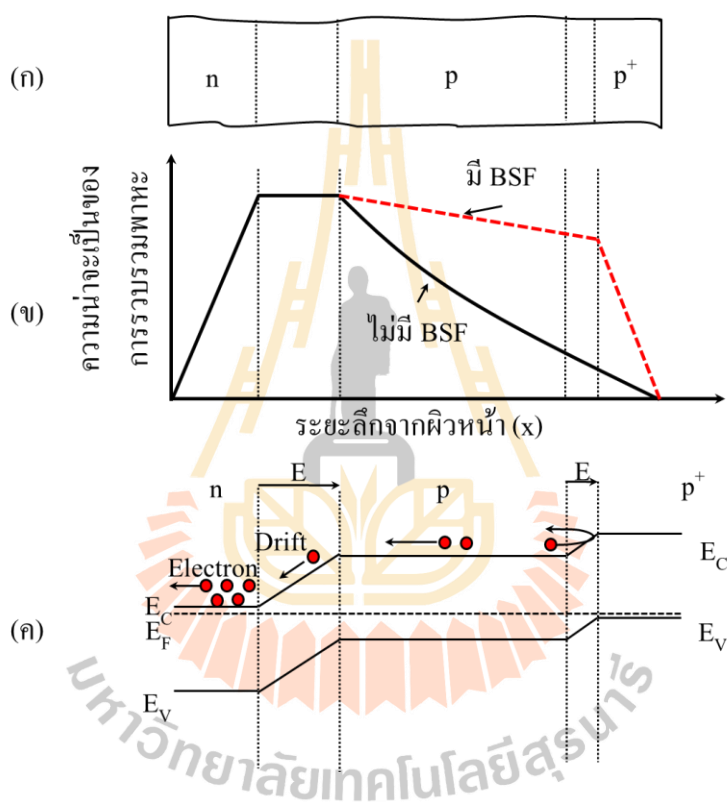
รูปที่ 2.7 กลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะแบบต่าง ๆ ของวัสดุสารกึ่งตัวนำ (ก) การรวมตัวใหม่แบบเปล่งแสง (ข) การรวมตัวใหม่ที่ตำแหน่งบดพร่องและ (ค) การรวมตัวใหม่แบบออเจอร์

การลดการรวมตัวใหม่หรือการที่พาหะมีอายุการเดินทางที่ยาว จะทำให้เกิดการรวบรวมพาหะที่ขั้วไฟฟ้าได้มาก จึงผลิตกระแสไฟฟ้าได้มากและส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเพิ่มขึ้น

2.2.5 หลักการเกิดสนามไฟฟ้าที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ (Back Surface Field)

โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้หลักการแพร่ของอะลูมิเนียมจากขั้วไฟฟ้าด้านหลัง เพื่อให้เกิดบริเวณ p^+ -Si มีการใช้มาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 โดยปัจจุบันได้ใช้กระบวนการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว (Fast firing) เพื่อให้เกิดบริเวณ p^+ -Si ขึ้นใกล้กับพื้นผิวรอยสัมผัสระหว่างแผ่นฐาน p -Si และขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม ซึ่งเรียกว่า Back surface field (BSF) ซึ่งเป็นบริเวณ

สนามไฟฟ้า ส่งผลให้ประสิทธิภาพการรวบรวมกระแสพาหะเพิ่มขึ้น ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีปริมาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น แสดงในรูปที่ 2.8 (ก) อธิบายถึงโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si ที่มีสนามไฟฟ้าด้านหลัง (ข) แสดงความน่าจะเป็นในการรวบรวมพาหะ (Collection probability) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีและไม่มี BSF พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี BSF มีการรวบรวมพาหะบริเวณด้านหลังเซลล์ได้เพิ่มมากขึ้น และ (ค) แสดงแผนผังกลไกการเดินทางของอิเล็กตรอนในแถบพลังงานของรอยต่อ n/p/p⁺ (AI-BSF) พบว่าอิเล็กตรอนถูกผลักกลับไปทางด้านหน้า ซึ่งช่วยลดการรวมตัวใหม่ของพาหะที่พื้นผิวด้านหลังได้



รูปที่ 2.8 (ก) โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p/n-Si ที่มีสนามไฟฟ้าด้านหลัง (ข) ความน่าจะเป็นในการรวบรวมพาหะ (Collection probability) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีและไม่มี BSF และ (ค) กลไกการเดินทางของอิเล็กตรอนในแถบพลังงานของรอยต่อ n/p/p⁺ (AI-BSF)

ที่ด้านหลังของเซลล์ AI-BSF ประกอบด้วย พื้นผิวที่ถูกแพร์ด้วยสารเจือสูง (Heavily doped, p⁺-Si) ระหว่างวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และขั้วไฟฟ้าด้านหลัง BSF (ที่มีความหนา W) จะมีโฮลแทรกอยู่ที่ด้านหลังของ p-Si เพิ่มความหนาแน่นของโฮลที่ด้านหลัง ลด

ความเร็วในการรวมตัวใหม่ที่พื้นผิว (Effective surface recombination velocity, S_{eff}) เนื่องจาก Built-in potential จะผลักพาหะข้างน้อย ได้แก่ อิเล็กตรอนกลับที่ด้านหน้า เพิ่มความหนาแน่นของ อิเล็กตรอนในบริเวณที่มีการแพร่ด้วยสารเจือดำ (Lightly doped) ของ p-Si ซึ่งวิธีการนี้จะแสดง คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำ ในขณะที่เดียวกัน ผลของ สนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในรอยต่อ p/n-Si มีอิเล็กตรอนแทรกอยู่ที่รอยต่อด้านหน้า สนามไฟฟ้าที่รอยต่อ ด้านหน้าและด้านหลังมีกำแพงศักย์ภายในกันพาหะ โดยโฮลเดินทางมาจากด้านหน้าและ อิเล็กตรอนเดินทางมาจากด้านหลังตามลำดับ ดังนั้นสนามไฟฟ้าส่วนดังกล่าวจะสามารถลดอัตรา การรวมตัวใหม่ของพาหะที่พื้นผิวได้

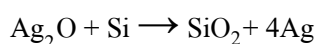
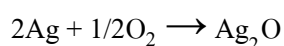
การสร้างบริเวณ p^+ -Si ที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้น ของแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) และปริมาณกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้ แสงสว่าง จากการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของพาหะส่วนใหญ่ (Majority carrier concentration) ที่ ด้านหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีส่วนของ BSF

2.2.6 การสร้างชั้น Ag - FSF

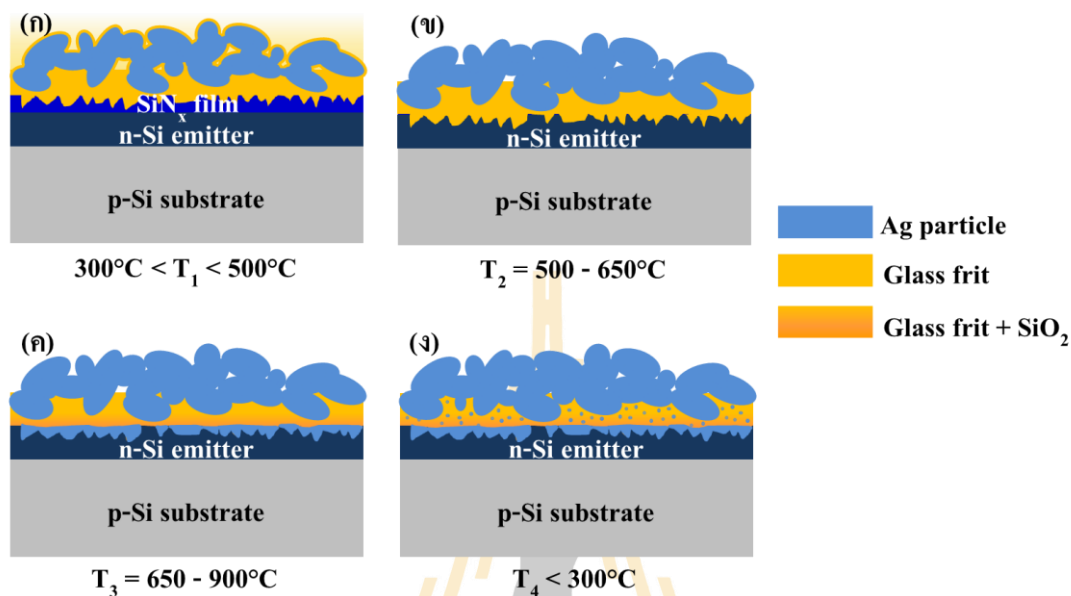
โดยทั่วไปการสร้างขั้วไฟฟ้าลงบนชั้น n-Si emitter สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ แผ่นฐานชนิด p-Si จะนิยมใช้กาวเงิน (Silver paste) ด้วยวิธีการพิมพ์ลาย ซึ่งกาวเงินประกอบด้วย อนุภาคของเงิน (Ag) สารประกอบอินทรีย์ ตัวทำละลาย และ Glass frit ซึ่งการเกิดชั้นสนามไฟฟ้า ด้านหน้า (Front surface filed, FSF) จากการแพร่ซึมของอะตอมเงินที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ ให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว แสดงดังรูปที่ 2.9 และอธิบายได้ดังนี้

เริ่มต้นจากการพิมพ์ลายกาวเงินลงบนชั้นป้องกันการสะท้อนแสง (SiN_x film) จากนั้นทำการเผาไล่สารประกอบอินทรีย์ และตัวทำละลายออกที่อุณหภูมิประมาณ $300^{\circ}C$ จากนั้นที่ อุณหภูมิ $500^{\circ}C$ จะทำให้ Glass frit ละลายและเคลือบพื้นผิวของชั้นฟิล์ม SiN_x กับอนุภาค Ag และที่ อุณหภูมิ $500 - 650^{\circ}C$ Glass frit ที่หลอมละลายจะแทรกเข้าสู่ชั้นฟิล์ม SiN_x ไปถึงชั้น n-Si emitter

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้น ($650 - 900^{\circ}C$) Ag จะละลายใน Glass frit และแพร่เข้าสู่ พื้นผิวของชั้น n-Si emitter อีกทั้ง Ag จะถูกใช้ในปฏิกิริยา Redox และทำปฏิกิริยากับ Si เกิดเป็น SiO_2 ซึ่งหลอมละลายรวมกับ Glass frit และเคลือบลงบนผิว Ag บน n-Si emitter ดังสมการ



เมื่อลดอุณหภูมิลง ความสามารถในการละลายของ Ag จะลดลง เกิดการตกผลึกของ Ag อยู่ภายใน Glass frit และต้องลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันไม่ให้ Ag ทะลุผ่านชั้น n-Si emitter ทำให้เกิดการลัดวงจร



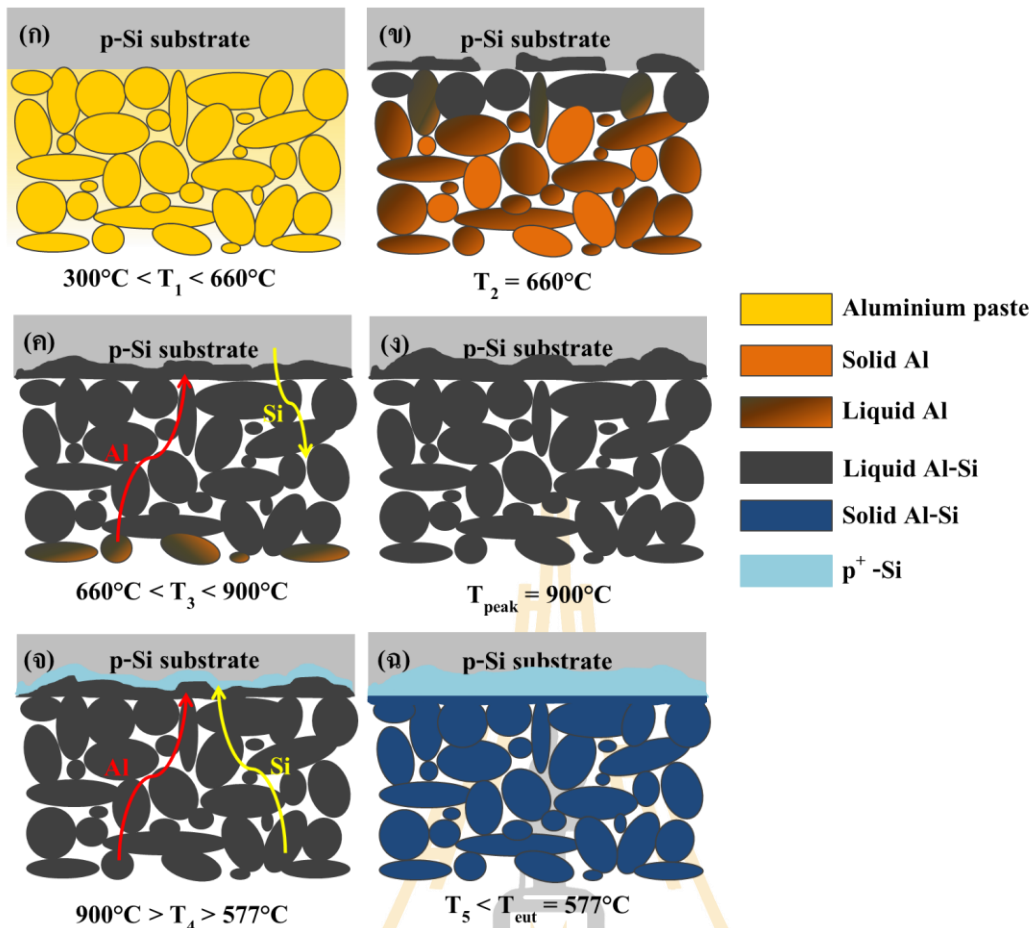
รูปที่ 2.9 กระบวนการสร้างชั้น Ag - FSF

2.2.7 การสร้างชั้น Al - BSF

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้แผ่นฐานชนิด p-Si ใช้ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลัง ซึ่งกาวอะลูมิเนียม (Aluminum paste) ประกอบด้วยอนุภาคของอะลูมิเนียม สารประกอบอินทรีย์ และตัวทำละลาย การเกิดชั้น Al - BSF ที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสของแผ่นฐาน p-Si ด้านหลังจะเกิดขึ้นในขณะกระบวนการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของ Al (660°C) การเกิด Interaction ระหว่าง Al-Si แสดงดังรูปที่ 2.10 และอธิบายได้ดังนี้

ในกระบวนการเผาเริ่มต้นจะเป็นการเผาไล่สารประกอบอินทรีย์ และตัวทำละลายออก โดยระหว่างกระบวนการให้ความร้อน ความสามารถในการละลายของ Si เข้าไปใน Al เริ่มต้นที่อุณหภูมิประมาณ 300°C และเพิ่มขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิ 577°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic temperature)

อนุภาคของแข็งของ Al จะเปลี่ยนเป็นสถานะของเหลวเหนือจุดหลอมเหลวของ Al (660°C) และ Si ที่พื้นผิวจะถูกละลาย ระหว่างกระบวนการ Alloy เกิดเป็น Liquid Al-Si-phase ที่รอยต่อเริ่มแทรกซึมเข้าไปใน Si bulk



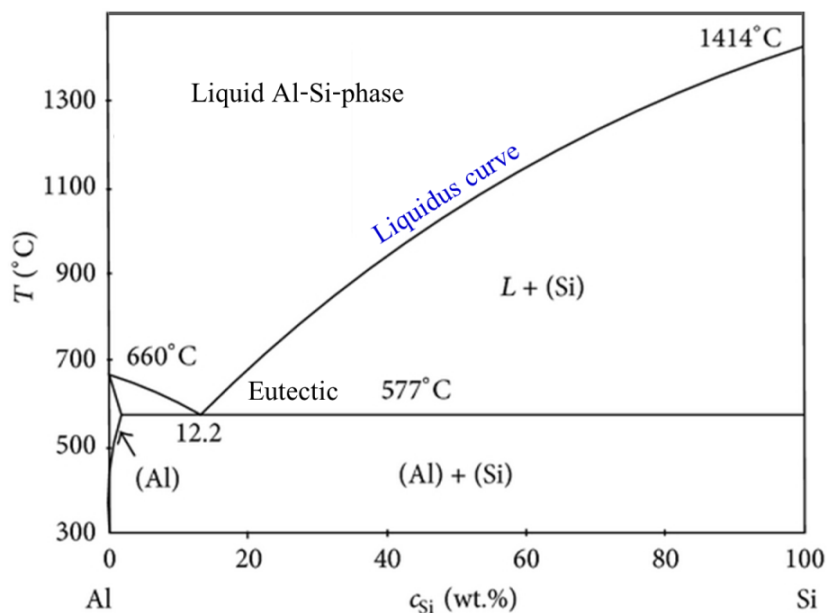
รูปที่ 2.10 กระบวนการสร้างชั้น Al - BSF

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้น องค์ประกอบของสารละลายสามารถถูกกำหนดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิตามเส้น Liquidus ในแผนภาพเฟส (Phase diagram) แสดงในรูปที่ 2.11 โดย Si จะถูกละลายใน Liquid Al-Si-phase มากขึ้น ดังนั้น Al จึงแพร่เข้าไปใน Si bulk เพื่อชดเชยกระบวนการ

ที่อุณหภูมิสูงสุดที่ประมาณ 900°C สำหรับการเผาขั้วไฟฟ้า พบว่าความเข้มข้นของ Si ใน Liquid Al-Si-phase สูงสุดอยู่ที่ประมาณ 30% และ Al อยู่ในสถานะของเหลวทั้งหมด

กระบวนการแข็งตัวระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำสามารถอธิบายได้ตามเส้นขอบของ Liquidus solidus phase ระหว่างการเย็นตัว ความเข้มข้นของ Si ใน Liquid Al-Si-phase จะลดลงเมื่ออุณหภูมิการเผาตกลงตามเส้น Liquidus ในแผนภาพเฟส (รูปที่ 2.11) ซึ่งหมายความว่า Si จะแยกตัวออกจาก Liquid Al-Si-phase เกิดการโตแบบ Epitaxial ที่รอยต่อ Liquid Al-Si-phase/Si ในขณะเดียวกัน การละลายของ Al ใน Si เกิดการเจือในทันทีใกล้กับพื้นผิว Si ของแข็ง และเกิดบริเวณ p^+ -Si (BSF) ดังนั้น BSF จะถูกสร้างขึ้นจาก Epitaxially recrystallization ของ Si จาก Liquid

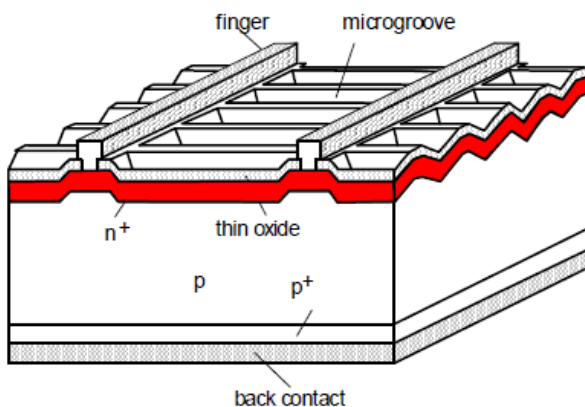
Al-Si-phase ซึ่งถูกเจือด้วยอะตอมของ Al สูง และถูกสร้างจากการรวมตัวกันของอะตอม Al ใน Si lattice ซึ่งภายใต้อุณหภูมิเทคนิคของเหลวทั้งหมดจะแข็งตัว โดยโครงสร้างของ Alloy ขึ้นกับ อุณหภูมิและความแตกต่างของความเข้มข้น



รูปที่ 2.11 Al-Si binary phase diagram (Krause, 2011)

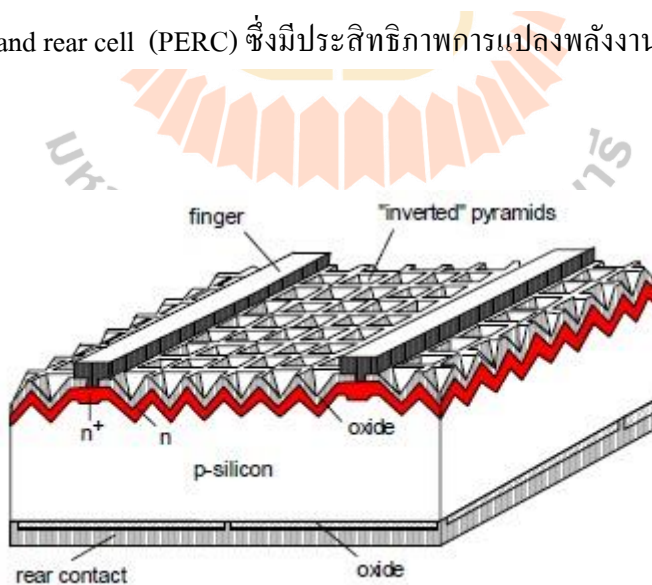
2.2.8 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนประสิทธิภาพสูง

ในปี ค.ศ. 1984 นักวิจัยห้องปฏิบัติการที่ University of New South Wales (UNSW) ได้ทำการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Passivated emitter solar cell (PESC) ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 20% ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยเป็นเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างรอยต่อ p/n-Si ที่ประกอบด้วย ชั้นฟิล์มบาง SiO_2 สำหรับพาสซีเวชันที่ด้านหน้ารับแสง เพื่อแก้ปัญหาจุดบกพร่องที่ผิวสัมผัส ทำให้ความเร็วในการรวมตัวใหม่ที่พื้นผิว (Surface recombination velocity, S_{eff}) ของอิเล็กตรอนและโฮลด้านหน้ามีค่าลดลง เซลล์แสงอาทิตย์มีพื้นผิวด้านหน้า ลักษณะเป็นร่องรูปทรงตัววีลึกระดับไมโครเมตร (Micro-grooved) เพื่อลดการสะท้อนแสงกลับที่ผิว ทำให้ดูดกลืนแสงในเนื้อวัสดุได้มากขึ้น รวมถึงที่ด้านหลังเซลล์มีชั้น p^+ -Si BSF ที่มีความเข้มข้นของสารเจือมากกว่าแผ่นฐาน ทำให้ความสามารถในการรวบรวมการสะสมของพาหะเพิ่มขึ้น ช่วยปรับปรุงอายุของพาหะที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง



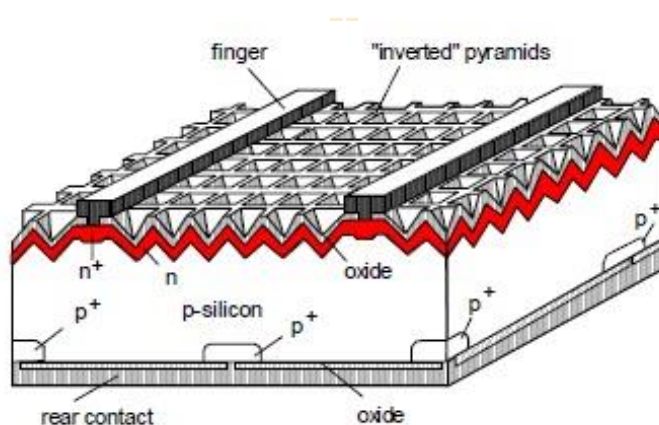
รูปที่ 2.12 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Passivated emitter solar cell (PESC) (Green, 2015)

ต่อมาได้ทำการปรับปรุงโดยการเพิ่มชั้นฉนวนที่ด้านหลังระหว่างขั้วไฟฟ้าและวัสดุสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นโครงสร้าง Metal-Insulation-Semiconductor (MIS) เพื่อลดจุดบกพร่องที่ผิวสัมผัส ทำให้ลดการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิว สามารถรวบรวมกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการขึ้นฉนวนออกไซด์ได้เปิดช่องบางบริเวณด้วยเทคนิคกระบวนการถ่ายทอดลวดลายด้วยแสง (Photolithography) เกิดเป็น Alloyed-aluminium back-surface-field ในบางบริเวณ เพื่อลดผลของค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าและวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ด้านหลัง อีกทั้งด้านหน้าได้สร้างผิวพีระมิดหัวกลับขนาดเล็ก เพื่อลดการสะท้อนแสงกลับ เรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Passivated emitter and rear cell (PERC) ซึ่งมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 20% ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Passivated emitter and rear cell (PERC) (Green, 2015)

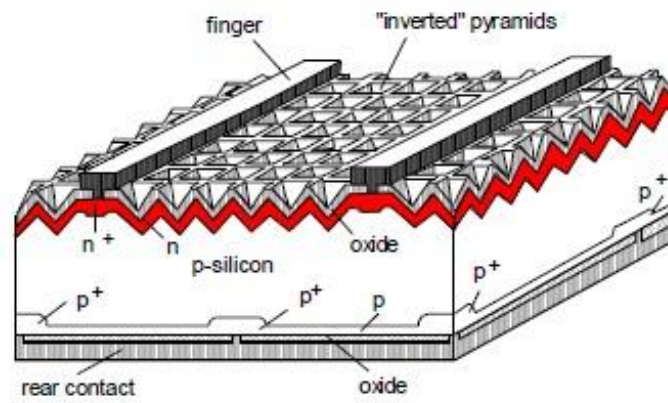
ในปี ค.ศ. 1995, Zhao, J. และคณะผู้วิจัย ได้มีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Passivated emitter and rear locally diffused cell (PERL) ซึ่งมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 24% แสดงในรูปที่ 2.14 เป็นเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างรอยต่อ p/n-Si ที่มีการแพร่สารเจือบางบริเวณให้เกิดบริเวณ p^+ -Si ในพื้นที่ระหว่างช่องเปิดของชั้นฉนวนบาง ๆ ด้านหลัง เรียกว่า Local back passivation หรือ Local back surface field (LBSF) เป็นการลดพื้นที่สัมผัสระหว่างรอยต่อ p^+ -Si กับ p-Si ซึ่งจะช่วยลดความต้านทานไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าและวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ด้านหลัง และชั้นฉนวนด้านหลังเป็นชั้นพาสซีเวชัน ช่วยลดการรวมตัวใหม่ของพาหะเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ



รูปที่ 2.14 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Passivated emitter and rear locally diffused cell (PERL)

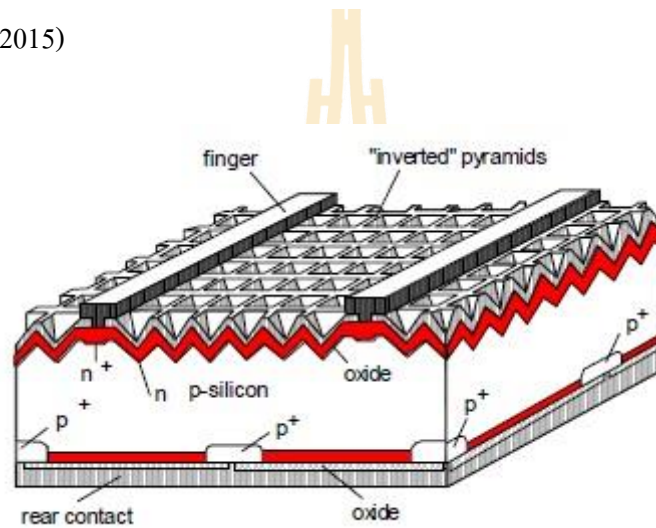
(Green, 2015)

ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Passivated emitter and rear totally diffused cell (PERT) จะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างรอยต่อ p/n-Si ที่มีลักษณะคล้ายกับ PERL แต่มีการแพร่สารเจือทั้งพื้นที่รอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าและวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ด้านหลัง เพื่อง่ายต่อการผลิตในอุตสาหกรรม ซึ่งมักใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในอวกาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Passivated emitter and rear floating junction cell (PERF) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างรอยต่อ p/n-Si ที่มีจุดเชื่อมต่อแบบลอยตัวที่พื้นผิวด้านหลัง และมีการเจือสารเจือที่มีความเข้มข้นน้อย ทำให้มีความต้านทานไฟฟ้าแผ่นประมาณ 5000 Ω /sheet ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยเซลล์ทั้งสองชนิดนี้จะมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานประมาณ 19 - 23%



รูปที่ 2.15 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Passivated emitter and rear totally diffused cell (PERT)

(Green, 2015)



รูปที่ 2.16 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Passivated emitter and rear floating junction cell (PERF)

(Green, 2015)

บทที่ 3

การศึกษาการสร้างและวิเคราะห์ผลของชั้นรอยต่อ ชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกและ ฉนวนไฟฟ้าสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

3.1 การสร้างชั้นฟิล์มสารเจือโบรอน

3.1.1 การเตรียมสารละลายโบรอนสำหรับการแพร่สารเจือบริเวณ p⁺-Si

การศึกษานี้ได้ใช้สารละลายโบรอนเป็นแหล่งของสารเจือโบรอนจากการเคลือบผิวแผ่นฐานซิลิคอนด้วยวิธีประทับลาย จากนั้นทำการแพร่สารเจือโบรอนลงในแผ่นฐานซิลิคอนชนิด p-Si ด้วยความร้อน เกิดเป็นบริเวณ p⁺-Si ขึ้น

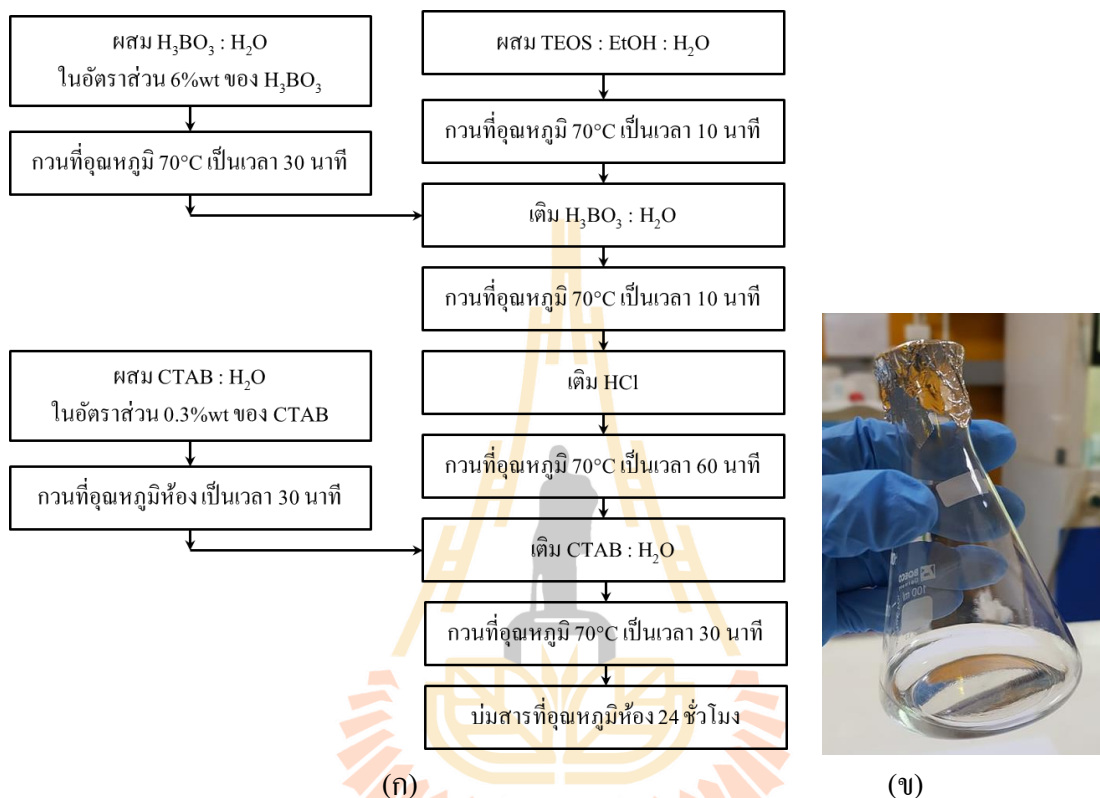
สารละลายโบรอนประกอบด้วย Tetraethyl orthosilicate ($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$, TEOS), Ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, EtOH), Deionized water (H_2O), Hydrochloric acid (HCl), Boric acid (H_3BO_3) และ Cetyltrimethyl ammonium bromide ($\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{BrN}$, CTAB) โดยปริมาณสารขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่กำหนดดังตารางที่ 3.1 การเตรียมเริ่มต้นจากการผสมสารละลาย $\text{H}_3\text{BO}_3 : \text{H}_2\text{O}$ ใช้อัตราส่วน 6 wt% ของโบรอน ใส่ลงในขวดทดลองรูปชมพู่ที่มีฝาปิดและกวนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 30 นาที และผสมสารละลาย CTAB : H_2O ความเข้มข้น 0.1M ของ CTAB ใส่ลงในขวดทดลองรูปชมพู่ที่มีฝาปิดและกวนที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 3.1 ปริมาณส่วนประกอบของสารละลายโบรอน

%Atomic of boron (at%)	ปริมาณสาร (ml)					
	TEOS	EtOH	H_2O	$\text{H}_3\text{BO}_3 : \text{H}_2\text{O}$	HCl	CTAB : H_2O
0.100	5.00	1.50	10.00	3.556	0.005	1.651
0.125				4.708		1.746
0.150				6.005		1.853
0.300				19.295		2.947

การเตรียมสารละลายโบรอน แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยเริ่มต้นจากการผสมสารละลาย TEOS : EtOH : H_2O ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีฝาปิดและกวนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 10 นาที เติม

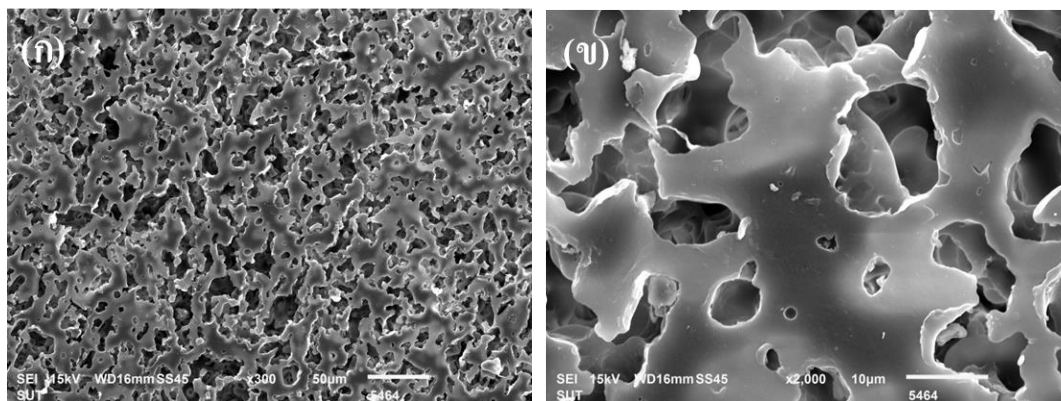
สารละลาย $H_3BO_3 : H_2O$ ลงไปอย่างช้า ๆ กวนที่อุณหภูมิ $70^\circ C$ เป็นเวลา 10 นาที หยด HCl ลงในสารละลาย กวนที่อุณหภูมิ $70^\circ C$ เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นเติมสารละลาย CTAB : H_2O ลงในสารละลาย กวนที่อุณหภูมิ $70^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที และทำการบ่มสารที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง จะได้สารละลายโบรอนสำหรับสร้างชั้นฟิล์มสารเจือโบรอน



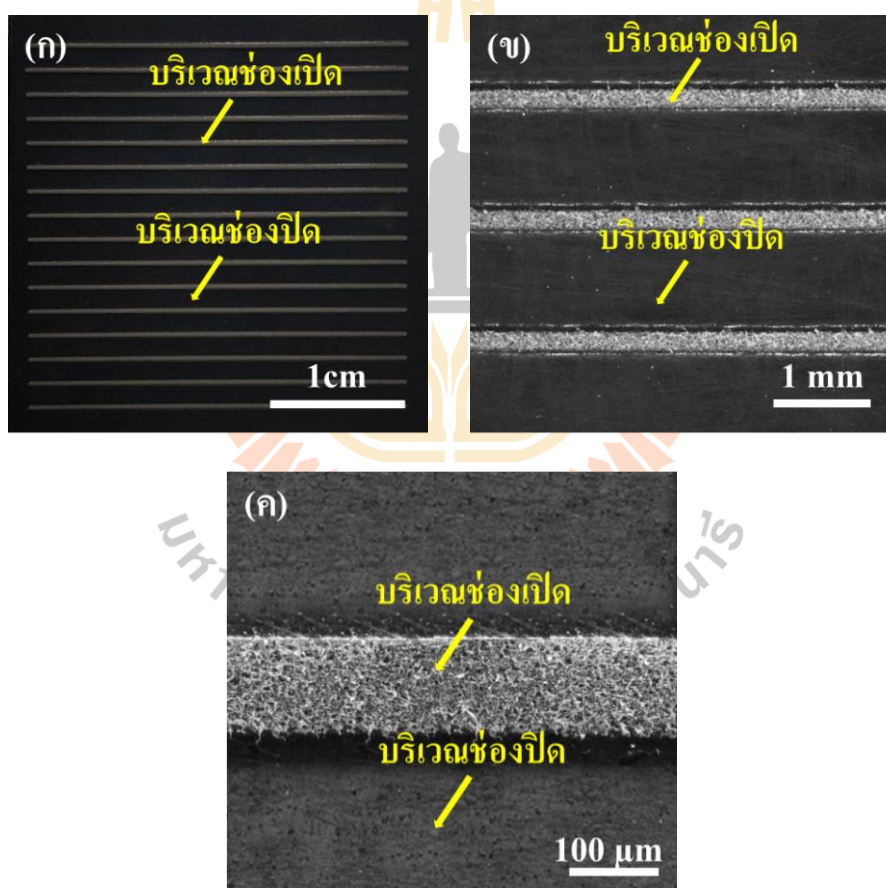
รูปที่ 3.1 (ก) ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโบรอนและ (ข) ลักษณะของสารละลายโบรอน

3.1.2 การสร้างลวดลายฟิล์มสารเจือโบรอนด้วยวิธีประทับลาย (Stamp)

เทคนิคการประทับลายได้เลือกใช้ Flash foam ที่เป็นวัสดุพอลิเมอร์ไวแสงชนิดหนึ่ง เมื่อมีแสงแฟลชส่องผ่านจะเกิดปฏิกิริยาทำให้พอลิเมอร์ละลายเชื่อมต่อกัน เกิดเป็นลวดลายของแผ่น Flash foam ตามแบบลวดลายของหน้ากากขึ้น ซึ่งแผ่น Flash foam มีลักษณะที่เป็นรูพรุนที่สามารถดูดซับสารละลาย เพื่อใช้สำหรับการประทับลายของสารละลายโบรอนได้ แสดงพื้นผิวของ Flash foam ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 พื้นผิวของ Flash foam (ก) ที่กำลังขยาย 300 เท่าและ (ข) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



รูปที่ 3.3 (ก) ลักษณะของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบน Flash foam ภายหลังจากการแฟลชแสง (ข) ลักษณะพื้นผิวของบริเวณช่องเปิดและช่องปิดของ Flash foam ที่กำลังขยาย 10 เท่าและ (ค) ลักษณะพื้นผิวของบริเวณช่องเปิดและช่องปิดของ Flash foam ที่กำลังขยาย 50 เท่า

โดยการสร้าง Flash foam ประทับลายได้ใช้เครื่อง Flash Stamp รุ่น JL-V เริ่มจากการออกแบบลวดลายหน้ากากที่บดแสงป้องกันแสงแฟลชตามที่ต้องการ จากนั้นนำ Flash foam และแบบลวดลายหน้ากากที่เตรียมไว้เข้าเครื่อง Flash Stamp แสงแฟลชจะทำปฏิกิริยากับ Flash foam ซึ่งจะได้ลวดลายเป็นลักษณะบริเวณช่องเปิดและช่องปิดตามที่ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.3

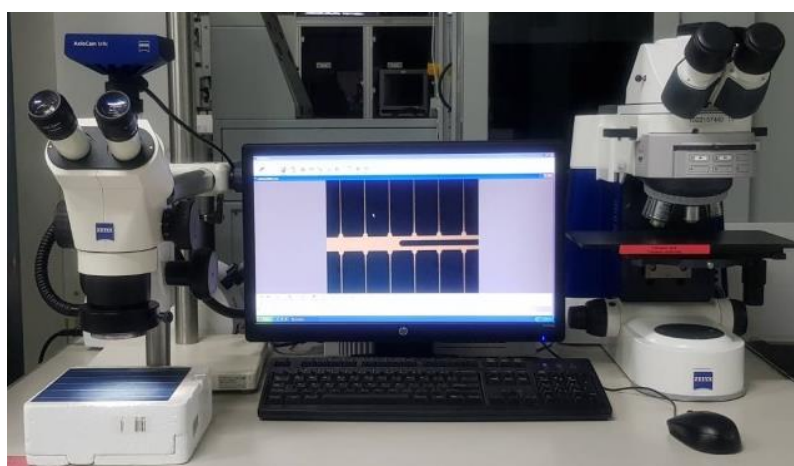
ในการศึกษานี้ได้พิจารณารูปแบบลวดลายช่องเปิดของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกที่ด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์ และค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิดที่แพร่สารเจือที่เข้มข้น (p^+ -Si) กับระยะห่างระหว่างช่องเปิดที่มีผลต่ออัตราการรวมตัวใหม่ที่มีผิว Katsu, T และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2002) ได้ออกแบบพื้นที่ช่องเปิดที่แพร่สารเจือที่เข้มข้นกับระยะห่างระหว่างช่องเปิดให้มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (Aperture ratio) อยู่ระหว่าง 0.25 - 30% พบว่าให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการกำหนดสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดระหว่าง 5 - 20% และเลือกใช้ลวดลายแบบลายเส้นขนาด 250 μm ที่มีลักษณะเดียวกันกับกรณีการผลิตในระดับอุตสาหกรรมที่ใช้เลเซอร์ในการเปิดช่องชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริก

วิธีประทับลาย (Stamp) เป็นวิธีที่ผู้วิจัยเลือกใช้เพื่อสร้างลวดลายฟิล์มสารเจือโบรอน โดยนำสารละลายโบรอนที่เตรียมไว้หยดลงบนแผ่น Flash foam สำหรับการประทับลาย และทำการกดแผ่น Flash foam ลงบนแผ่นฐานซิลิคอนที่เตรียมไว้ด้วยเครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้นเองในห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และนำชิ้นงานที่ได้เข้ากระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 200°C เพื่อให้ EtOH ระเหยออกไปและทำให้ฟิล์มยึดเกาะกับแผ่นฐานซิลิคอนได้ดี



รูปที่ 3.4 เครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติ

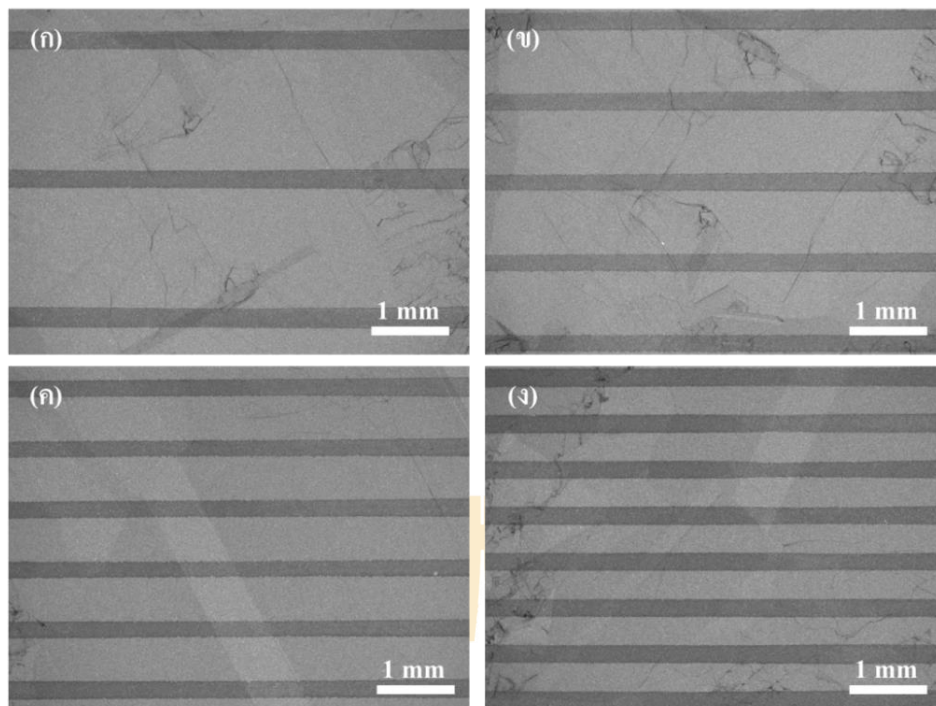
ขนาดลวดลายฟิล์มสารเจือโบรอนวัดด้วยกล้อง Light microscope ยี่ห้อ ZEISS รุ่น Axioscope A1 ที่บริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งจะได้ลวดลายช่องเปิดของ Flash foam ตามที่ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยจากผลการวัดขนาดลวดลายฟิล์มสารเจือโบรอนทั้งหมด 5 ครั้งและนำมาเฉลี่ย พบว่าลวดลายที่ได้จากการประทับลายสารละลายโบรอนมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2% เมื่อเทียบกับลวดลายที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Layout ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการสร้างลวดลายของฟิล์มสารเจือโบรอนในขนาดระดับ 100 ไมโครเมตร สามารถใช้วิธีการประทับลายจาก Flash foam ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.5 เครื่อง Light microscope รุ่น Axioscope A1

ตารางที่ 3.2 ผลการวัดขนาดลวดลายฟิล์มสารเจือโบรอน

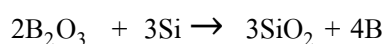
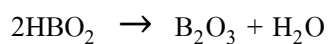
สัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (%)	ช่องเปิดจากการออกแบบ (μm)	ลวดลายฟิล์มสารเจือโบรอนหลังการประทับลาย (μm)	ความคลาดเคลื่อน (%)
5	250	254.09	1.63
10		253.34	1.34
15		252.83	1.13
20		253.41	1.36



รูปที่ 3.6 ลวดลายฟิล์มสารเจือโบรอนขนาด 250 μm บนแผ่นฐานซิลิคอนจากการประทับลาย โดยมีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (ก) 5% (ข) 10% (ค) 15% และ (ง) 20%

3.1.3 การแพร่สารเจือโบรอนด้วยความร้อน (Thermal Diffusion)

กระบวนการแพร่ของสารเจือโบรอนด้วยสารละลาย H_3BO_3 เข้าสู่แผ่นฐานซิลิคอน เป็นไปตามสมการทางเคมี ดังนี้



เริ่มต้นจากกระบวนการ Dehydration ของ Boric acid (H_3BO_3) เปลี่ยนเป็น Metaboric acid (HBO_2) ที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 130°C จากนั้นเกิดกระบวนการ Dehydration ของ HBO_2 เปลี่ยนเป็น Anhydrous boric oxide (B_2O_3) ที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 250°C และที่อุณหภูมิที่สูง

กว่า 350°C สารเจือจะอยู่ในรูปของ B_2O_3 ทั้งหมด จากนั้น B_2O_3 จะทำปฏิกิริยากับซิลิคอน (Si) เกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และโบรอน (B) โดยจะเกิดการแพร่ของสารเจือโบรอนเข้าสู่ซิลิคอนที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 1000°C

การศึกษานี้ได้สร้างฟิล์มสารเจือโบรอนและทำการแพร่ด้วยความร้อนสูง (Thermal diffusion) ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ (N_2) ที่อัตราการไหลเท่ากับ 100 sccm ที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ รายละเอียดแสดงในตารางที่ 3.3 โดยภายหลังจากการแพร่จะเกิดฟิล์มโบโรซิลิเกต (Borosilicate glass, BSG) ที่ผิวด้านหน้าและด้านหลัง การกำจัดฟิล์ม BSG หลังการแพร่ทำได้โดยแช่ในสารละลาย Hydrofluoric acid (HF) 10% เป็นเวลา 6 นาที ล้างด้วยน้ำ Deionized จากนั้นเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลาในการแพร่สารเจือโบรอน

อุณหภูมิในการแพร่ (°C)	เวลาในการแพร่ (นาที)
1000	60
1050	
1100	
1150	15
	30
	60

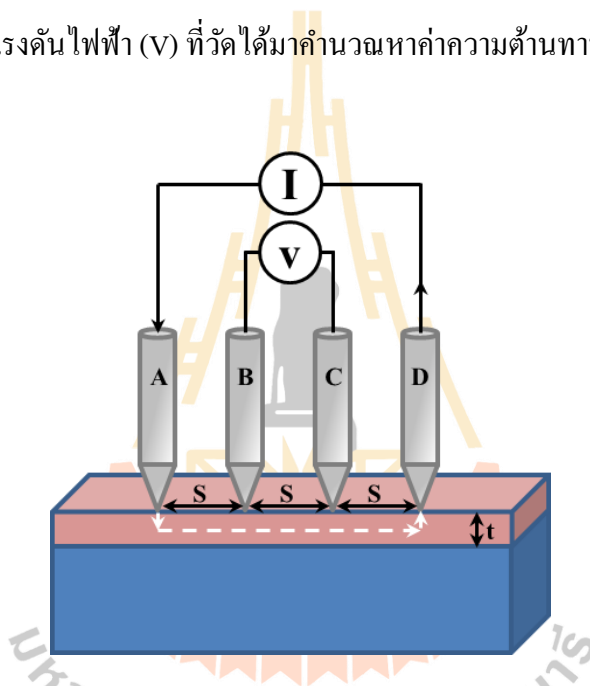
3.1.4 ความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของบริเวณ p^+ -Si



รูปที่ 3.7 เครื่องมือวัดความต้านทานแบบสี่หัวเข็ม (4-point probes)

หลังจากการทำการแพร่ได้นำชิ้นงานไปวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่น (Sheet Resistance, R_{sheet}) ด้วยเครื่องมือวัดความต้านทานแบบสี่หัวเข็ม (4-point probes) ด้วยเครื่อง 4-point probe รุ่น Jandel cylindrical four point probe, เครื่องวัด Electrometer ยี่ห้อ KEITHLEY รุ่น 2400 และเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากหัวโพรบ โดยเครื่อง Digital multimeters ยี่ห้อ UNI-T รุ่น UT39A ที่ห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 3.7

เครื่องมือวัดความต้านทานแบบสี่หัวเข็ม (4-point probe) ประกอบด้วยเข็มโลหะปลายแหลมจำนวน 4 เข็มที่มีระยะห่างระหว่างหัวเข็มเป็นระยะ s เท่า ๆ กัน ซึ่งมีระยะห่าง 0.635 mm ในระนาบเดียวกัน โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าลงที่หัวเข็ม A ผ่านชั้นฟิล์มไปยังเข็ม D ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมและวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่เข็ม B และ C ดังแสดงในรูปที่ 3.8 จากนั้นนำค่ากระแสไฟฟ้า (I) และแรงดันไฟฟ้า (V) ที่วัดได้มาคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่น



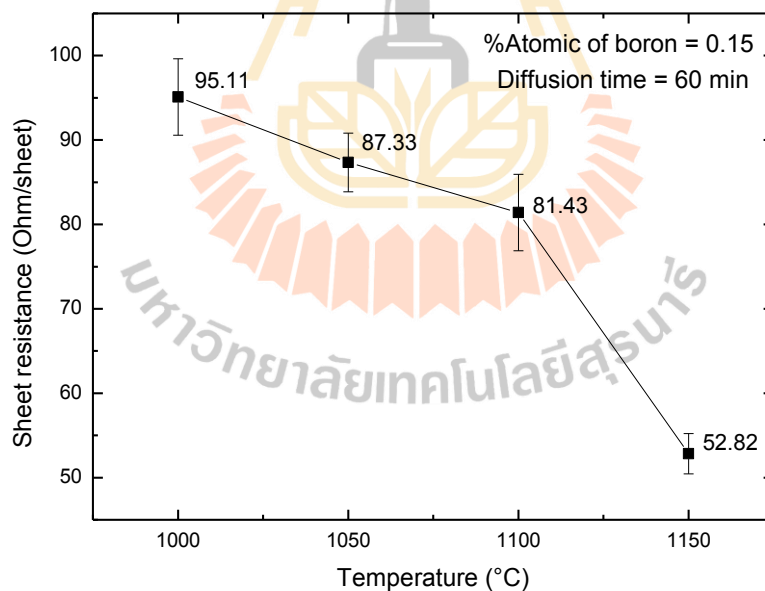
รูปที่ 3.8 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นด้วย 4-point probes

โดยในการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น p^+ -Si พบว่าความหนาของบริเวณ p^+ -Si (t) น้อยกว่าระยะห่างระหว่างหัวเข็ม (s) ดังนั้นค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นสามารถหาได้จากสมการที่ (3.1)

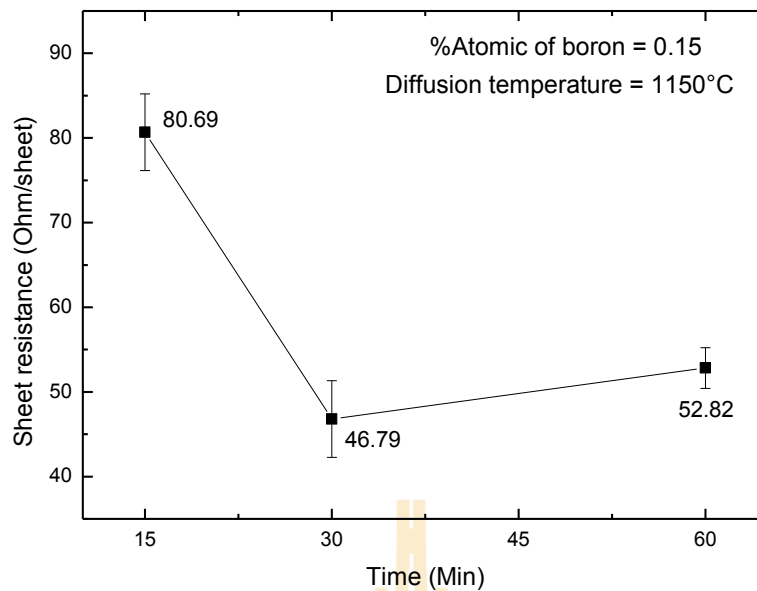
$$R_{\text{sheet}} = \frac{\rho}{t} = \frac{\pi V}{\ln 2 I} = 4.532 \frac{V}{I} \quad (3.1)$$

โดยที่ R_{sheet}	คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่น มีหน่วยเป็น Ω/Sheet
ρ	คือ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น $\Omega\cdot\text{cm}$
t	คือ ความหนาของชั้นฟิล์ม มีหน่วยเป็น μm
V	คือ แรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็น mV
I	คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น mA

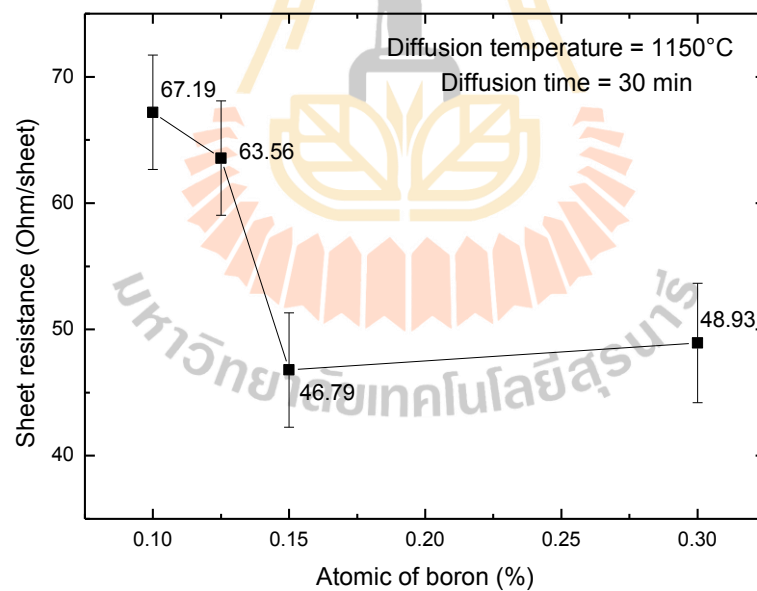
การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นในงานวิจัยนี้ได้สร้างลายเส้นบริเวณ $p^+\text{-Si}$ ขนาด 3 mm ภายใต้เงื่อนไขการแพร่ที่อุณหภูมิต่าง ๆ สำหรับวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นด้วยเครื่อง 4-point probes เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขของความเข้มข้นสารเจือ อุณหภูมิและเวลาในการแพร่สารเจือที่เหมาะสม โดยเริ่มต้นกำหนดใช้สารละลายโบรอนที่มีเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอน 0.15% เพื่อหาเงื่อนไขของอุณหภูมิการแพร่ที่เหมาะสม แสดงผลความต้านทานไฟฟ้าแผ่นดังรูปที่ 3.9 โดยกำหนดช่วงอุณหภูมิ 1000 - 1150°C เป็นเวลา 60 นาที พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการแพร่เพิ่มขึ้น จะมีความต้านทานไฟฟ้าแผ่นที่ต่ำลง จากการที่สารเจือสามารถแพร่เข้าไปในแผ่นซิลิคอนได้มากขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 1150°C มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นเป็น 52.82 Ω/sheet ซึ่งมีค่าที่ต่ำที่สุด



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าแผ่นและอุณหภูมิการแพร่ต่าง ๆ ที่ปริมาณโบรอนเท่ากับ 0.15 at% เป็นเวลา 60 นาที



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าแผ่นและเวลาการแพร่ต่าง ๆ เมื่อทำการแพร่สารละลายโบรอนปริมาณ 0.15 at% ที่อุณหภูมิ 1150°C



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าแผ่นและเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอนในสารละลายโบรอน เมื่อทำการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ 1150°C เป็นเวลา 30 นาที

จากนั้นทำการหาเงื่อนไขของเวลาการแพร่ที่เหมาะสม โดยกำหนดใช้สารละลายโบรอนปริมาณเท่ากับ 0.15 at% และกำหนดอุณหภูมิเป็น 1150°C ในเงื่อนไขของเวลาตั้งแต่ 15 - 60 นาที ผลความต้านทานไฟฟ้าแผ่นแสดงดังรูปที่ 3.10 ซึ่งพบว่าเมื่อเวลาในการแพร่เพิ่มขึ้น ความต้านทานไฟฟ้าแผ่นจะมีค่าที่ต่ำลง โดยที่เวลา 30 นาทีนั้นได้ให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นต่ำที่สุดเท่ากับ 46.79 Ω /sheet

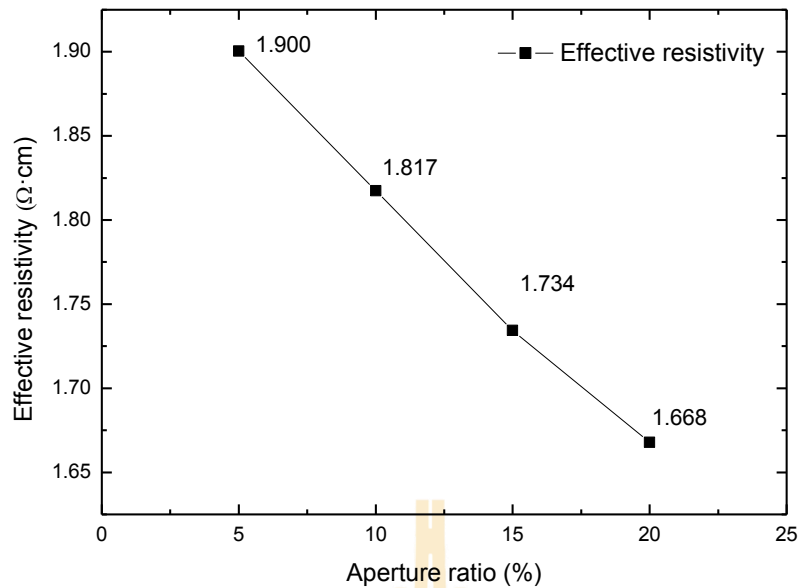
จากนั้นทำการศึกษาหาเงื่อนไขเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอนในสารละลายโบรอนที่เหมาะสมโดยกำหนดอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 1150°C เป็นเวลา 30 นาที แสดงผลความต้านทานไฟฟ้าแผ่นดังรูปที่ 3.11 พบว่าปริมาณสารเจือโบรอนส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้าแผ่น ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณ H_3BO_3 ขึ้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นมีแนวโน้มลดลง โดยสารละลายโบรอนปริมาณเท่ากับ 0.15 at% ให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นต่ำที่สุดเป็น 46.79 Ω /sheet

ดังนั้นการศึกษากการสร้างบริเวณ p^+ -Si จึงได้เลือกใช้สารละลายโบรอนปริมาณ 0.15 at% ที่อุณหภูมิการแพร่เท่ากับ 1150°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ได้ความต้านทานไฟฟ้าแผ่นที่ต่ำที่สุดเป็น 46.79 Ω /sheet แต่เมื่อทำการประทับลายเส้นขนาด 250 μ m จะไม่สามารถวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของลวดลายได้ด้วยเครื่อง 4-point probes เนื่องจากลวดลายมีขนาดเล็กกว่าหัวเข็ม จึงใช้สมการ Resistivity - mixture rule ในการประมาณความต้านทานจำเพาะของบริเวณ p^+ -Si ดังสมการที่ (3.2)

$$\rho_{\text{eff}} = \frac{(\rho_{p\text{-Si}})(L_{p\text{-Si}})}{L} + \frac{(\rho_{p^+\text{-Si}})(L_{p^+\text{-Si}})}{L} \quad (3.2)$$

โดยที่ ρ_{eff} คือ ความต้านทานจำเพาะ มีหน่วยเป็น Ω -cm
 $\rho_{p\text{-Si}}, \rho_{p^+\text{-Si}}$ คือ ความต้านทานจำเพาะบริเวณ p-Si และบริเวณ p^+ -Si มีหน่วยเป็น Ω -cm
 $L_{p\text{-Si}}, L_{p^+\text{-Si}}$ คือ ความยาวรวมของบริเวณ p-Si และบริเวณ p^+ -Si มีหน่วยเป็น cm
 L คือ ความยาวรวมของชิ้นงาน $L = L_{p\text{-Si}} + L_{p^+\text{-Si}}$ มีหน่วยเป็น cm
 กรณีนี้ใช้ $L = 3$ cm

จากรูปที่ 3.12 แสดงผลการคำนวณความต้านทานจำเพาะของแผ่นซิลิคอนที่มีบริเวณ p^+ -Si ในสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดมีค่าตั้งแต่ 5 - 20% พบว่าการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดจะมีผลต่อการลดลงของความต้านทานจำเพาะของแผ่นฐานซิลิคอน เนื่องจากบริเวณ p^+ -Si ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานจำเพาะของแผ่นฐานซิลิคอนลดลง



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานจำเพาะและสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของบริเวณ p⁺-Si

3.2 การสร้างรอยต่อ p/n-Si ด้วยวิธี Spin on dopant (SOD)

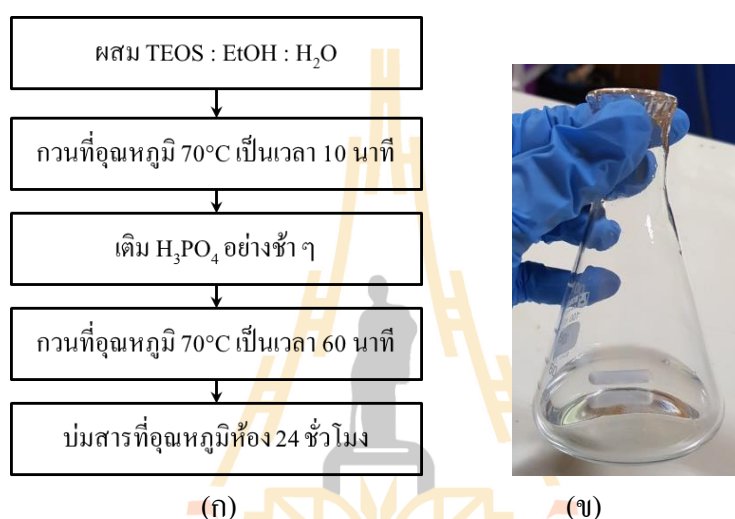
3.2.1 การเตรียมสารละลายฟอสฟอรัสเพื่อเป็นสารเจือในการสร้างชั้น n-Si

การศึกษานี้ได้ใช้สารละลายฟอสฟอรัสเป็นแหล่งของสารเจือเพื่อสร้างชั้น n-Si บนแผ่นฐาน p-Si จากวิธี Spin On Dopant (SOD) ด้วยการใช้สารละลายฟอสฟอรัสเคลือบผิวแผ่นฐานซิลิคอนด้วยวิธีหมุนเหวี่ยง และให้ความร้อนสูงจนเกิดกลไกการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสลงบนแผ่นฐาน p-Si และเกิดเป็นรอยต่อ p/n-Si ขึ้น

ตารางที่ 3.4 ปริมาณส่วนประกอบของสารละลายฟอสฟอรัส

%Atomic of Phosphorous (at%)	ปริมาณสาร (ml)			
	TEOS	EtOH	H ₂ O	H ₃ PO ₄
0.358	5.00	1.50	10.00	0.667
0.363				0.676
0.367				0.685
0.372				0.694
0.377				0.704
0.382				0.714

สารละลายฟอสฟอรัสที่ใช้ในกระบวนการ SOD ประกอบด้วย Tetraethyl orthosilicate ($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$, TEOS), Ethanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, EtOH), Deionized water (H_2O) และ Phosphoric acid (H_3PO_4) โดยปริมาณสารขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่กำหนดดังตารางที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายฟอสฟอรัส แสดงดังรูปที่ 3.13 เริ่มต้นจากการผสมสารละลาย TEOS : EtOH : H_2O ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีฝาปิดและกวนที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเติม H_3PO_4 ลงไปอย่างช้า ๆ กวนต่อที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 60 นาที และทำการบ่มสารที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง จะได้สารละลายฟอสฟอรัสสำหรับกระบวนการสร้างรอยต่อ p/n-Si ด้วยวิธี SOD



รูปที่ 3.13 (ก) ขั้นตอนการเตรียมสารละลายฟอสฟอรัสและ (ข) ลักษณะของสารละลายฟอสฟอรัส

3.2.2 การเคลือบฟิล์มสารเจือฟอสฟอรัสด้วยวิธีหมุนเหวี่ยง (Spin coating)

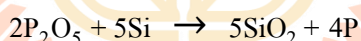
การเคลือบฟิล์มด้วยวิธีหมุนเหวี่ยงเป็นวิธีการที่ง่าย สามารถสร้างฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอและบางในระดับไมโครเมตรได้ การศึกษานี้ได้ใช้เครื่องเคลือบสารแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coater) ยี่ห้อ Laurell รุ่น WS-400B-8NPP/LITE ที่ห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยเริ่มต้นจากการทำความสะอาดแผ่นฐานซิลิคอนด้วยวิธี Radio Corporation of America (RCA) จากนั้นนำแผ่นฐานไปเคลือบสารละลายฟอสฟอรัสด้วยวิธีหมุนเหวี่ยง 2 ขั้นตอน โดยขั้นแรกใช้ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที นาน 10 วินาที และขั้นที่สองใช้ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที นาน 30 วินาที หลังจากนั้นนำแผ่นฐานซิลิคอนที่ถูกเคลือบด้วยสารละลายฟอสฟอรัสไปอบที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 30 นาที โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ $1^\circ\text{C}/\text{min}$ จะได้ฟิล์มสารเจือฟอสฟอรัส สำหรับสร้างชั้น n-Si



รูปที่ 3.14 เครื่อง Spin coater รุ่น WS-400B-8NPP/LITE

3.2.3 การแพร่สารเจือฟอสฟอรัสด้วยความร้อน (Thermal Diffusion)

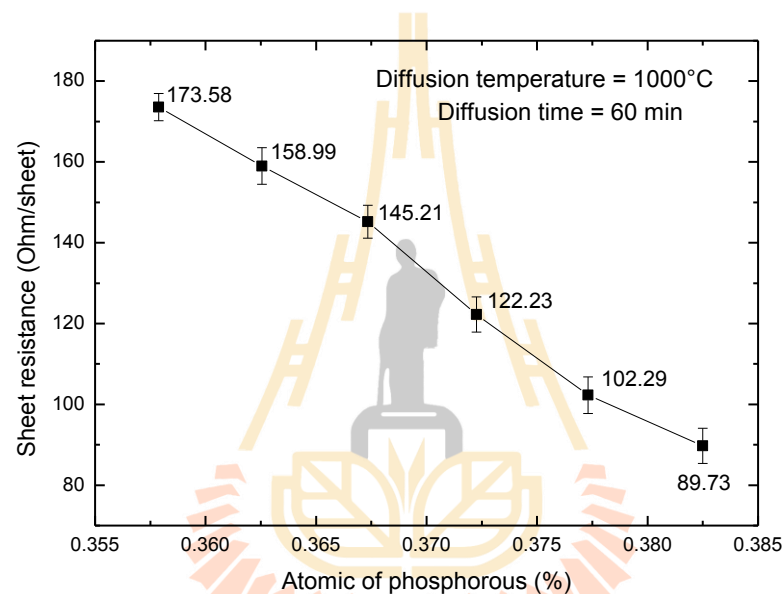
เมื่อได้ฟิล์มสารเจือฟอสฟอรัสจากกระบวนการเคลือบแล้ว ชิ้นงานจะผ่านกระบวนการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิสูง และพบว่า H_3PO_4 จะเปลี่ยนรูปเป็น P_2O_5 และเกิดการแพร่ของอะตอมฟอสฟอรัสกระจายตัวลึกกลงไปในแผ่นซิลิคอน เป็นไปตามสมการเคมีดังต่อไปนี้



การศึกษานี้ใช้อุณหภูมิการแพร่ที่ 1000°C เป็นเวลา 60 นาที เพื่อให้เกิดรอยต่อ p/n-Si โดยใช้เตาอุณหภูมิสูง ตั้งค่าให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ $20^\circ\text{C}/\text{min}$ ภายใต้ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่มีอัตราการไหลเท่ากับ 100 sccm ภายหลังจากการแพร่จะเกิดฟิล์มฟอสโฟซิลิเกต (Phosphosilicate glass, PSG) เพิ่มขึ้นที่ผิวด้านบน ในงานวิจัยนี้ได้นำฟิล์ม PSG ที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการมาใช้ประโยชน์เป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสง และฟิล์มโบโรซิลิเกต (Borosilicate glass, BSG) ที่เกิดขึ้นเองที่ด้านหลังได้นำมาใช้ประโยชน์เป็นชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF แต่ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับอุตสาหกรรม ชั้น PSG และ BSG จะถูกกำจัดออก

3.2.4 ความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น n-Si ที่สร้างได้จากวิธี SOD

หลังจากการทำกรแพร่ได้นำชิ้นงานไปวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่น (Sheet Resistance, R_{sheet}) ด้วยเครื่องมือวัดความต้านทานแบบสี่หัวเข็ม (4-point probes) ที่ห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จากนั้นทำการหาเงื่อนไขเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัสในสารละลายฟอสฟอรัสที่เหมาะสมโดยกำหนดอุณหภูมิเป็น 1000°C เป็นเวลา 60 นาที แสดงผลความต้านทานไฟฟ้าแผ่นดังรูปที่ 3.15 พบว่าปริมาณสาร H_3PO_4 ส่งผลต่อความต้านทานไฟฟ้าแผ่นที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณสาร H_3PO_4 ขึ้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความเข้มข้นของอะตอมฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น

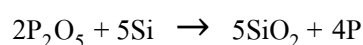


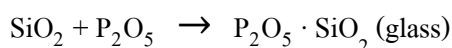
รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าแผ่นและเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัสในสารละลายฟอสฟอรัส เมื่อทำการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 60 นาที

3.3 การสร้างชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ

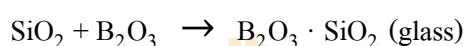
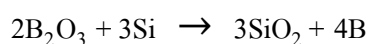
3.3.1 การสร้างชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกจากฟิล์ม PSG และ BSG

ฟิล์มฟอสโฟซิลิเกต (Phosphosilicate glass, PSG) เป็นฟิล์มบางที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของซิลิคอนระหว่างการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิสูง เป็นส่วนผสมระหว่าง P_2O_5 และ SiO_2 มีปฏิกิริยาเคมีดังสมการ



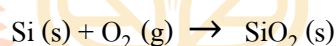


ฟิล์มโบโรซิลิเกต (Borosilicate glass, BSG) เป็นฟิล์มบางที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของซิลิคอนระหว่างการแพร่สารเจือโบรอนที่อุณหภูมิสูง เป็นส่วนผสมระหว่าง B_2O_3 และ SiO_2 มีปฏิกิริยาเคมีดังสมการ



3.3.2 การสร้างชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกจากฟิล์ม SiO_2

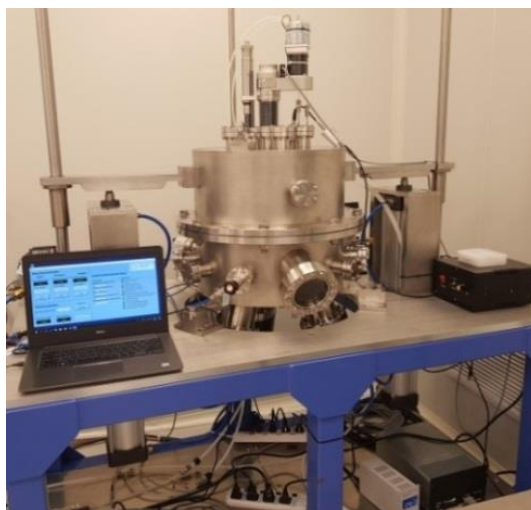
ในการศึกษานี้ได้สร้างฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ด้วยวิธี Dry oxidation โดยนำแผ่นฐานซิลิคอนที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูงที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเท่ากับ $20^\circ\text{C}/\text{min}$ และมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ในเตาเผาเท่ากับ 400 sccm ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 120 นาที เพื่อให้ได้ความหนาประมาณ 100 nm มีปฏิกิริยาเคมีดังสมการ



3.3.3 การสร้างชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกจากฟิล์ม Si_3N_4

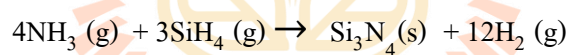
ในการศึกษานี้ได้สร้างฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) ด้วย 2 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการสปัตเตอร์ริง (Sputtering) และกระบวนการ Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) เพื่อเปรียบเทียบหาคุณสมบัติทางแสงที่เหมาะสม

ฟิล์มซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4 sputtering) ในงานวิจัยนี้สร้างด้วยเครื่องสปัตเตอร์ริงระบบ AC ความถี่วิทยุ (RF magnetron sputtering) ที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ใช้ Si_3N_4 target ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.2 มิลลิเมตร หนา 3.18 มิลลิเมตร และมีความบริสุทธิ์ 99.5% ขณะทำการสปัตเตอร์ริงใช้กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ ความดันเริ่มต้น (Base pressure) 4.97×10^{-6} torr ความดันใช้งาน (Operate pressure) 5.64×10^{-3} torr และเวลาในการสปัตเตอร์ริง 2 ชั่วโมง 45 นาที ภายใต้ก๊าซอาร์กอน (Ar) ที่มีอัตราการไหลเท่ากับ $5 \text{ mL}/\text{min}$



รูปที่ 3.16 เครื่องสเป็คเตอรืงระบบ AC ความถี่วิทยุ (RF magnetron sputtering)

ฟิล์มซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4 PECVD) สร้างด้วยกระบวนการ PECVD จากเครื่องยี่ห้อ Centrotherm ที่บริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) โดยใช้ความดัน 1500 mTorr และอุณหภูมิ 450°C ด้วยส่วนผสมของก๊าซ Ammonia (NH_3) และ Silane (SiH_4) ในอัตราส่วน NH_3/SiH_4 เท่ากับ 9.40 เป็นเวลา 10 - 12 นาที เพื่อให้ได้ความหนาเท่ากับ 85 nm มีปฏิกิริยาเคมีดังสมการ



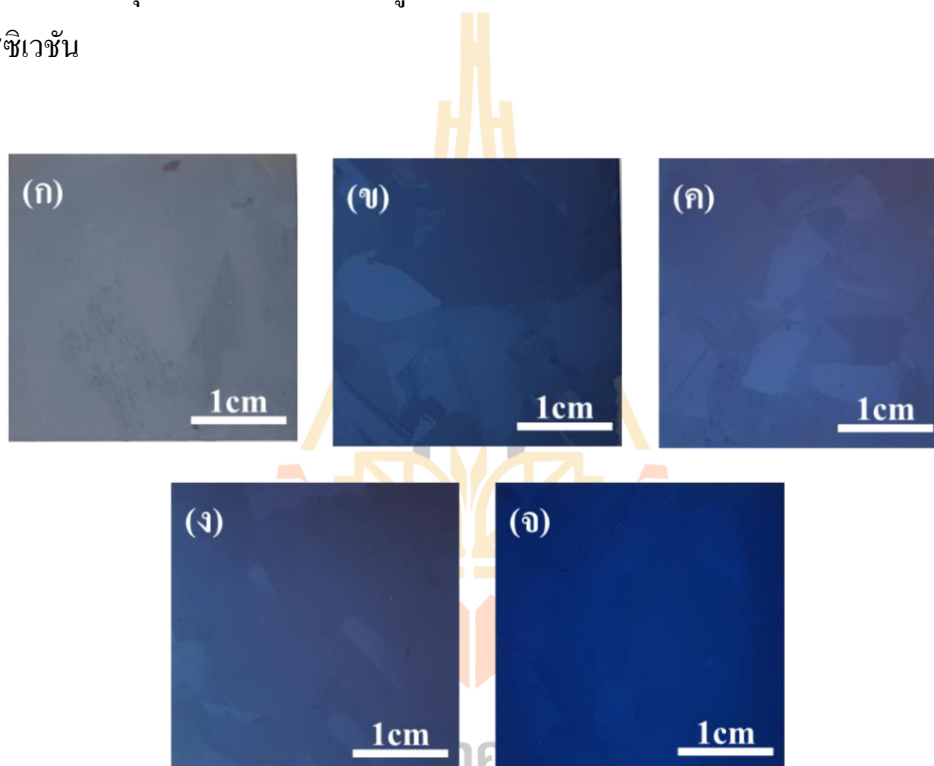
3.3.4 ความหนาและดัชนีหักเหแสงของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริก



รูปที่ 3.17 เครื่อง Ellipsometer รุ่น SE 400advanced

ความหนาและดัชนีหักเหแสงของชั้นฟิล์มบาง วัดค่าโดยใช้เทคนิค Ellipsometry โดยใช้เครื่อง Ellipsometer รุ่น SE 400advanced ที่บริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) ดังแสดงในรูปที่ 3.17 วิธีนี้ใช้หลักการของการเปลี่ยนแปลงของโพลาไรเซชันของแสงที่ทราบความยาวคลื่นที่สะท้อนจากวัสดุเป้าหมาย เมื่อแสงโพลาไรซ์ (Polarized light) สะท้อนจากพื้นผิววัสดุเป้าหมาย ทำให้เฟส (Phase) และแอมพลิจูด (Amplitude) ของแสงเปลี่ยนไปตามค่าคงที่ทางแสง (Optical constants) ของวัสดุเป้าหมาย

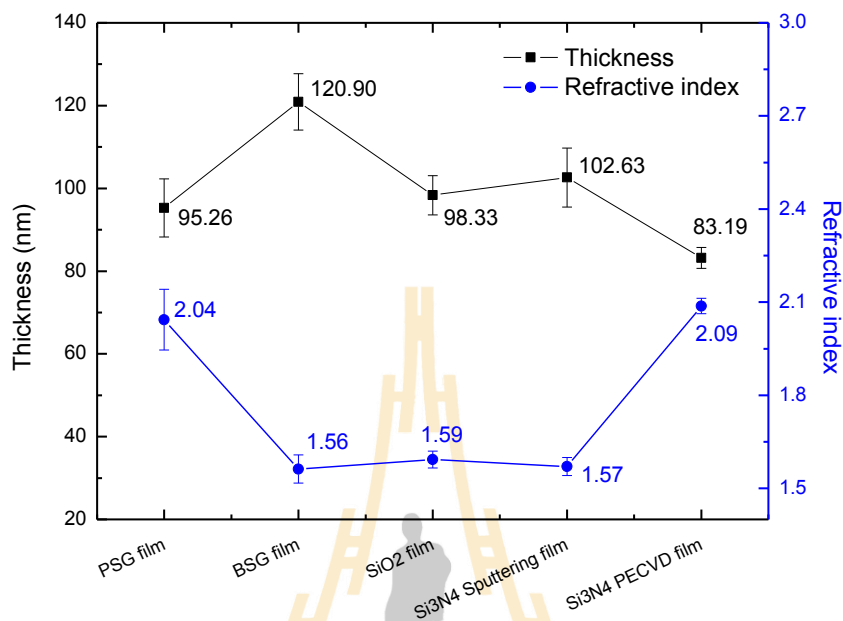
จากการสร้างชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกด้วยวิธีต่าง ๆ จะได้ฟิล์มที่มีสีน้ำเงินที่ความเข้มต่างกัน แสดงดังรูปที่ 3.18 ซึ่งมีความหนาและดัชนีหักเหแสงของฟิล์มชนิดต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.19 โดยฟิล์มที่ได้ทุกชนิดจะมีความหนายู่ระหว่าง 80 - 120 nm ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับเป็นชั้นพาสซีเวชัน



รูปที่ 3.18 ชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริก (ก) ฟิล์ม PSG (ข) ฟิล์ม BSG (ค) ฟิล์ม SiO_2 (ง) ฟิล์ม Si_3N_4 sputtering และ (จ) ฟิล์ม Si_3N_4 PECVD

จากรูปที่ 3.19 พบว่าค่าดัชนีหักเหแสงของฟิล์ม PSG และฟิล์ม Si_3N_4 PECVD มีค่า 2.04 และ 2.09 ตามลำดับ ซึ่งเหมาะสมสำหรับเป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสงด้านบนของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากมีค่าดัชนีหักเหแสงอยู่ระหว่าง 1.5 (n ของกระจก) ถึง 3.4 (n ของแผ่นซิลิคอน) ซึ่งเป็นไปตามหลักการของ Snell's law และค่าดัชนีหักเหแสงของฟิล์ม BSG ฟิล์ม SiO_2 และฟิล์ม

Si₃N₄ sputtering มีค่า 1.56, 1.59 และ 1.57 ตามลำดับ ซึ่งเหมาะสมสำหรับเป็นชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริก ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากมีค่าดัชนีหักเหที่ต่ำกว่าดัชนีหักเหของแผ่นซิลิคอนมาก ทำให้แสงเกิดการสะท้อนกลับเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ได้มากขึ้น



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและดัชนีหักเหแสงของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ

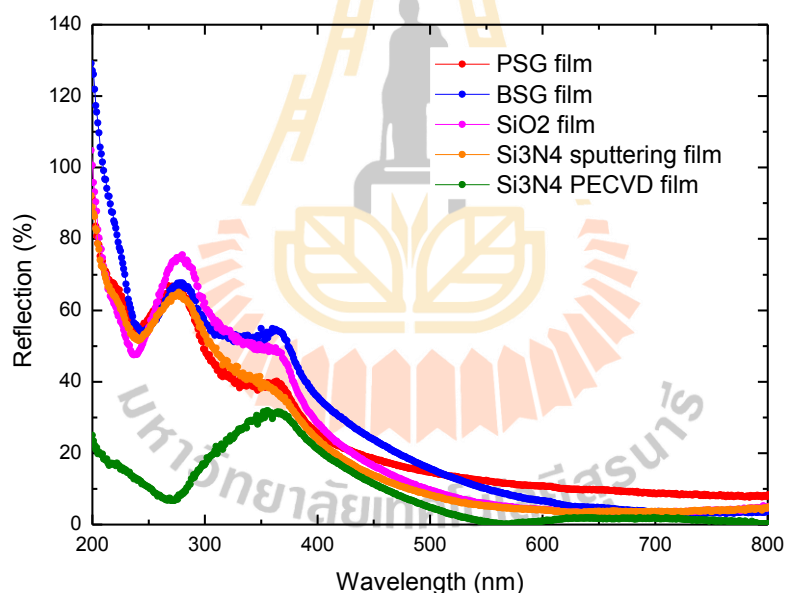
3.3.5 ค่าการสะท้อนแสงกลับที่ผิวของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริก



รูปที่ 3.20 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer (UV-Vis) รุ่น Cary 300

ค่าการสะท้อนแสงกลับของชั้นฟิล์มบางวัดด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer (UV-Vis) รุ่น Cary 300 ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 3.20 วัดในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 - 800 nm ในโหมดการทำงานแบบ Integrating sphere ซึ่งมีหลักการทำงาน โดยการตรวจวัดปริมาณแสงและความเข้มแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงสีม่วง (UV) และแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible light) ที่ถูกดูดกลืน (Absorption) ทะลุผ่าน (Transmission) และสะท้อนกลับ (Reflection) จากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

รูปที่ 3.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกลับของแสงและความยาวคลื่นของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ พบว่าฟิล์ม Si_3N_4 PECVD มีค่าการสะท้อนแสงกลับที่มีค่าที่ต่ำที่สุด เหมาะสำหรับเป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสงด้านบนของเซลล์แสงอาทิตย์ และฟิล์ม BSG มีค่าการสะท้อนแสงที่สูงที่สุด เหมาะสำหรับเป็นชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกลับของแสงและความยาวคลื่นช่วง UV-Vis ของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ

3.3.6 พันธะทางเคมีของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริก

องค์ประกอบทางโครงสร้างพันธะเคมีของชั้นฟิล์มบางวัดด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared spectrometer (FT-IR) ยี่ห้อ Bruker รุ่น Tensor 27 ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์

และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังแสดงในรูปที่ 3.22 ย่านของแสงใช้งานในช่วงเลขคลื่น (Wavenumber) $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ โดยมีความละเอียดในการสแกน 4 cm^{-1} ในโหมด Absorbance

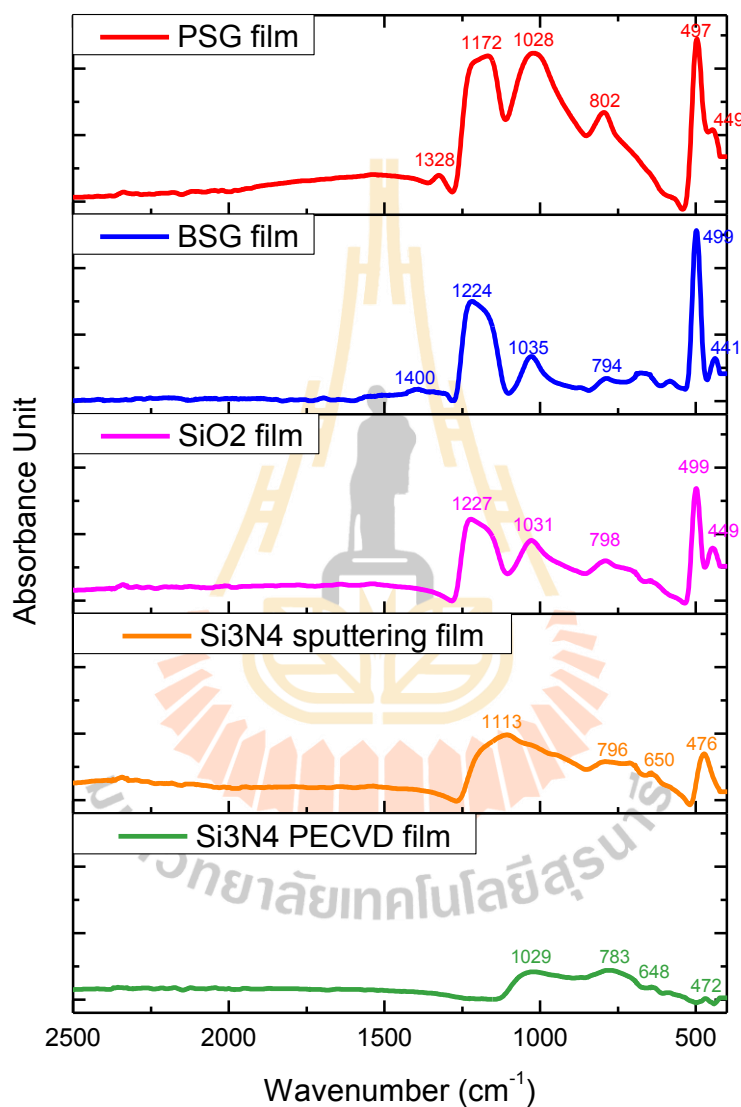


รูปที่ 3.22 เครื่อง Fourier Transform Infrared spectrometer (FT-IR) รุ่น Tensor 27

เครื่อง FT-IR เป็นเครื่องวิเคราะห์หาล่องค์ประกอบทางโครงสร้างเคมีของตัวอย่าง โดยใช้ความยาวคลื่นช่วงกลางอินฟราเรด (Middle infrared) เมื่อตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรด ทำให้พันธะเคมีในโมเลกุลที่มีความถี่ตรงกับความถี่ของการสั่น (Stretching) หรือการงอ (Bending) ของพันธะ โคvalenซ์เกิดการดูดกลืนแสง และมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ของโมเลกุล จากนั้นเครื่องมือจะประมวลผลการวัดค่าความเข้มแสงต่อความถี่หรือเลขคลื่น (Wavenumber) โดยการใช้สมการเชิงอนุพันธ์ Fourier transform แปลผลเป็นสเปกตรัม ซึ่งในแต่ละพันธะของหมู่ฟังก์ชันจะแสดงค่าความยาวคลื่นเฉพาะต่างกัน สามารถนำมาเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของสารที่มีในฐานข้อมูล เพื่อใช้ในการพิสูจน์และบ่งชี้ชนิดของตัวอย่าง

จากรูปที่ 3.23 เมื่อพิจารณาสเปกตรัมพบว่าฟิล์ม PSG ฟิล์ม BSG และฟิล์ม SiO_2 แสดงตำแหน่งพันธะที่มีแนวโน้มเดียวกัน ได้แก่ พันธะ Si-O-Si rocking mode อยู่ในช่วงเลขคลื่น $497 - 495 \text{ cm}^{-1}$ พันธะ Si-O-Si bending mode อยู่ในช่วงเลขคลื่น $784 - 802 \text{ cm}^{-1}$ พันธะ Si-O-Si on-phase stretching mode อยู่ในช่วงเลขคลื่น $1028 - 1035 \text{ cm}^{-1}$ และพันธะ Si-O-Si out-of-phase stretching mode อยู่ในช่วงเลขคลื่น $1172 - 1227 \text{ cm}^{-1}$ อีกทั้งฟิล์ม PSG จะแสดงพันธะ P-O stretching mode ที่เลขคลื่น 1328 cm^{-1} และฟิล์ม BSG จะแสดงพันธะ B-O stretching mode ที่เลขคลื่น 1400 cm^{-1}

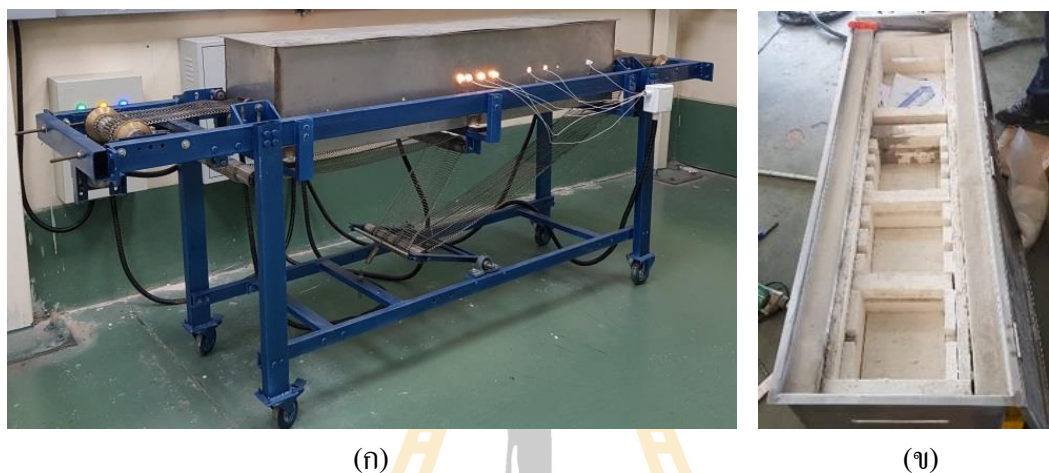
ในส่วนของฟิล์ม Si_3N_4 sputtering และฟิล์ม Si_3N_4 PECVD แสดงตำแหน่งพันธะที่มีแนวโน้มเดียวกัน ได้แก่ พันธะ Si-N symmetric stretching mode อยู่ในช่วงเลขคลื่น 472 - 476 cm^{-1} พันธะ Si-H wagging mode อยู่ในช่วงเลขคลื่น 648 - 650 cm^{-1} พันธะ N-N coupled vibration mode อยู่ในช่วงเลขคลื่น 783 - 796 cm^{-1} และพันธะ Si-O stretching mode อยู่ในช่วงเลขคลื่น 1029 - 1113 cm^{-1}



รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) กับเลขคลื่น (Wavenumber) ของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ

3.4 การสร้างขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิก (Ohmic contact)

ขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าด้านหน้าที่ได้รับแสงจะมีลวดลายกริดของโลหะเงินเพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังเป็นขั้วโลหะอะลูมิเนียมเต็มพื้นผิว เซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีจำเป็นต้องมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้ากับซิลิคอนแบบรอยสัมผัส โอห์มมิก (Ohmic contact) ที่แสดงพฤติกรรมของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในลักษณะสมมาตรและเป็นเชิงเส้นมีความชันเส้นกราฟ I-V ค่าสูง



รูปที่ 3.24 (ก) เตาเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วและ (ข) ภาพภายในของเตาเผา

กระบวนการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว (Fast firing) มีอิทธิพลต่อสมบัติต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) กระแสไฟฟ้ลัดวงจร (J_{sc}) ฟิสิกส์ (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ซึ่งในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูงจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิและเวลาของเตาเผาต้นแบบ (Fast firing furnace) กิ่งอัตโนมัติที่สร้างขึ้นภายในห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงดังรูปที่ 3.24 เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

ภายในเตาเผาประกอบด้วยห้อง 4 ห้อง โดยแต่ละห้องจะมีหลอดอินฟราเรด (IR lamp) สำหรับให้ความร้อนและเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) สำหรับวัดอุณหภูมิ โดยแต่ละห้องจะมีหน้าที่และให้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ดังนี้

ห้องที่ 1 Drying หรือการอบแห้ง เป็นกระบวนการเพื่อทำให้กาวโลหะ (Metal paste) สำหรับทำขั้วไฟฟ้าแห้ง โดยเผาไล่สารประกอบอินทรีย์และตัวทำละลายต่าง ๆ ให้ระเหยออก ซึ่งจะให้ความร้อนประมาณ $100 - 300^{\circ}\text{C}$

ห้องที่ 2 Burning โดยขั้วไฟฟ้าด้านหน้าจะเกิดการหลอมละลายของ Glass frit แทรกเข้าสู่ชั้นฟิล์ม SiN_x ไปถึงชั้น n-Si emitter และขั้วไฟฟ้าด้านหลังจะเกิดการหลอมละลายของอะลูมิเนียมและซิลิคอนที่รอยสัมผัส Al-Si เกิดเป็น Liquid phase ขึ้น ซึ่งจะใช้อุณหภูมิประมาณ 300 - 600°C

ห้องที่ 3 Firing เป็นกระบวนการให้ความร้อนประมาณ 900°C ในเวลาสั้น ๆ โดยขั้วไฟฟ้าด้านหน้าจะเกิดการหลอมละลายของเงิน (Ag) ใน Glass frit และแพร่เข้าสู่พื้นผิวของชั้น n-Si emitter และขั้วไฟฟ้าด้านหลังจะเกิดการหลอมละลายของอะลูมิเนียมทั้งหมด

ห้องที่ 4 Cooling หลังจากการให้ความร้อน จะลดอุณหภูมิให้เย็นลงมาถึงอุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิต่ำกว่า โดยขั้วไฟฟ้าด้านหน้าเกิดการตกผลึกของ Ag อยู่ภายใน Glass frit และป้องกันไม่ให้ Ag ทะลุผ่านชั้น n-Si emitter ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังจะเกิดการแข็งตัวระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน โดยเกิดการเจือของอะลูมิเนียมในทันทีใกล้กับพื้นผิวซิลิคอน และเกิดเป็นบริเวณ p^+ -Si (BSF) ขึ้น

การศึกษาหาเงื่อนไขการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วได้ใช้แผ่นซิลิคอนรอยต่อ p/n-Si ขนาด 3 cm x 3 cm ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นประมาณ 100 - 110 Ω /sheet และมีการเคลือบชั้นซิลิคอนไนไตรด์ที่ด้านหน้าหนาประมาณ 85 nm ของบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) จากนั้นสร้างขั้วไฟฟ้าลวดลายกริดด้วยกาวเงิน (Ag paste) ที่ด้านหน้ารับแสง และด้านหลังทั้งพื้นที่จากกาวอะลูมิเนียม (Al paste) โดยใช้เทคนิคพิมพ์ลาย และผ่านการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วด้วยเตาเผาต้นแบบที่เงื่อนไขต่างกันภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ โดยกำหนดอุณหภูมิและเวลาภายในแต่ละห้อง ได้แก่ ห้องที่ 1 อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 10 วินาที ห้องที่ 2 อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 10 วินาที และห้องที่ 3 ซึ่งในการทดสอบจะปรับเปลี่ยนอุณหภูมิและเวลาที่ 890, 910 และ 930°C เป็นเวลา 7, 10, 15 และ 20 วินาที ตามลำดับ เพื่อหาเงื่อนไขให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงที่สุด

การวัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่องระบบจำลองแสงอาทิตย์ Photo emission technology (Solar simulator) Model #SS100AAA, เครื่องวัดสัญญาณและตัวจ่ายไฟฟ้า Precision source ยี่ห้อ KEYSIGHT รุ่น B2901A และโปรแกรม Agilent B2900A Quick IV Measurement ที่สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงดังรูปที่ 3.25 ภายใต้การจำลองแสงสเปกตรัม AM1.5 มีความเข้มข้นของแสงมาตรฐานเท่ากับ 1000 W/m^2

ตารางที่ 3.5 แสดงผลการวัดค่าทางไฟฟ้าของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วที่เงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ โดยแสดงแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}), กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}), ฟิสิกส์แฟกเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) พบว่าที่อุณหภูมิ 910°C เวลา 7 วินาที จะได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงที่สุดได้แก่ 11.42%



รูปที่ 3.25 เครื่องวัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยระบบจำลองแสงเทียม

เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิของการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเตาเผาต้นแบบคือ 910°C ซึ่งให้ η ที่สูงสุด ได้แก่ 11.42% ที่อุณหภูมิ 890°C จะมี η ที่ลดลง ได้แก่ 10.66% เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปส่งผลให้เกิด BSF ได้ช้า การนำไฟฟ้าจึงต่ำ ส่วนอุณหภูมิ 930°C จะมี η ที่ลดลง ได้แก่ 11.15% เนื่องจากสามารถเกิดรอยแตกขนาดเล็ก (Micro cracks) หรือการโค้งงอ (Bend) ของแผ่นฐานซิลิคอนได้จากอุณหภูมิที่สูงมากเกินไป

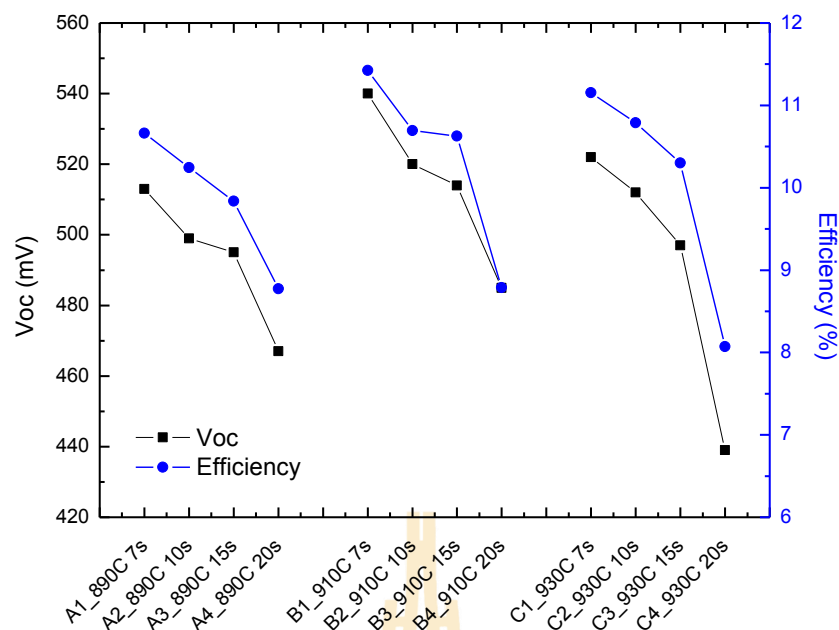
เมื่อพิจารณาที่เวลาของการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว พบว่าเวลาที่เหมาะสมสำหรับเตาเผาต้นแบบคือ 7 วินาที โดยที่อุณหภูมิ 890, 910 และ 930°C จะมี η เป็น 10.66%, 11.42% และ 11.15% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น η จะลดลงในทุกเงื่อนไขของอุณหภูมิ จากการลดลงของค่า V_{oc} และ FF โดยเวลาที่สั้นจะสามารถลดการรวมตัวใหม่ของพาหะ (Recombination) ได้จากการลดลงของความเค้นของแผ่นฐานซิลิคอนที่เกิดจากความร้อนสูงมากเกินไป และลดความเปื่อยเบนของอุณหภูมิและการสั้นของพาหะ ส่งผลให้ค่า V_{oc} , FF และ η สูงขึ้น

ตารางที่ 3.5 ผลการวัดทางไฟฟ้าของแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนอย่างรวดเร็วในเงื่อนไขต่าง ๆ

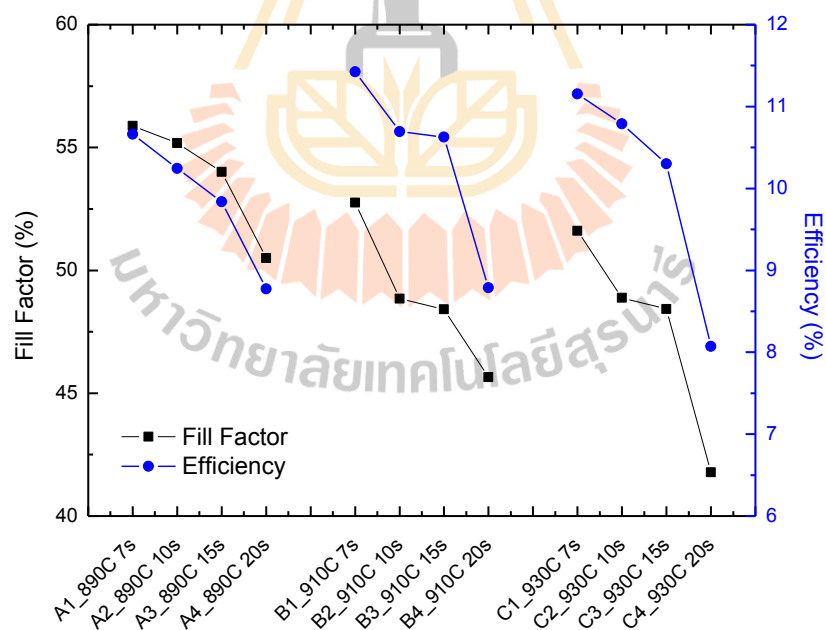
เงื่อนไข	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (sec)	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA)	FF (%)	η (%)
A1	890	7	513	37.20	55.88	10.66
A2		10	499	35.90	55.18	10.24
A3		15	495	36.80	54.00	9.84
A4		20	467	37.20	50.50	8.77
B1	910	7	540	40.10	52.75	11.42
B2		10	520	42.10	48.84	10.69
B3		15	514	42.70	48.42	10.63
B4		20	485	39.70	45.65	8.79
C1	930	7	522	41.40	51.61	11.15
C2		10	512	43.10	48.89	10.79
C3		15	497	42.80	48.43	10.30
C4		20	439	44.00	41.78	8.07

จากรูปที่ 3.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นผลมาจากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาด้วยความร้อนอย่างรวดเร็ว พบว่า V_{oc} และ η มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน โดยเวลาที่น้อยที่สุดจะให้ V_{oc} และ η ที่สูงที่สุดและลดลงมาเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากความเครียดของแผ่นฐานซิลิคอนที่เกิดจากความร้อนสูงมากเกินไป ส่วนอุณหภูมิ 910°C จะให้ V_{oc} และ η ที่สูงที่สุด

จากรูปที่ 3.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟิลแฟกเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นผลมาจากอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาด้วยความร้อนอย่างรวดเร็ว พบว่า FF และ η มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือเวลาที่น้อยที่สุดจะให้ FF และ η ที่สูงที่สุดและลดลงเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น ส่วนที่อุณหภูมิค่าจะให้ FF และ η ที่สูงที่สุดและลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

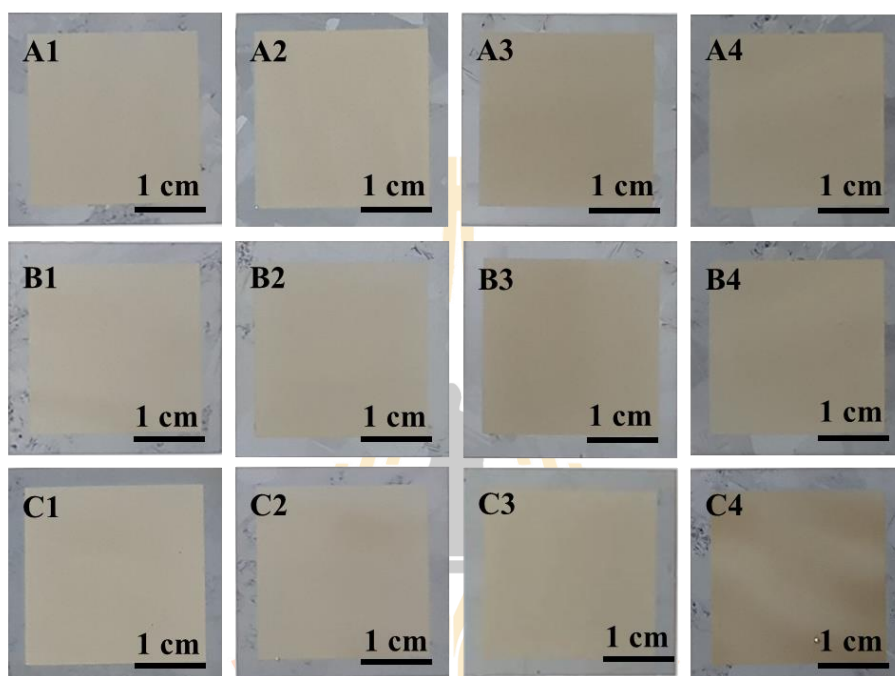


รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วในเงื่อนไขต่าง ๆ



รูปที่ 3.27 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลแฟคเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วในเงื่อนไขต่าง ๆ

รูปที่ 3.28 แสดงบริเวณขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์หลังการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วด้วยเตาเผาต้นแบบที่อุณหภูมิ 890, 910 และ 930°C เป็นเวลา 7, 10, 15 และ 20 วินาที พบว่าเมื่ออุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้น สีของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมจะเข้มขึ้น และหากใช้เวลาและอุณหภูมิมากเกินไปจะเกิดการเผาที่ไม่สม่ำเสมอและเกิดรอยแตกระหว่างขั้วไฟฟ้าและแผ่นฐานซิลิคอนขึ้น ทำให้ ทุ ลดลง



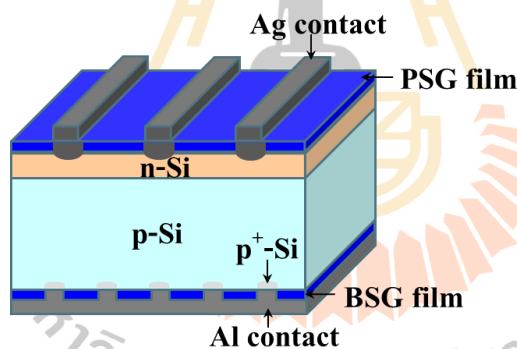
รูปที่ 3.28 บริเวณขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์หลังการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วในเงื่อนไขต่าง ๆ

บทที่ 4

การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบโครงสร้าง Local back passivation และวิเคราะห์ผล

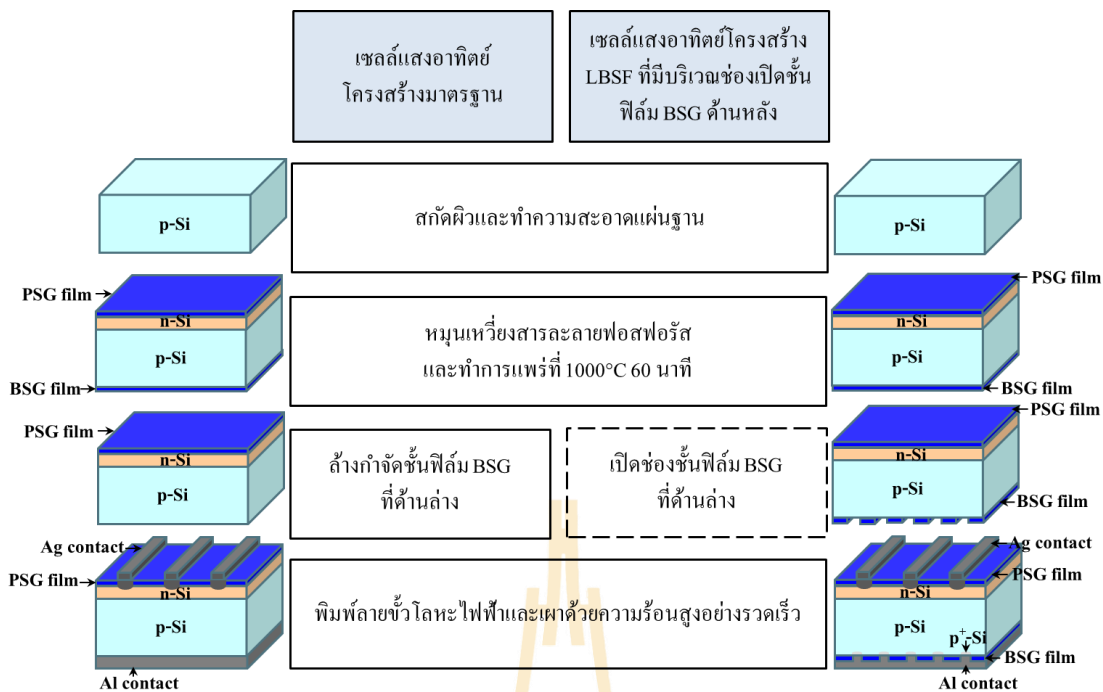
4.1 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างพาสซีวชันด้านหลัง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างพาสซีวชันด้านหลังเรียกว่า Local back passivation หรือ Local back surface field (LBSF) cell ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริก เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF สำหรับการศึกษานี้ใช้ชั้นฟิล์มฟอสโฟซิลิเกต (PSG) ด้านหน้า เป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสงและชั้นฟิล์มโบโรซิลิเกต (BSG) ด้านหลังที่เปิดช่องบางบริเวณบน โครงสร้างรอยต่อ p/n-Si โดยที่ฟิล์ม PSG และ BSG เป็นชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นจากผลพลอยได้ของ กระบวนการสร้างรอยต่อ p/n-Si จากการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิสูง โครงสร้างเซลล์ต้นแบบใน งานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่ใช้ฟิล์ม BSG เป็นชั้น ไดอิเล็กทริกด้านหลัง

การเปรียบเทียบขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่ามีขั้นตอนที่เหมือนกัน แตกต่างกันเพียงการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานจะต้องทำการล้างกำจัดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังทั้งหมด ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังจะทำการเปิดช่องชั้นฟิล์มด้วยวิธีการประทับลาย

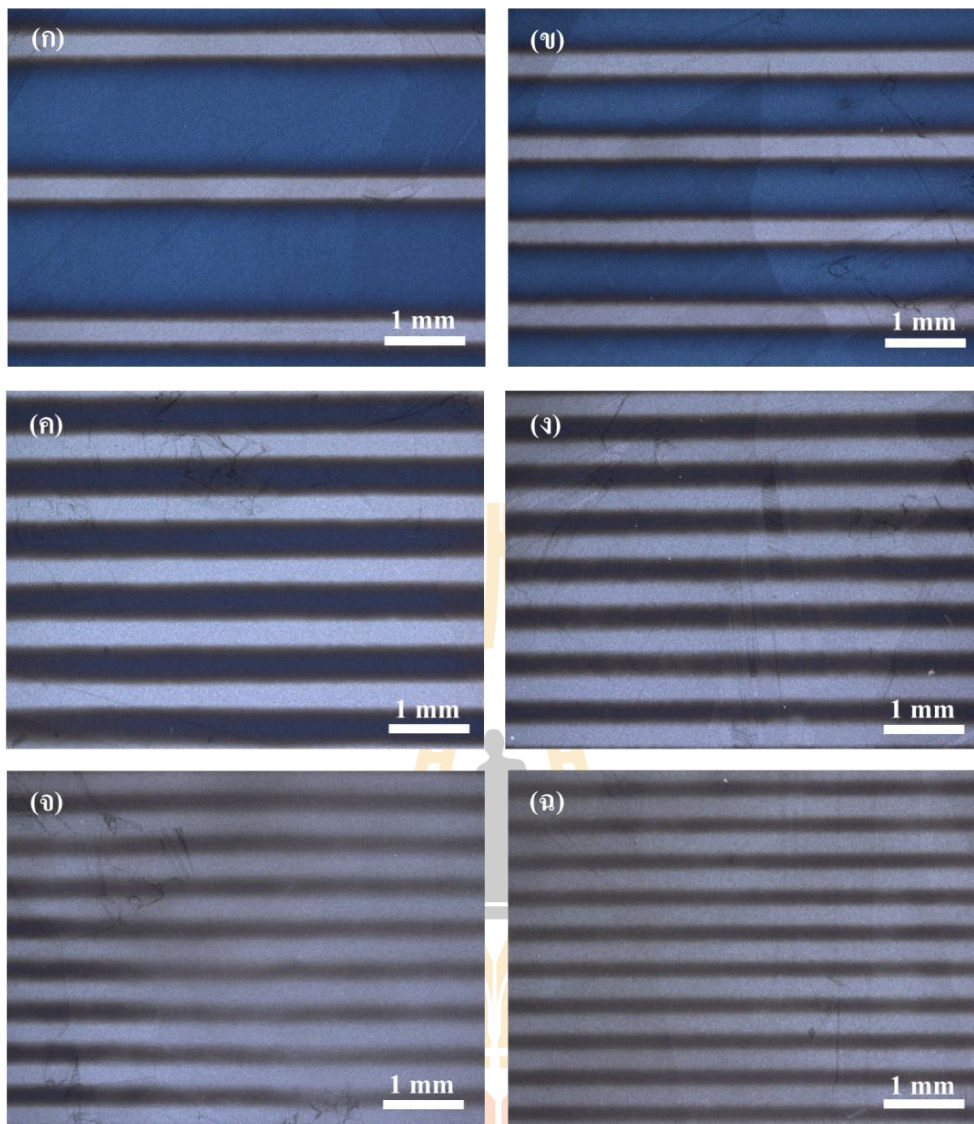


รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง เริ่มต้นนำแผ่นฐานซิลิคอนหลายผลึก ชนิด p-Si (mc-Si) ที่เจือด้วยโบรอน มีความต้านทานไฟฟ้าระหว่าง 1-3 Ω·cm ขนาด 200 μm ขนาด 3 cm x 3 cm มาผ่านกระบวนการกัดพื้นผิวให้ขรุขระด้วยสารละลาย HF/HNO₃ และทำความสะอาดด้วยสารละลาย HCl/HF จากนั้นทำการสร้างรอยต่อ p/n-Si ตามเงื่อนไขในหัวข้อที่ 3.2 ขั้นตอนต่อมาทำการขัดผิวแผ่นด้านข้างเพื่อป้องกันการลัดวงจรและเปิดช่องชั้นฟิล์ม BSG ลวดลายเส้น ขนาด 250 μm โดยการประทับลายด้วยสารละลาย HF5% เป็นเวลา 2 นาที และทำความสะอาดด้วยวิธี RCA

ทำการพินฟลายซ์ไฟฟ้าด้านล่างที่เป็นแบบเต็มบริเวณด้วยกาวอะลูมิเนียม (Al paste) และอบแห้งที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นพินฟลายซ์ไฟฟ้าด้านบนที่มีลักษณะเป็นลายกริดด้วยกาวเงิน (Ag paste) และอบแห้งที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 10 นาที ภายหลังจากการสร้างขั้วไฟฟ้าแล้ว นำชิ้นงานเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว (Fast firing) ที่อุณหภูมิ 915°C เป็นเวลา 7 วินาที ภายใต้นบรรยากาศปกติ

ในการศึกษานี้กำหนดสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดระหว่าง 5 - 30% และลวดลายแบบลายเส้นขนาด 250 μm ซึ่งลวดลายช่องเปิดหลังจากการประทับลายด้วยสารละลาย HF แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ลวดลายช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ขนาด $250\ \mu\text{m}$ โดยมีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (ก) 5% (ข) 10% (ค) 15% (ง) 20% (จ) 25% และ (ฉ) 30%

เมื่อทำการวัดขนาดลวดลายที่ได้จากการประทับลายสารละลาย HF ด้วยกล้อง Light microscope พบว่ามีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% เมื่อเทียบกับลวดลายที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Layout ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากผลดังกล่าวแสดงถึงความแม่นยำในการเปิดช่องชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกด้วยวิธีการประทับลายและมีแนวทางการนำไปใช้ผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดขนาดลวดลายช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG

สัดส่วนพื้นที่ ช่องเปิด (%)	ช่องเปิดจากการ ออกแบบ (μm)	ช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG หลังการประทับลาย (μm)	ความคลาดเคลื่อน (%)
5	250	260.80	4.32
10		258.65	3.46
15		260.67	4.27
20		260.28	4.11
25		259.60	3.84
30		258.61	3.44

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น n-Si ร่วมกับผลของการเปิดช่องชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกด้านหลัง โดยเลือกใช้ค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นที่มีค่าอยู่ในช่วง 90 - 110 Ω/sheet , 110 - 130 Ω/sheet และ 130 - 150 Ω/sheet อีกทั้งทำการเลือกใช้สัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกด้านหลังระหว่าง 5 - 30% ผลการวัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังด้วยเครื่องจำลองแสงเทียมแสดงดังตารางที่ 4.2 - 4.4 พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน โดยสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังที่ 15% จะให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงสุดในทุกกรณี

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) และความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (J_{sc}) ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง ในกรณีที่ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 90 - 110 Ω/sheet จากผลพบว่า V_{oc} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อลดสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังจาก 25% ถึง 10% แต่ V_{oc} มีแนวโน้มลดลง เมื่อสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังลดลงต่ำกว่า 10% โดยสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังที่ 10% จะมีค่า V_{oc} สูงที่สุดเป็น 0.445 V ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานอยู่เล็กน้อยประมาณ 0.014 V หรือคิดเป็น 2.30% ส่วน J_{sc} พบว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันระหว่าง 20.25 - 20.83 mA/cm^2 โดยสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังที่ 30% จะมีค่า J_{sc} สูงที่สุดเป็น 20.83 mA/cm^2 ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน 0.592 mA/cm^2 หรือคิดเป็น 2.92%

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง กรณีที่ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้า
แผ่นระหว่าง 90 - 110 Ω /sheet

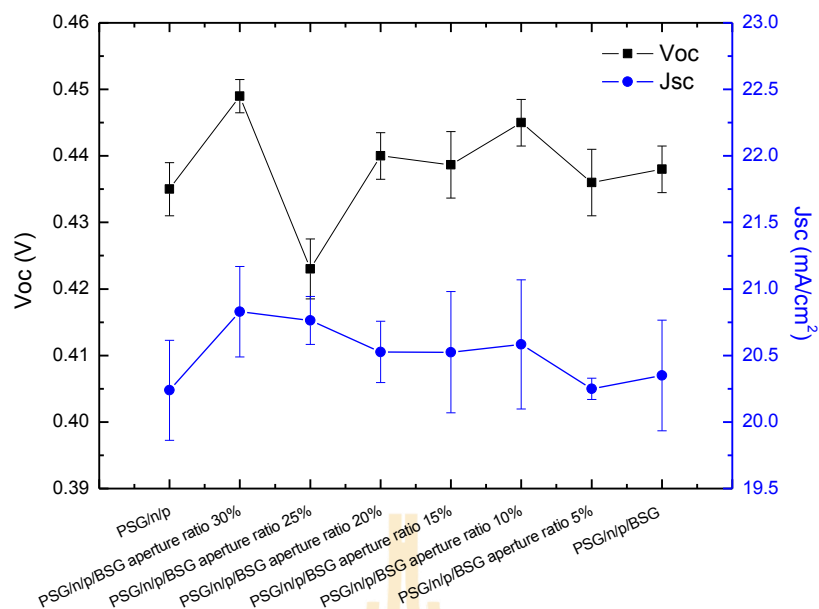
Condition	Aperture ratio of BSG film (%)	R_{sheet} of n-Si (Ω /sheet)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)	η gain (%)
PSG/n/p	-	97.89	0.435	20.24	51.83	4.705	-
PSG/n/p/BSG aperture ratio 30%	30	106.96	0.449	20.83	52.24	4.845	0.14
PSG/n/p/BSG aperture ratio 25%	25	101.06	0.423	20.76	54.94	4.763	0.06
PSG/n/p/BSG aperture ratio 20%	20	99.25	0.440	20.53	57.99	4.857	0.15
PSG/n/p/BSG aperture ratio 15%	15	100.61	0.439	20.53	57.24	4.860	0.16
PSG/n/p/BSG aperture ratio 10%	10	100.84	0.445	20.58	53.76	4.520	-0.19
PSG/n/p/BSG aperture ratio 5%	5	101.75	0.436	20.25	53.06	4.643	-0.06
PSG/n/p/BSG	0	97.44	0.438	20.35	52.54	4.087	-0.62

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง กรณีที่ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้า
แผ่นระหว่าง 110 - 130 Ω /sheet

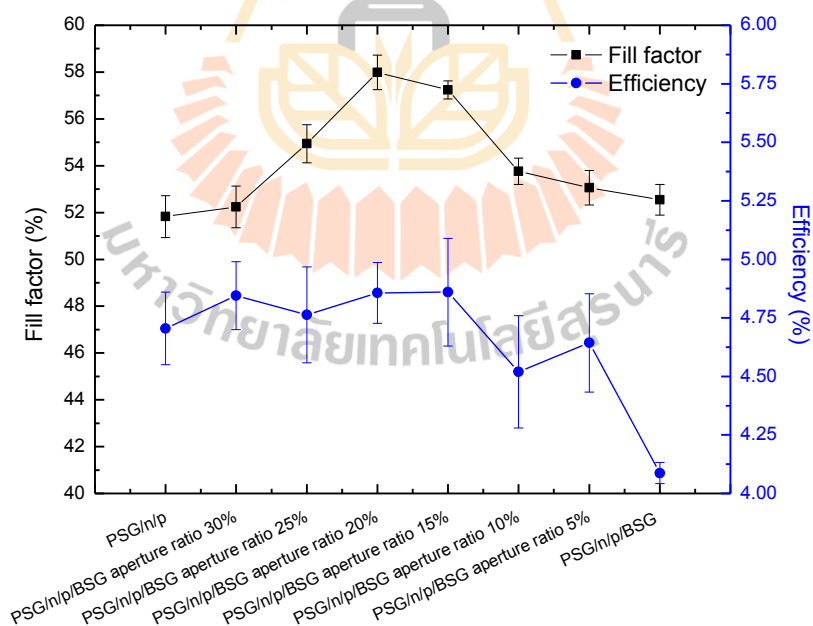
Condition	Aperture ratio of BSG film (%)	R_{sheet} of n-Si (Ω /sheet)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)	η gain (%)
PSG/n/p	-	125.99	0.444	21.69	49.16	4.900	-
PSG/n/p/BSG aperture ratio 30%	30	118.29	0.447	20.42	52.10	4.723	-0.18
PSG/n/p/BSG aperture ratio 25%	25	123.72	0.446	20.22	57.53	4.973	0.07
PSG/n/p/BSG aperture ratio 20%	20	120.10	0.454	22.04	56.44	5.265	0.37
PSG/n/p/BSG aperture ratio 15%	15	119.64	0.450	21.47	58.45	5.300	0.40
PSG/n/p/BSG aperture ratio 10%	10	122.36	0.448	21.00	58.98	5.147	0.25
PSG/n/p/BSG aperture ratio 5%	5	122.36	0.445	21.37	57.90	4.933	0.03
PSG/n/p/BSG	0	115.11	0.444	21.30	49.62	4.687	-0.21

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง กรณีที่ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้า
แผ่นระหว่าง 130 - 150 Ω /sheet

Condition	Aperture ratio of BSG film (%)	R_{sheet} of n-Si (Ω /sheet)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF (%)	η (%)	η gain (%)
PSG/n/p	-	135.28	0.448	20.79	52.05	4.85	-
PSG/n/p/BSG aperture ratio 30%	30	141.85	0.424	20.29	55.59	4.70	-0.16
PSG/n/p/BSG aperture ratio 25%	25	143.66	0.422	20.10	57.81	4.82	-0.04
PSG/n/p/BSG aperture ratio 20%	20	137.77	0.454	21.52	55.52	4.97	0.12
PSG/n/p/BSG aperture ratio 15%	15	136.19	0.455	21.59	54.26	5.23	0.38
PSG/n/p/BSG aperture ratio 10%	10	136.87	0.451	21.66	51.42	5.02	0.17
PSG/n/p/BSG aperture ratio 5%	5	136.41	0.446	21.27	53.92	4.49	-0.37
PSG/n/p/BSG	0	139.13	0.436	21.17	52.06	4.44	-0.41

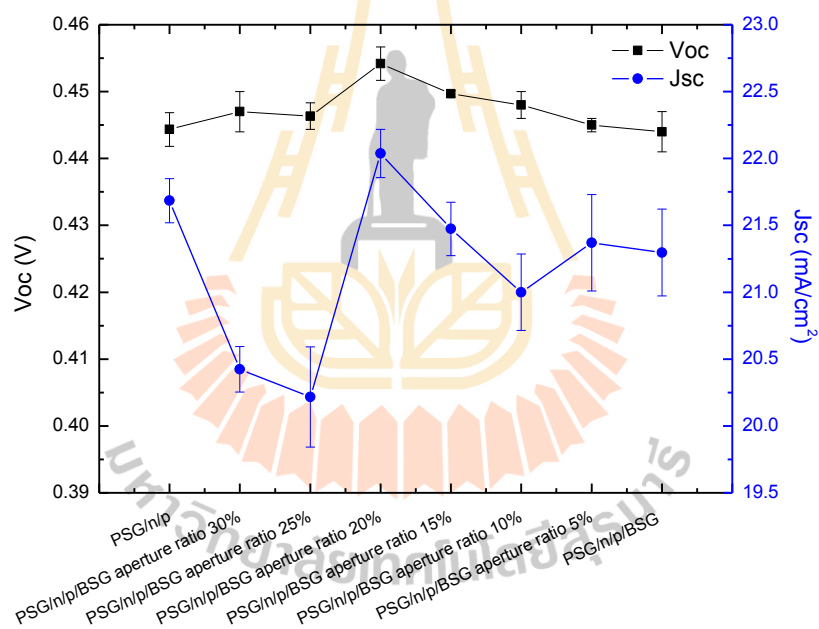


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) และความหนาแน่นของกระแส
 ลัดวงจร (J_{sc}) ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG
 ด้านหลัง ในกรณีที่ใช้ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 90 - 110 Ω /sheet



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลแฟคเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ของ
 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง ในกรณีที่ใช้
 ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 90 - 110 Ω /sheet

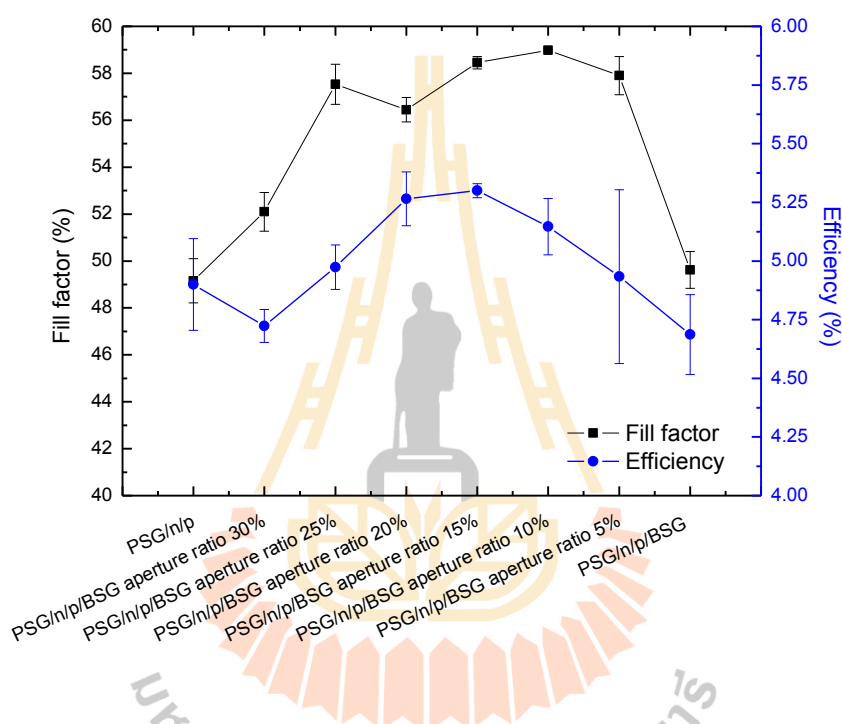
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟิลแฟกเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง ในกรณีที่ยื่น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 90 - 110 Ω /sheet จากผลพบว่า FF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อลดสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังจาก 30% ถึง 20% แต่ FF มีแนวโน้มลดลง เมื่อสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังลดลงต่ำกว่า 20% โดยสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังที่ 20% จะให้ค่า FF สูงที่สุดเป็น 57.99% ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน 6.16% ส่วน η มีค่าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อมีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังที่ 30 - 15% อย่างไรก็ตาม η จะมีแนวโน้มลดลง เมื่อสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังลดลงต่ำกว่า 15% โดยสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังที่ 15% จะให้ η ที่สูงสุดเท่ากับ 4.86% ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานอยู่เล็กน้อยประมาณ 0.16%



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) และความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (J_{sc}) ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง ในกรณีที่ยื่น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 110 - 130 Ω /sheet

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) และความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (J_{sc}) ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG

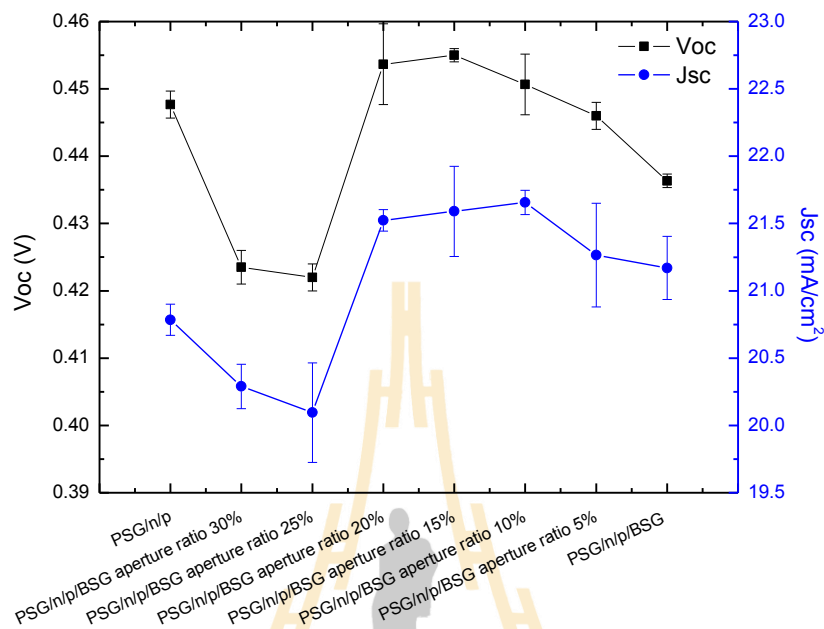
ด้านหลัง ในกรณีที่ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 110 - 130 Ω /sheet พบว่า V_{oc} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อลดสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังจาก 30% ถึง 20% แต่ V_{oc} มีแนวโน้มลดลง เมื่อสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังลดลงต่ำกว่า 20% โดยสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังที่ 20% จะมีค่า V_{oc} สูงที่สุดเป็น 0.454 V ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานประมาณ 0.010 V หรือสูงกว่า 2.25% และผลของ J_{sc} มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับ V_{oc} โดยให้ค่า J_{sc} สูงที่สุดเป็น 22.04 mA/cm^2 ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน 0.352 mA/cm^2 หรือสูงกว่า 1.61%



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลแฟคเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง ในกรณีที่ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 110 - 130 Ω /sheet

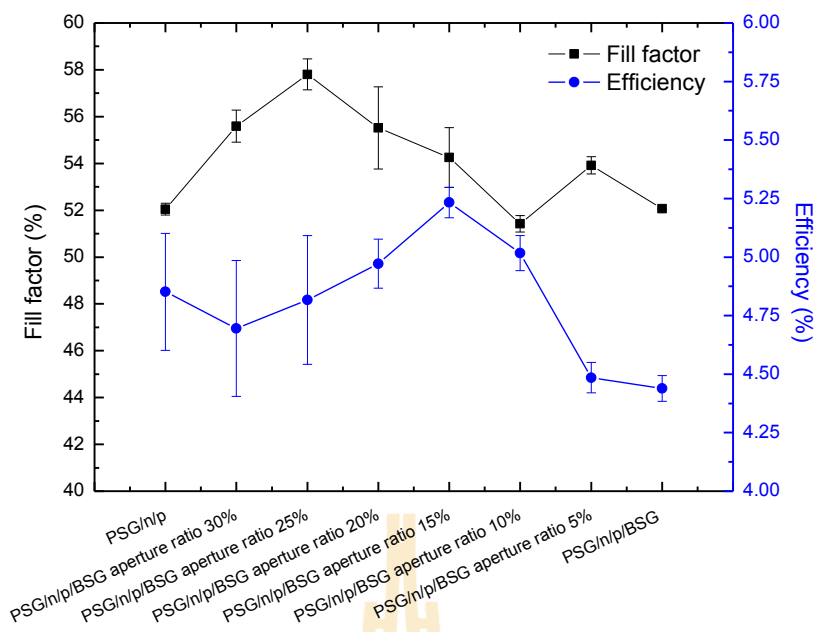
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟิลแฟคเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังในกรณีที่ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 110 - 130 Ω /sheet พบว่า FF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อลดสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังจาก 30% ถึง 10% แต่เมื่อสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังต่ำกว่า 10% ค่า FF จะลดลง โดยสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังที่ 10% จะให้ค่า FF สูงที่สุดเป็น 58.98% ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์

โครงสร้างมาตรฐาน 9.83% และ η มีแนวโน้มเช่นเดียวกับ FF โดยสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังที่ 15% จะให้ η ที่สูงสุดเท่ากับ 5.30% ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานประมาณ 0.40%



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) และความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (J_{sc}) ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง ในกรณีที่ใช้ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 130 - 150 Ω /sheet

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) และความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (J_{sc}) ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง ในกรณีที่ใช้ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 130 - 150 Ω /sheet พบว่า V_{oc} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังลดลงจาก 30% ถึง 15% แต่เมื่อสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังลดลงต่ำกว่า 15% ทำให้ V_{oc} มีแนวโน้มลดลง โดยสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังที่ 15% จะให้ค่า V_{oc} สูงที่สุดเป็น 0.455 V ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานอยู่ 0.007 V หรือสูงกว่า 1.56% ส่วน J_{sc} มีแนวโน้มเช่นเดียวกับ V_{oc} โดยสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังที่ 10% จะให้ค่า J_{sc} สูงที่สุดเท่ากับ 21.66 mA/cm² ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานอยู่ 0.872 mA/cm² หรือคิดเป็น 4.18%



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลแฟคเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง ในกรณีที่ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 130 - 150 Ω /sheet

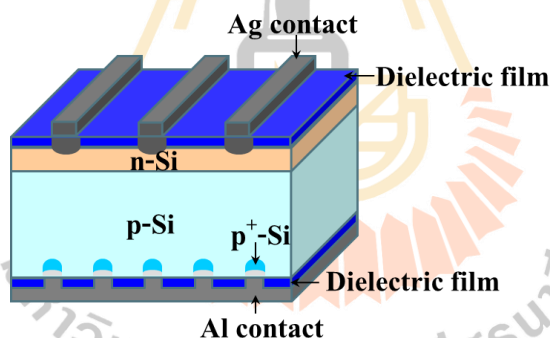
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟิลแฟคเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังในกรณีที่ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 130 - 150 Ω /sheet พบว่า FF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังลดลงจาก 30% ถึง 25% แต่เมื่อสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังลดลงต่ำกว่า 25% กลับพบว่า FF มีแนวโน้มลดลง โดยสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังที่ 25% จะให้ค่า FF สูงที่สุดประมาณ 57.81% ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานอยู่ 5.76% ส่วน η มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อลดสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังจาก 30 ถึง 15% แต่เมื่อสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังลดลงต่ำกว่า 15% กลับพบว่า η มีแนวโน้มลดลง โดยสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังที่ 15% จะให้ η ที่สูงสุดเท่ากับ 5.23% ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน 0.38%

จากผลการศึกษาพบว่า การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังให้ η ที่สูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างที่มีชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังเต็มบริเวณที่มีลักษณะรอยต่อ Metal-Insulation-Semiconductor (MIS) ซึ่งทำให้ขั้วไฟฟ้ามีสมบัติไม่เกิด

Ohmic contact ที่ดี ทำให้ค่า FF ต่ำ อีกทั้งเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังต่ำกว่า 10% และสูงกว่า 20% นั้นให้ค่า η ลดลง ซึ่งจากการศึกษาของ Urrejola, E. และคณะผู้วิจัย (ปี ค.ศ. 2011) พบว่าระยะห่างของช่องเปิดชั้นฟิล์ม ไดอิเล็กทริกส่งผลต่อการเกิด Local back surface field (LBSF) โดยถ้าระยะห่างระหว่างช่องเปิดมากกว่าการแพร่ของซิลิคอนในอะลูมิเนียม จะทำให้เกิดช่องว่างขึ้น ซึ่งจะทำให้รอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าและแผ่นฐานซิลิคอนไม่สมบูรณ์ ค่า FF และ η จึงมีค่าต่ำ และเมื่อระยะห่างระหว่างช่องเปิดน้อยจะมีชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกที่น้อยด้วย ทำให้เกิดการสะท้อนกลับภายในเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง ค่า J_{sc} และ η จึงมีค่าต่ำ

4.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างที่มีบริเวณ p^+ -Si และพาสซีเวชันด้านหลัง

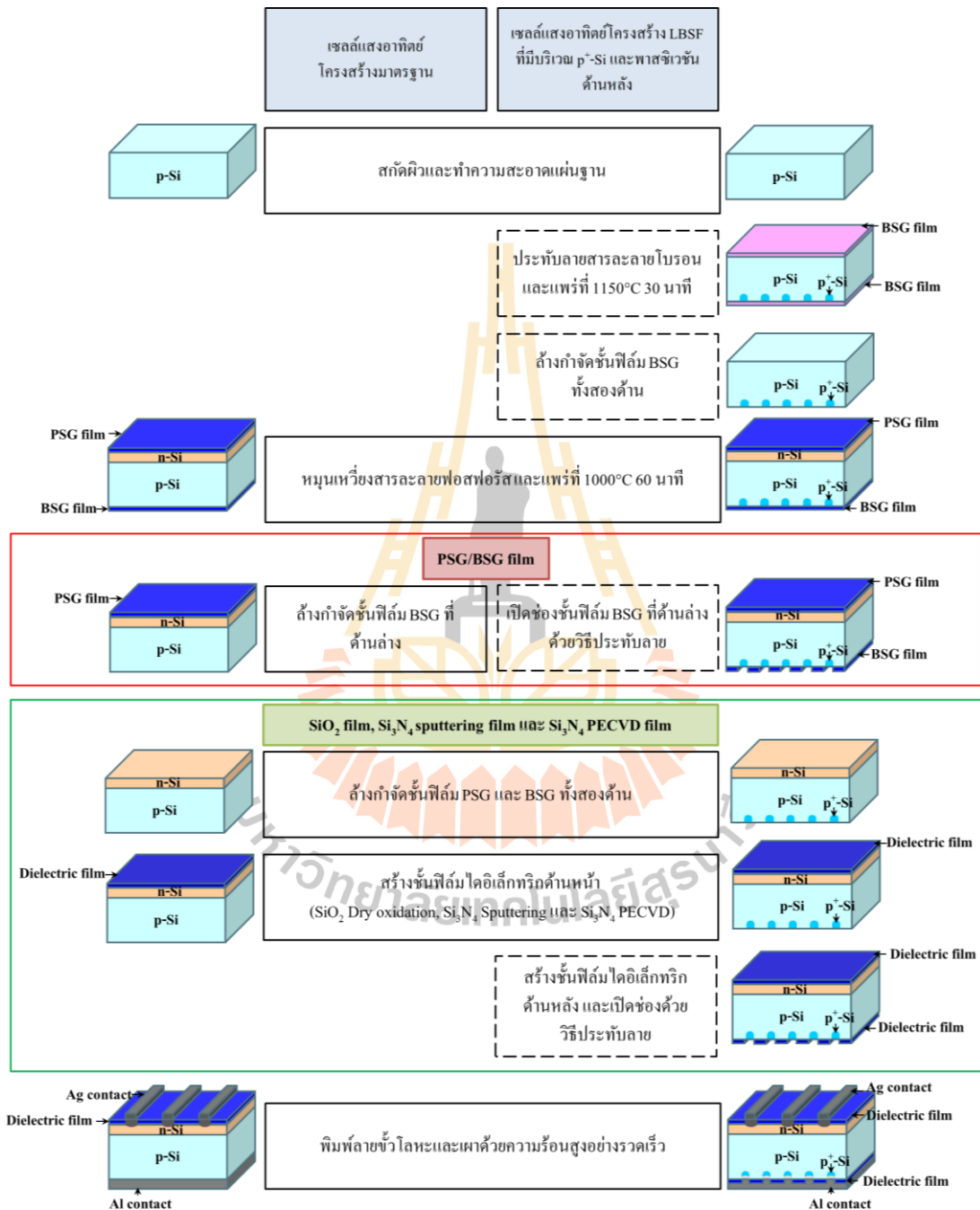
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม ไดอิเล็กทริกด้านหลัง โดยมีโครงสร้างประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าเงินด้านหน้า ชั้นฟิล์ม ไดอิเล็กทริกด้านหน้าเป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสง ชั้น n-Si แผ่นฐานซิลิคอน p-Si บริเวณ p^+ -Si บริเวณช่องเปิดชั้นไดอิเล็กทริกด้านหลังและขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมด้านหลัง แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างที่มีบริเวณ p^+ -Si และพาสซีเวชันด้านหลัง

จากการศึกษาในหัวข้อ 4.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบโครงสร้าง LBSF ที่มีสัดส่วนช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง 10 - 20% ในกรณีที่ชั้น n-Si มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 110 - 130 Ω /sheet ให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงที่สุด ดังนั้นในหัวข้อนี้ได้ศึกษาบริเวณ p^+ -Si ในโครงสร้าง LBSF และสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม ไดอิเล็กทริกด้านหลัง 10 - 20% โดยที่เลือกใช้ชั้น n-Si ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 110 - 130 Ω /sheet และฟิล์มไดอิเล็กทริก 4 ชนิด ได้แก่ PSG/BSG, SiO_2 , Si_3N_4 sputtering และ Si_3N_4 PECVD

ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p⁺-Si และพาสซีเวชันด้านหลังใช้ขั้นตอนการประทับลายสารละลายโบรอนและแพร่สารเจือโบรอนเพื่อให้เกิดบริเวณ p⁺-Si และทำการเปิดช่องชั้นฟิล์ม ไดอิเล็กทริกด้านหลังตามลวดลายบริเวณ p⁺-Si แสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p⁺-Si และพาสซีเวชันด้านหลัง

ขั้นตอนแรกนำแผ่นฐานซิลิคอนหลายผลึก ชนิด p-Si (mc-Si) ที่เจือด้วยโบรอน มีความต้านทานไฟฟ้าระหว่าง 1-3 $\Omega\cdot\text{cm}$ หน้า 200 μm ขนาด 3 cm x 3 cm มาผ่านกระบวนการสกัดพื้นผิวให้ขรุขระและทำความสะอาด จากนั้นเป็นขั้นตอนการสร้างบริเวณ p⁺-Si ด้วยการประทะปลายสารละลายโบรอนซึ่งรายละเอียดแสดงดังหัวข้อที่ 3.1 โดยจะได้บริเวณ p⁺-Si รวมทั้งฟิล์ม BSG ด้านหน้าและด้านหลัง ทำการล้างกำจัดชั้นฟิล์ม BSG ด้วยสารละลาย HF10% เป็นเวลา 5 นาทีและทำความสะอาดแผ่นฐานซิลิคอนด้วยวิธี RCA จากนั้นนำแผ่นฐานซิลิคอนด้านตรงข้ามกับบริเวณ p⁺-Si สร้างรอยต่อ p/n-Si ด้วยวิธี SOD ตามขั้นตอนรายละเอียดดังหัวข้อที่ 3.2 เพื่อให้ได้ชั้น n-Si ที่มีความต้านทานไฟฟ้าแผ่นระหว่าง 110 - 130 Ω/sheet จากนั้นทำการขัดผิวแผ่นด้านข้างเพื่อป้องกันการลัดวงจร

ขั้นตอนการสร้างชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกจะแบ่งเป็น 4 ชนิด ได้แก่ ฟิล์ม PSG/BSG จากการแพร่ด้วยความร้อนสูง, ฟิล์ม SiO₂ จากกระบวนการ Dry oxidation และฟิล์ม Si₃N₄ จากกระบวนการ Sputtering และ PECVD ซึ่งแสดงรายละเอียดขั้นตอนดังหัวข้อที่ 3.3 ต่อมาทำการเปิดช่องชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกให้มีขนาดคล้ายเดียวกันกับบริเวณ p⁺-Si โดยการสกัดผิวทางเคมีด้วยการประทะปลายบางบริเวณด้วยสารละลาย HF5% เป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้ได้ช่องเปิดที่ชัดเจน ต่อมาทำความสะอาดด้วยวิธี RCA

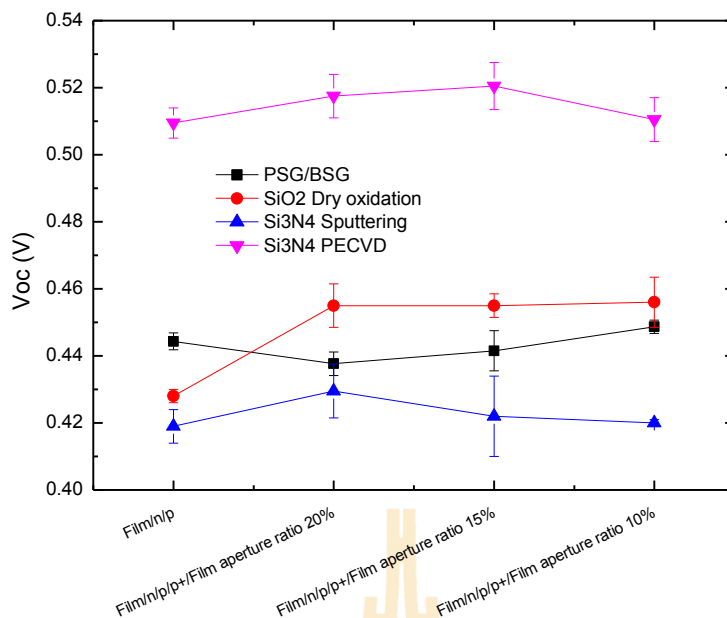
ขั้นตอนการสร้างขั้วไฟฟ้าเริ่มจากการพิมพ์ลายขั้วไฟฟ้าด้านล่างที่เป็นแบบเต็มบริเวณด้วยกาวอะลูมิเนียม (Al paste) และอบแห้งที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นพิมพ์ลายขั้วไฟฟ้าด้านบนที่มีลักษณะเป็นลายกริดด้วยกาวเงิน (Ag paste) และอบแห้งที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 10 นาที ภายหลังจากการสร้างขั้วไฟฟ้าแล้ว นำชิ้นงานเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว (Fast firing) ที่อุณหภูมิ 915°C เป็นเวลา 7 วินาที ภายใต้อากาศปกติ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกทั้ง 4 ชนิดร่วมกับผลของสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดด้านหลัง โดยผลการวัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่องจำลองแสงเทียมแสดงดังตารางที่ 4.5

จากรูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) และสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p⁺-Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ พบว่า V_{oc} ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่ชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกพบว่า ฟิล์ม Si₃N₄ PECVD ที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดด้านหลังที่ 15% จะให้ V_{oc} ที่สูงสุดเท่ากับ 0.521 V ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน 2.16% ส่วนฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดอื่น ๆ จะให้ค่า V_{oc} ที่ใกล้เคียงกันประมาณ 0.420 - 0.456 V และเมื่อพิจารณาที่สัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์มด้านหลังพบว่า V_{oc} มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.5 ผลการวัดค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p⁺-Si และพาสซีเวชันด้านหลัง

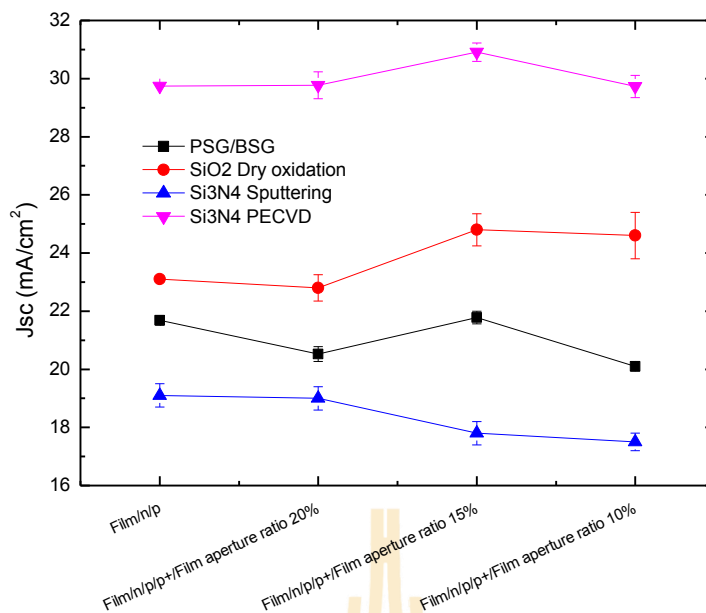
Condition	Dielectric film	Aperture ratio (%)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)	η gain (%)
PSG/n/p	PSG/BSG	-	0.444	21.685	49.157	4.900	-
PSG/n/p/p ⁺ /BSG aperture ratio 20%		20	0.438	20.520	54.228	4.915	0.015
PSG/n/p/p ⁺ /BSG aperture ratio 15%		15	0.442	21.779	52.473	4.930	0.030
PSG/n/p/p ⁺ /BSG aperture ratio 10%		10	0.449	20.100	52.363	4.587	-0.313
SiO ₂ /n/p	SiO ₂ Dry oxidation	-	0.428	23.100	52.012	5.142	-
SiO ₂ /n/p/p ⁺ /SiO ₂ aperture ratio 20%		20	0.455	22.800	52.227	5.418	0.276
SiO ₂ /n/p/p ⁺ /SiO ₂ aperture ratio 15%		15	0.455	24.800	52.630	5.939	0.796
SiO ₂ /n/p/p ⁺ /SiO ₂ aperture ratio 10%		10	0.456	24.600	54.107	6.070	0.927
Si ₃ N ₄ sputt/n/p	Si ₃ N ₄ Sputtering	-	0.419	19.100	50.622	4.066	-
Si ₃ N ₄ sputt/n/p/p ⁺ /Si ₃ N ₄ sputt aperture ratio 20%		20	0.430	19.000	54.655	4.462	0.396
Si ₃ N ₄ sputt/n/p/p ⁺ /Si ₃ N ₄ sputt aperture ratio 15%		15	0.422	17.800	51.733	3.886	-0.180
Si ₃ N ₄ sputt/n/p/p ⁺ /Si ₃ N ₄ sputt aperture ratio 10%		10	0.420	17.500	36.245	2.664	-1.402
Si ₃ N ₄ PECVD/n/p	Si ₃ N ₄ PECVD	-	0.510	29.745	52.885	8.011	-
Si ₃ N ₄ PECVD/n/p/p ⁺ /Si ₃ N ₄ PECVD aperture ratio 20%		20	0.518	29.775	53.185	8.187	0.176
Si ₃ N ₄ PECVD/n/p/p ⁺ /Si ₃ N ₄ PECVD aperture ratio 15%		15	0.521	30.910	54.421	8.761	0.750
Si ₃ N ₄ PECVD/n/p/p ⁺ /Si ₃ N ₄ PECVD aperture ratio 10%		10	0.511	29.730	52.753	7.996	-0.015



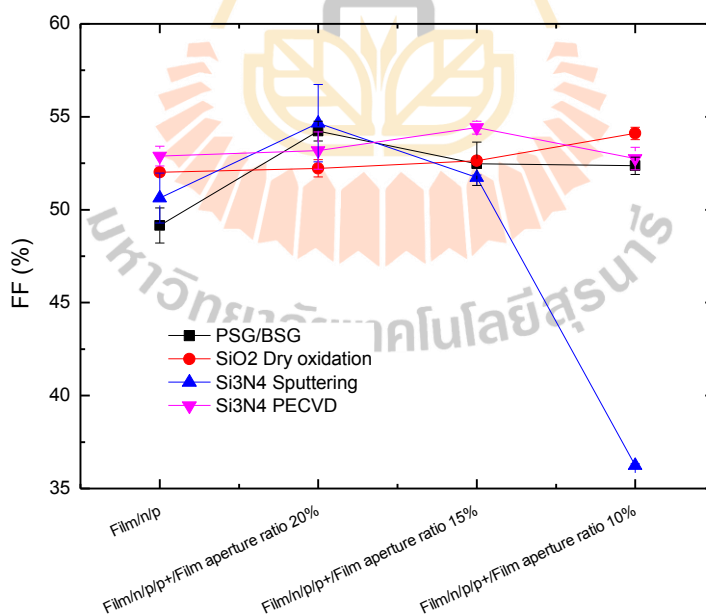
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) และสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม ไดอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (J_{sc}) และสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ พบว่า J_{sc} ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาที่ชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกพบว่า ฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดด้านหลังที่ 15% จะให้ J_{sc} ที่สูงสุดเท่ากับ 30.91 mA/cm^2 ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน 3.92% ฟิล์ม SiO_2 ฟิล์ม PSG/BSG และฟิล์ม Si_3N_4 Sputtering จะให้ค่า J_{sc} ที่ลดลงตามลำดับและเมื่อพิจารณาที่สัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์มด้านหลังพบว่า J_{sc} มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดลดลงต่ำกว่า 20%

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟิลแฟกเตอร์ (FF) และสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ พบว่า FF มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกันประมาณ 52 - 54% ในทุกเงื่อนไข แต่ FF ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 Sputtering ด้านหลังที่ 10% จะให้ FF ที่ต่ำที่สุด

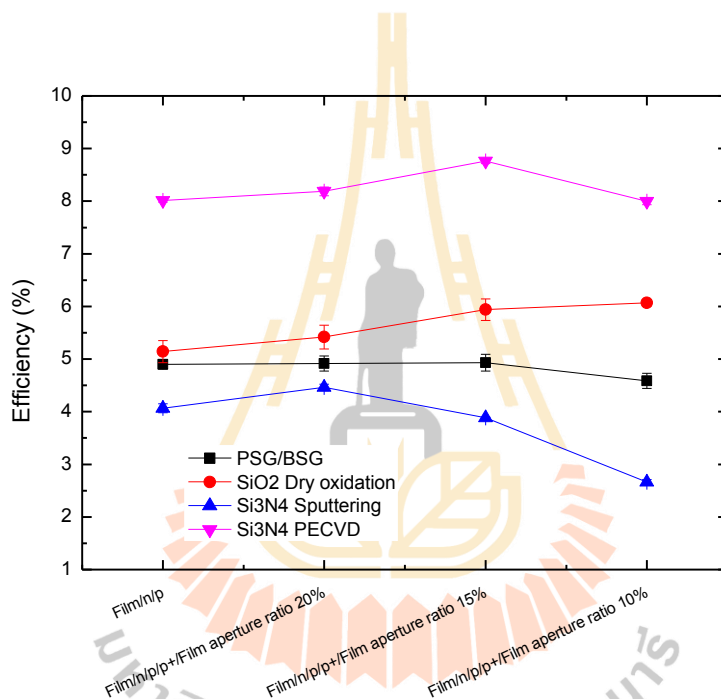


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสตัวจร (J_{sc}) และสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างฟิลแฟคเตอร์ (FF) และสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) และ สัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ พบว่า η ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน เมื่อพิจารณาที่ชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกพบว่าฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดด้านหลังที่ 15% จะให้ η ที่สูงสุดเท่ากับ 8.76% ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน 0.75% ส่วนฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดอื่น ๆ จะให้ η ที่ใกล้เคียงกันประมาณ 4 - 5% และเมื่อพิจารณาที่สัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์มด้านหลังพบว่า η มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดลดลงจาก 20% ถึง 15% และ η มีแนวโน้มลดลง เมื่อสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดลดลงต่ำกว่า 15%



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) และสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกชนิดต่าง ๆ

จากผลการศึกษการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกด้านหลัง ได้แก่ PSG/BSG, SiO_2 , Si_3N_4 sputtering และ Si_3N_4 PECVD พบว่าฟิล์ม Si_3N_4 PECVD มีความเหมาะสมสำหรับเป็นชั้นพาสซีเวชัน เนื่องจากให้ค่า V_{oc} และ J_{sc} ที่สูง ทำให้มีค่า η ที่สูง ดังนั้นจึงนำเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้น

ฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ด้านหลังมาศึกษาค่าช่วงชีวิตของพาหะ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะที่พื้นผิว บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของบริเวณ p^+ -Si และการพาหะบริเวณของชั้นฟิล์มไดโอดีทริกด้านหลังของเซลล์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่าช่วงชีวิตของพาหะ (Carrier lifetime) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการรวบรวมพาหะที่ผลิตได้ โดยถ้าค่าช่วงชีวิตของพาหะมากแสดงถึงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดี การวัดค่าช่วงชีวิตนี้ใช้เครื่อง Photoconductance lifetime tester ยี่ห้อ Sinton instrument รุ่น WCT-120 ด้วยเทคนิค Quasi-steady-state photoconductance (QSSPC) ที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) แสดงภาพเครื่องในรูปที่ 4.16 โดยใช้แสงแฟลชเป็นแหล่งกำเนิดแสง เพื่อกระตุ้นให้เกิดการสร้างพาหะอิสระขึ้น เมื่อหยุดให้แสง อิเล็กตรอนอิสระบางส่วนจะกลับเข้าสู่สถานะสมดุลโดยเกิดการรวมตัวใหม่ของพาหะ ส่งผลให้การนำไฟฟ้าลดลง และเครื่องมือวัดจะส่งสัญญาณที่ตรวจวัดได้เป็นฟังก์ชันของเวลา ในที่นี้จะใช้ค่าความหนาแน่นของพาหะข้างน้อย (Minority carrier density) เท่ากับ $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$



รูปที่ 4.16 เครื่อง Photoconductance lifetime tester รุ่น WCT-120

ค่าช่วงชีวิตของเนื้อวัสดุ (τ_{Bulk}) ประกอบด้วยค่าช่วงชีวิตชนิดต่าง ๆ กันตามลักษณะที่แตกต่างกันของกระบวนการรวมตัวใหม่ทั้ง 3 ชนิด แสดงในสมการที่ (4.1)

$$\frac{1}{\tau_{\text{Bulk}}} = \frac{1}{\tau_{\text{Radiative}}} + \frac{1}{\tau_{\text{SHR}}} + \frac{1}{\tau_{\text{Auger}}} \quad (4.1)$$

โดยที่ $\tau_{\text{Radiative}}$ คือ ค่าช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยในกลไก Radiative recombination หน่วยวินาที
 τ_{SHR} คือ ค่าช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยในกลไก SRH recombination หน่วยวินาที
 τ_{Auger} คือ ค่าช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยในกลไก Auger recombination หน่วยวินาที

สำหรับค่าช่วงชีวิตของพาหะ (Effective lifetime: τ_{eff}) และอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่พื้นผิว (Surface recombination velocity: S_{eff}) สามารถหาได้ดังสมการที่ (4.2) และ (4.3) ตามลำดับ

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_{\text{Bulk}}} + \frac{1}{\tau_{\text{Surface}}} \quad (4.2)$$

โดยที่ τ_{Bulk} คือ ค่าช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยที่เนื้อวัสดุ
 τ_{Surface} คือ ค่าช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยที่พื้นผิว

$$S_{\text{eff}} = \frac{W}{2\tau_{\text{eff}}} \quad (4.3)$$

โดยที่ W คือ ความหนาของชั้นงาน

การวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะนี้ ได้วัดกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si ด้านหลังโดยมีชั้นฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดระหว่าง 10 - 20% เปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน ซึ่งในการศึกษานี้จะเน้นการพิจารณาบริเวณ p^+ -Si และสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ด้านหลังที่มีผลต่อประสิทธิภาพของค่าช่วงชีวิตของพาหะ ดังนั้นจึงไม่นำข้อไฟฟ้ามาพิจารณา

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการวัดค่าช่วงชีวิตและอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่พื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si ในเงื่อนไขสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ที่ 10%, 15% และ 20% จากผลการวัดพบว่าค่าช่วงชีวิตของพาหะอยู่ระหว่าง 21.46 - 26.69 μs ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน โดยสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ด้านหลังที่ 15% จะให้ค่าช่วงชีวิตที่สูงสุดเท่ากับ 26.69 μs ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานอยู่ 14.18 μs

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดค่าช่วงชีวิตและอัตราการเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่พื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si ในเงื่อนไขสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ด้านหลัง

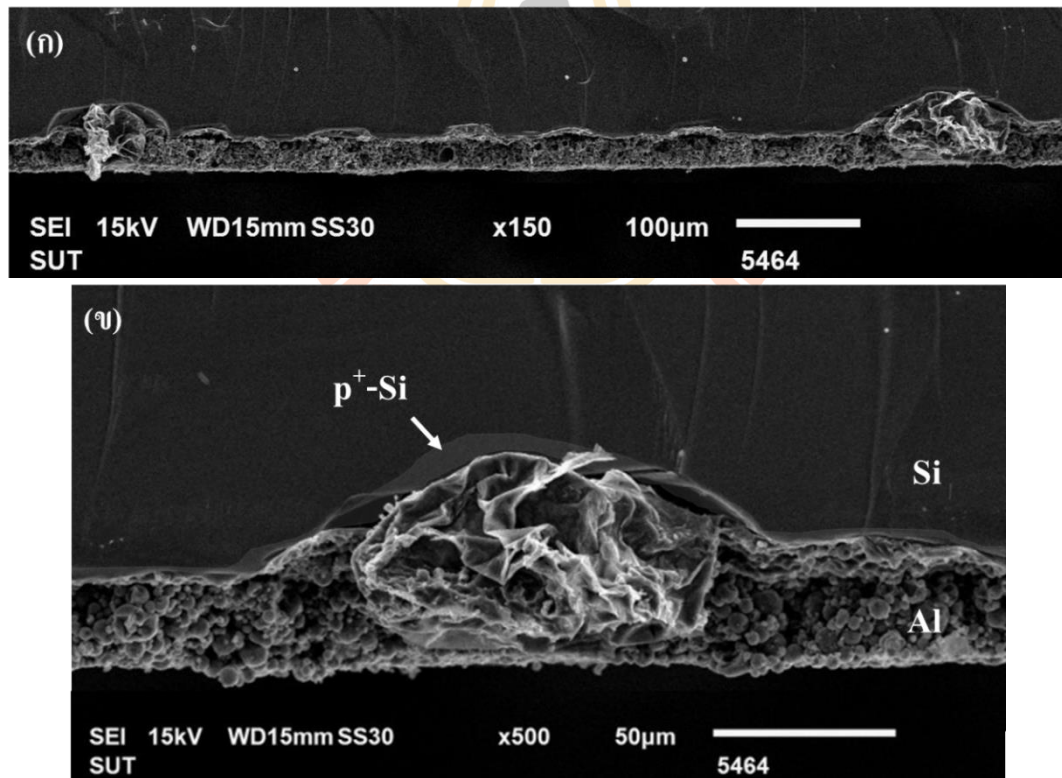
Condition	Aperture ratio (%)	Lifetime at $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (μs)	Surface recombination velocity (cm/s)
Si_3N_4 PECVD/n/p	-	12.51	1599
Si_3N_4 PECVD/n/p/ p^+ / Si_3N_4 PECVD aperture ratio 20%	20	21.46	932
Si_3N_4 PECVD/n/p/ p^+ / Si_3N_4 PECVD aperture ratio 15%	15	26.69	749
Si_3N_4 PECVD/n/p/ p^+ / Si_3N_4 PECVD aperture ratio 10%	10	22.42	892

อัตราการเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่พื้นผิวจะสัมพันธ์กับค่าช่วงชีวิตของพาหะดังสมการที่ (4.3) เมื่อค่าช่วงชีวิตของพาหะมีค่าสูงขึ้น จะมีความสัมพันธ์กับการลดลงของอัตราการเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่พื้นผิว สามารถส่งผลกระทบต่อ V_{oc} และ J_{sc} ที่สูงขึ้นและส่งผลต่อ η ที่สูงขึ้นของเซลล์แสงอาทิตย์ในที่สุด จากตารางที่ 4.6 พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ด้านหลังมีอัตราการเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่พื้นผิวระหว่าง 749 - 932 cm/s ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน แสดงให้เห็นว่าการมีบริเวณ p^+ -Si และชั้นฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ในเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF นั้น ช่วยปรับปรุงการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิวและสอดคล้องกับ η ที่สูงขึ้น

การวิเคราะห์ผลการแลกเปลี่ยนเฟสของอะลูมิเนียมและซิลิคอน (Al-Si) บริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ได้ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) บริษัท JEOL รุ่น JSM-6010LV ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แสดงภาพเครื่องในรูปที่ 4.17 SEM มีหลักการจากการสร้างภาพโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวของชิ้นงานและแปลงสัญญาณอิเล็กตรอนเป็นภาพ ซึ่งภาพที่ได้จะมีกำลังขยายสูงและสามารถจำแนกลักษณะรายละเอียดได้ถึง 10 nm นำมาใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นงานรวมถึงสามารถวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในชิ้นงาน



รูปที่ 4.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM-6010LV



รูปที่ 4.18 ภาพตัดขวางเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p⁺-Si และบริเวณช่องเปิด
ชั้นฟิล์ม Si₃N₄ PECVD ด้านหลัง (ก) ที่กำลังขยาย 150 เท่า (ข) ที่กำลังขยาย 500 เท่า

ภาพตัดขวางเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ด้านหลังที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว แสดงดังรูปที่ 4.18 จากภาพจะพบบริเวณ Alloy ของ Al-Si และบริเวณ p^+ -Si ความหนาประมาณ $8 \mu m$ ภายในช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 PECVD ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการเกิดขึ้น Al - BSF ในบทที่ 2

4.3 การจำลองผลด้วย PC1D ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 ด้านหลัง

โปรแกรม PC1D เป็นโปรแกรมสำหรับการสร้างแบบจำลองการวัดประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างรอยต่อ p/n รวมถึงเซลล์แสงอาทิตย์ ภายใต้การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้ออกแบบไว้อย่างเหมาะสม ดังนั้นโปรแกรม PC1D จึงเหมาะสำหรับการออกแบบ พัฒนาและทำนายประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบการจำลองผลของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 ด้านหลังกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานด้วยเงื่อนไขเดียวกับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในโรงงานอุตสาหกรรม และนำผลการวัดค่าการสะท้อนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis ค่าช่วงอายุของพาหะและอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่พื้นผิวด้วยเครื่อง Lifetime tester นำมาใช้เป็นตัวแปรในโปรแกรม PC1D ซึ่งค่าตัวแปรได้กำหนดในตารางที่ 4.7

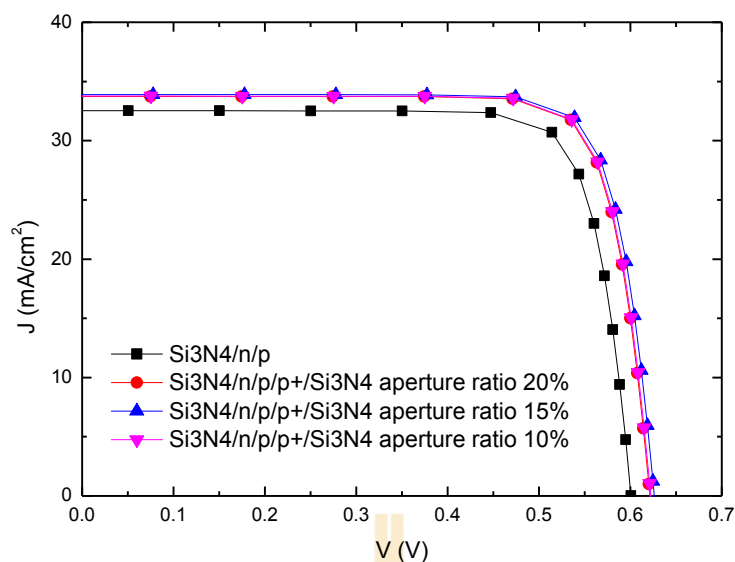
เมื่อนำค่าช่วงชีวิตของพาหะและอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่พื้นผิวในเงื่อนไขที่กำหนดมาคำนวณด้วยโปรแกรม PC1D ที่ความเข้มแสง $0.1 W/cm^2$ มาตรฐาน AM1.5 จะได้ว่ารูปที่ 4.19 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (V) และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (J) ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานและเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 ด้านหลังที่สัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดตั้งแต่ 10 - 20% ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) ความหนาแน่นของกระแสลัดวงจร (J_{sc}) ฟิลแฟคเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) แสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si_3N_4 ด้านหลังมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงกว่า 1.43% เมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน

ตารางที่ 4.7 การกำหนดตัวแปรสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการแปลงพลังงานด้วยโปรแกรม PC1D

	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{n/p}$	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{n/p/p}^+/\text{Si}_3\text{N}_4$ aperture ratio 20%	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{n/p/p}^+/\text{Si}_3\text{N}_4$ aperture ratio 15%	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{n/p/p}^+/\text{Si}_3\text{N}_4$ aperture ratio 10%
Device area (cm^2)	243.36			
Thickness (μm)	180			
Front and rear surface texture: Depth (μm)	3			
Background doping type	p-type			
Background doping concentration (cm^{-3})	8.065×10^{15}			
Background doping resistivity ($\Omega\cdot\text{cm}$)	1.8			
Emitter contact: Internal series resistance (Ω)	1×10^{-3}			
Base contact: Internal series resistance (Ω)	5×10^{-4}			
Internal shunt elements: Conductor (S)	2.5×10^{-3}			
Front side film reflectance (%)	1.5			
Front side film thickness (nm)	85			
Front side film index	2.08			

ตารางที่ 4.7 การกำหนดตัวแปรสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการแปลงพลังงานด้วยโปรแกรม PC1D (ต่อ)

	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{n/p}$	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{n/p/p}^+/\text{Si}_3\text{N}_4$ aperture ratio 20%	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{n/p/p}^+/\text{Si}_3\text{N}_4$ aperture ratio 15%	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{n/p/p}^+/\text{Si}_3\text{N}_4$ aperture ratio 10%
Rear side film reflectance (%)	-	80	85	90
Rear side film thickness (nm)	-	100		
Rear side film index	-	2.1		
Front side diffusion	n-type			
Front side doping concentration (cm^{-3})	4.833×10^{19}			
Front side sheet resistance (Ω/sheet)	120			
Rear side diffusion	p-type			
Rear side doping concentration (cm^{-3})	6.902×10^{19}			
Rear side sheet resistance (Ω/sheet)	46.79			
Recombination (μs)	12.51	21.46	26.69	22.42
Front surface recombination velocity (cm/s)	1×10^3			
Rear surface recombination velocity (cm/s)	1600	931.97	749.34	892.06

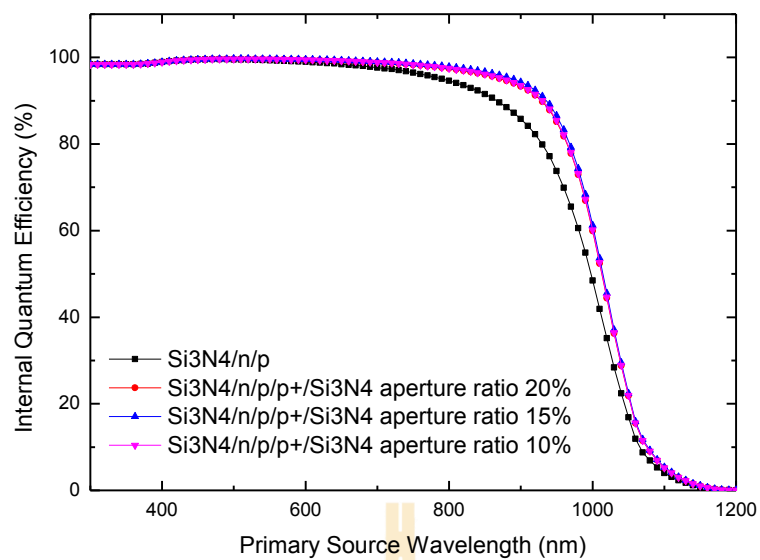


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (V) และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (J) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลอง PC1D

ตารางที่ 4.8 ผลการวัดค่าทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลอง PC1D

เงื่อนไข	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	η (%)	η_{gain} (%)
Si ₃ N ₄ /n/p	0.601	32.53	80.83	15.79	-
Si ₃ N ₄ /n/p/p ⁺ /Si ₃ N ₄ aperture ratio 20%	0.621	33.73	81.06	16.99	1.19
Si ₃ N ₄ /n/p/p ⁺ /Si ₃ N ₄ aperture ratio 15%	0.626	33.89	81.15	17.22	1.43
Si ₃ N ₄ /n/p/p ⁺ /Si ₃ N ₄ aperture ratio 10%	0.622	33.76	81.07	17.03	1.24

รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพของการผลิตพาหะที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ (Quantum efficiency, QE) จะพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p⁺-Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si₃N₄ ด้านหลังจะสามารถดูดกลืนคลื่นแสงสีแดง (ความยาวคลื่นสูง) ได้เพิ่มขึ้นจากการสะท้อนกลับภายในเมื่อมีชั้น Si₃N₄ ด้านหลังที่เป็นชั้นพาสซีเวชัน ทำให้การรวมตัวใหม่ของพาหะลดลงและผลิตพาหะได้มากขึ้น ลดการสูญเสียประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงควอนตัมกับความยาวคลื่นช่วงต่าง ๆ ที่ได้จากแบบจำลอง PC1D



บทที่ 5

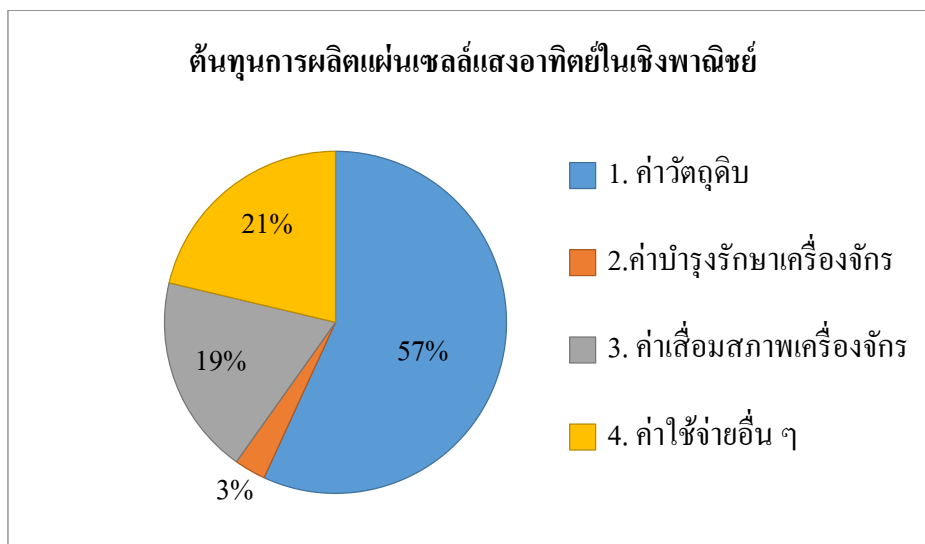
การศึกษาเชิงเศรษฐศาสตร์ และวิเคราะห์ผล

การศึกษาและวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงเศรษฐศาสตร์มีความสำคัญในการประเมินความคุ้มค่าต่อการลงทุน ต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์มาจากส่วนหลัก ๆ ที่ประกอบด้วยค่าวัสดุ ค่าเครื่องจักร ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักร ค่าเสื่อมสภาพและค่าใช้จ่ายอื่น ๆ แสดงรายละเอียดในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ส่วนประกอบของต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์

1. ค่าวัสดุ	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)
	Paste	Silver (Ag) Paste
Aluminium (Al) Paste		
Screen และ Squeegee rubber		
2. ค่าบำรุงรักษา	เครื่องจักร	ค่าซ่อมบำรุง เช่น สายพาน, มอเตอร์, หลอดไฟ, ท่อแก๊ส, ท่อสารเคมี และชิ้นส่วนเสื่อมสภาพอื่นๆ
3. ค่าเสื่อมสภาพ	เครื่องจักร	ค่าเสื่อมสภาพ = $\frac{\text{ราคาต้นทุน} - \text{ราคาซาก}}{\text{อายุการใช้งาน}}$
4. ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ		ค่าจ้างพนักงาน, วัสดุสิ้นเปลือง, ค่าน้ำ, ค่าไฟและอื่น ๆ

รูปที่ 5.1 แสดงสัดส่วนของต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าวัตถุดิบ เช่น แผ่นซิลิคอนหลายผลึก สารเคมี และก๊าซมีสัดส่วนสูงสุดประมาณ 57% ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด และมูลค่าการซ่อมบำรุงเครื่องจักรมีสัดส่วนน้อยที่สุดประมาณ 3%



รูปที่ 5.1 สัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของประเภทต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนในเชิงพาณิชย์

ในงานศึกษานี้ได้นำข้อมูลต้นทุนการผลิตจากบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) มาเป็นข้อมูลของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานเปรียบเทียบกับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกด้านหลังในงานวิจัย เพื่อคาดการณ์ค่าใช้จ่ายในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ (บาท/วัตต์) จากสมการที่ (5.1)

$$\text{ราคาต้นทุน (บาท/วัตต์)} = \frac{\text{ราคาต้นทุนทั้งหมด (บาท)}}{\text{จำนวนวัตต์ที่ผลิตได้ทั้งหมด (วัตต์)}} \quad (5.1)$$

ตารางที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานอุตสาหกรรมในประเทศไทย กับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกด้านหลัง โดยได้นำข้อมูลประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจากการจำลองค่าด้วยโปรแกรม PC1D มาใช้ในการคำนวณจำนวนวัตต์ที่ผลิตได้

ตารางที่ 5.2 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนหลายผลึก โครงสร้างมาตรฐาน
อุตสาหกรรมในประเทศไทยกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si
และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม ไดโอดีเล็กทริกด้านหลัง

โครงสร้างราคา	ราคาต้นทุนต่อวัตต์ (บาท/วัตต์)	
	$Si_3N_4/n/p$ (15.79%)	$Si_3N_4/n/p/p^+/Si_3N_4$ (17.22%)
1. ค่าวัตถุดิบ		
วัตถุดิบมาตรฐาน	3.86	3.54
วัตถุดิบที่เพิ่มขึ้นมา	-	0.31
ผลรวม	3.86	3.85
2. ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักร		
เครื่องจักรมาตรฐาน	0.20	0.19
เครื่องประทับลาย	-	0.0001
ผลรวม	0.20	0.19
3. ค่าเสื่อมสภาพเครื่องจักร		
เครื่องจักรมาตรฐาน	1.28	1.18
เครื่องประทับลาย	-	0.0005
ผลรวม	1.28	1.18
4. ค่าใช้จ่ายอื่น ๆ	1.45	1.33
ผลรวมทั้งหมด	6.79	6.54

ผลการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตพบว่า การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม ไดโอดีเล็กทริกด้านหลัง มีขั้นตอนที่เพิ่มขึ้นจากการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน แสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนราคาของหนึ่งเซลล์ที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม ไดโอดีเล็กทริกด้านหลังที่ผลิตด้วยเทคนิคการประทับลาย คาดการณ์ว่าเมื่อผลิตในขนาดอุตสาหกรรม จะให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงขึ้นอีก 1.43% ทำให้ราคาต้นทุนต่อวัตต์ลดลงมากกว่า 3.71% ดังนั้น เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม ไดโอดีเล็กทริกด้านหลัง จึงมีความคุ้มค่าต่อการลงทุนในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมได้

บทที่ 6

สรุปงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปงานวิจัย

ในการสังเคราะห์สารละลายโบรอน พบว่าสารละลายโบรอนที่มีเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอน 0.15% และทำการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ 1150°C เป็นเวลา 30 นาที จะมีความต้านทานไฟฟ้าแผ่นที่ต่ำที่สุด ได้แก่ 46.79 Ω /sheet ซึ่งต่ำกว่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของแผ่นฐานซิลิคอน (90 Ω /sheet) 48.08% เหมาะสำหรับเป็นบริเวณ p^+ -Si

การสังเคราะห์ฟิล์มไดอิเล็กทริก (Dielectric) สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ ฟิล์ม PSG/BSG จากกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน ฟิล์ม SiO_2 จากกระบวนการ Dry oxidation ฟิล์ม Si_3N_4 จากกระบวนการ Sputtering และ PECVD ซึ่งนำมาใช้เป็นชั้นพาสซีเวชันสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้าง Local back passivation ได้

การเปิดช่องลวดลายชั้นพาสซีเวชันด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถทำได้ด้วยวิธีการประทับลายด้วยสารละลาย HF ซึ่งเป็นกระบวนการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน ลวดลายที่ได้มีความคมชัด และมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% เมื่อเทียบกับลวดลายที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Layout

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ โครงสร้าง LBSF ขนาดไม่ต่ำกว่า 9 ตารางเซนติเมตร ด้วยเทคนิคการประทับลาย ทำได้ 2 โครงสร้าง ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลัง พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น n -Si ในช่วง 110 - 130 Ω /sheet และสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์ม BSG ด้านหลังที่ 15% จะให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงที่สุด คือ 5.30% และเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p^+ -Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกด้านหลัง พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์ม Si_3N_4 PECVD เป็นชั้นพาสซีเวชันด้านหลังและสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดของชั้นฟิล์มด้านหลังที่ 15% จะให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงที่สุด คือ 8.76% อีกทั้งเมื่อนำโครงสร้างที่ดีที่สุดมาจำลองด้วยโปรแกรม PCID จะพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบโครงสร้าง LBSF มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างอุตสาหกรรม 1.43%

6.2 ข้อเสนอแนะ

- 6.2.1 ในขั้นตอนกระบวนการสร้างเซลล์ต้นแบบควรที่จะรักษาความสะอาดอย่างมาก เพื่อป้องกันการเจือปน
- 6.2.2 ในการแพร่สารเชื้อควรใช้เตาเผาที่มีการควบคุมความดัน เพื่อให้เกิดการแพร่อย่างสม่ำเสมอรวดเร็วและไม่มีสิ่งเจือปน
- 6.2.3 ในการประทับลายด้วย Flash foam ควรควบคุมปริมาณสาร และแรงในการประทับลาย เพื่อให้ได้ลวดลายของสารละลายที่คมชัดและสม่ำเสมอ
- 6.2.4 ในการพิมพ์ลายขี้ไฟฟ้า ควรควบคุมแรงสำหรับการพิมพ์ลาย ความหนืดของกาว (Paste) เพื่อให้ได้ลวดลายของขี้ไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ
- 6.2.5 ในการเผาขี้ไฟฟ้าด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว (Fast firing) ควรควบคุมอุณหภูมิและเวลาให้เหมาะสม



รายการอ้างอิง

- Ahmad, S.M., Leong, C.S., Sopian, K., and Zaidi, S.H. (2018). **Role of firing temperature, sheet resistance, and contact area in contact formation on screen-printed metal contact of silicon solar cell.** Journal of Electronic Materials. 47(3): 2120 - 2134.
- Ali, J., Shanmugam, V., Khanna, A., Wang, P., Balaji, N., Tabajonda, R.V., Perez, D.J., Aberle, A.G., and Mueller, T. (2019). **Analysis of nanosecond and femtosecond laser ablation of rear dielectrics of silicon wafer solar cells.** Solar Energy Materials and Solar Cells. 192: 117 - 122.
- Altermatt, P.P., Heiser, G., Dai, X., Jürgens, J., Aberle, A.G., Robinson, S.J., Young, T., Wenham, S.R., and Green, M.A. (1996). **Rear surface passivation of high efficiency silicon solar cells by a floating junction.** Journal of Applied Physics. 80(6): 3574 - 3586.
- 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.
- 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.
- Blakers, A. (2019). **Development of the PERC solar cell.** IEEE Journal of Photovoltaics. 9(3): 629 - 635.
- Cacciato, A., Duerinckx, F., Baert, K., Moors, M., Caremans, T., Leys, G., Mrcarica, M., Picard, E., Ristow, A., and Szlufcik, J. (2013). **Industrial PERL-type Si solar cells with efficiencies exceeding 19.5%.** IEEE Journal of Photovoltaics. 3(2): 628 - 634.
- Das, A. (2012). **Development of high-efficiency boron diffused silicon solar cells.** Georgia Institute of Technology, PhD thesis, United States.

- Das, A., Kim, D. S., Nakayashiki, K., Rounsaville, B., Meemongkolkiat, V., and Rohatgi, A. (2010). **Boron diffusion with boric acid for high efficiency silicon solar cells.** Journal of the Electrochemical Society. 157(6): 684 - 687.
- Davanzo, E.U. (2012). **Aluminum-silicon contact formation through narrow dielectric openings: Application to industrial high efficiency rear passivated solar cells.** International Solar Energy Research Center Konstanz e.V. , PhD thesis, Germany.
- Gao, Y., Zhou, S., Zhang, Y., Dong, C., Pi, X., and Yang, D. (2013). **Doping silicon wafers with boron by use of silicon paste.** Journal of Materials Science & Technology. 29(7): 652 - 654.
- Green, M.A. (1992). **Solar cells.** The University of New South Wales.
- Green M.A. (1987). **High efficiency silicon solar cells.** Trans Tech Publications. Aedermannsdorf, Switzerland.
- Green M.A., Zhao, J., Wang, A., and Wenham, S.R. (1999). **Very high efficiency silicon solar cells-science and technology.** IEEE Transactions on Electron Devices. 46(10): 1940 - 1947.
- Green M.A. (2001). **Crystalline silicon solar cells.** London: Imperial College Press.
- 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.
- He, Y., Xiao, x., Wu, Y., and Fu, J.Z. (2015). **A facile and low-cost micro fabrication material: flash foam.** Scientific Reports. 5: 13522.
- Huang, H., Lv, J., Bao, Y., Xuan, R., Sun, S., Sneck, S., Li, S., Modanese, C., Savin, H., Wang, A., and Zhao, J. (2017). **20.8% industrial PERC solar cell: ALD Al₂O₃ rear surface passivation, efficiency loss mechanisms analysis and roadmap to 24%.** Solar Energy Materials and Solar Cells. 161: 14 - 30.
- Katsu T. (2002). Space solar cell. Google Patents.
- Kim, D.S., Das, A., Meemongkolkiat, V., Ramanathan, S., and Rohatgi, A. (2010). **20% Efficient screen-printed cells with spin-on-dielectric-passivated boron back-surface field.** IEEE Transactions on Electron Devices. 57(10): 2462 - 2469.

- Kim, S., Sojoudi, H., Zhao, H., Mariappan, D., McKinley, G.H., Gleason, K.K., and Hart, A.J. (2016). **Ultrathin high-resolution flexographic printing using nanoporous stamps.** *Science Advances*. 2(12): e1601660.
- Kim, T., Lim, J.K., Shin, L.H.N., Kyeong, D., Cho, J., Kim, M., Lee, J., Park, H., Lee, K., Lee, W.J., and Cho, E.C. (2014). **21%-efficient PERL solar cells with plated front contacts on industrial 156 mm p-type crystalline silicon wafers.** *Energy Procedia*. 55: 431 - 436.
- Krause, J., Woehl, R., Rauer, M., Schmiga, C., Wilde, J., and Biro, D. (2011). **Microstructural and electrical properties of different-sized aluminum-alloyed contacts and their layer system on silicon surfaces.** *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 95: 2151 - 2160.
- Kränzl, A., Kopecek, R., Peter, K., and Fath, P. (2006). **Bifacial solar cells on multicrystalline silicon with boron BSF and open rear contact.** *IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*. 1: 968 - 971.
- Lee, J.Y., and Lee, S.H. (2004). **Boron-back surface field with spin-on dopants by rapid thermal processing.** *Journal of the Korean Physical Society*. 44(6): 1581 - 1586.
- Mangkornkaew, A., and Fangsuwannarak, T. (2017). **Characterization of patterns of localized doping using stamping technique for selective n-emitter solar cell structure.** *5th Asia Conference on Mechanical and Mechanical and Materials Engineering (ACMME 2017)*. 1: 1 - 4.
- Navarrete, E. (2015). **Optimization of processes for the rear side of monocrystalline silicon solar cells.** The University of Málaga, PhD thesis, Spain.
- Norouzi, M.H., Saint-Cast, P., Lohmüller, E., Steinhäuser, B., Benick, J., Werner, S., Bitnar, B., Palinginis, P., Neuhaus, H., Hofmann, M., and Wolf, A. (2017). **Development and characterization of multifunctional PassDop layers for local p⁺-laser doping.** *Energy Procedia*. 124: 891 - 900.
- Park, S., Park, H., Kang, Y., Lee, H.S., and Kim, D. (2016). **Analysis of aluminum back surface field at different wafer specifications in crystalline silicon solar cells.** *Current Applied Physics*. 16: 1062 - 1068.

- Phiwpha, N., and Fangsuwannarak, T. (2013). **Surface passivation of point-contacted solar cells by inkjet printing**. *Integrated Ferroelectrics*. 149(1): 102 - 106.
- Singh, G., Verma, A., and Jeyakumar, R. (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.
- Urrejola, E., Peter, K., Plagwitz, H., and Schubert, G. (2011). **Distribution of silicon in the aluminum matrix for rear passivated solar cells**. *Energy Procedia*. 8: 331 - 336.
- Utama, R.Y. (2009). **Inkjet printing for commercial high-efficiency silicon solar cells**. The University of New South Wales, PhD thesis, Australia.
- Wang, A. (1992). **High efficiency PERC and PERL silicon solar cells**. The University of New South Wales, PhD thesis, Australia.
- Wang, Z., Han, P., Lu, H., Qian, H., Chen, L., Meng, Q., Tang, N., Gao, F., Jiang, Y., Wu, J., Wu, W., Zhu, H., Ji, J., Shi, Z., Sugianto, A., Ma, L., Hallam, B., and Wenham, S. (2012). **Advanced PERC and PERL production cells with 20.3% record efficiency for standard commercial p-type silicon wafers**. *Progress in Photovoltaic: Res. Appl.* 20(3): 260 - 268.
- Xiao, S., and Xu, S. (2014). **High-Efficiency Silicon Solar Cells - Materials and Devices Physics**. *Solid State and Materials Sciences*. 39: 277 - 317.
- Yao, G. (2005). **High efficiency metal stencil printed silicon solar cells**. The University of New South Wales, PhD thesis, Australia.
- Yoshinori, I., Yuka, T., Haruhiko, I., and Takashi, S. (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.
- Yuka, T., Yoshinori, I., Haruhiko, I., Takashi, S., Jochen, L., Petra, M., and Ingrid, R. (2017). **Analysis of contact recombination at rear local back surface field via boron laser doping and screen-printed aluminum metallization on p-type PERC solar cells**. *Energy Procedia*. 124: 384 - 391.
- Zhao, J., Wang, A., Altermatt, P.P., Wenham, S.R., and Green, M. A. (1996). **24% Efficient PERL silicon solar cell: Recent improvements in high efficiency silicon cell research**. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 41/42: 87 - 99.

- Zhao, J., Wang, A., and Green, M. A. (2001). **High-efficiency PERL and PERT silicon solar cells on FZ and MCZ substrates.** Solar Energy Materials and Solar Cells. 65(1-4): 429 - 435.
- Zhao, J. (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.
- Zhuang, Y.F., Zhong, S.H., Liang, X.J., Kang, H.J., Li, Z.P., and Shen, W.Z. (2019). **Application of SiO₂ passivation technique in mass production of silicon solar cells.** Solar Energy Materials and Solar Cells. 193: 379 - 386.



ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นฐานซิลิคอนด้วยวิธี

Radio Corporation of America (RCA)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การทำความสะอาดแผ่นฐานซิลิคอนด้วยวิธี Radio Corporation of America (RCA)

การทำความสะอาดแผ่นฐานซิลิคอนเป็นขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้ใช้วิธี Radio Corporation of America (RCA) โดยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำจัดชั้นออกไซด์ (Native oxide) ด้วยสารละลาย Hydrofluoric acid (HF) โดยการนำชิ้นงานจุ่มแช่ในสารละลาย HF5% เป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นนำแผ่นฐานซิลิคอนล้างด้วยน้ำ Deionized (Deionized water) โดยให้น้ำ Deionized ไหลผ่านเป็นเวลา 3 - 5 นาที แล้วทำการเป่าแผ่นฐานซิลิคอนให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

ขั้นตอนที่ 2 RCA1 เป็นการกำจัดสารอินทรีย์ (Organic) ออกจากผิวของแผ่นฐานซิลิคอน โดยสารละลายประกอบด้วย Ammonium hydroxide (NH_4OH), Hydrogen peroxide (H_2O_2) และ Deionized water (H_2O) ในอัตราส่วน $NH_4OH : H_2O_2 : H_2O$ เท่ากับ 1 : 1 : 5 และนำแผ่นฐานซิลิคอนแช่ในสารละลายและให้อุณหภูมิคงที่ที่ $70^\circ C$ เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำแผ่นฐานซิลิคอนล้างด้วยน้ำ Deionized โดยให้น้ำ Deionized ไหลผ่านเป็นเวลา 3 - 5 นาที แล้วทำการเป่าแผ่นฐานซิลิคอนให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

ขั้นตอนที่ 3 RCA2 เป็นการกำจัดไอออนโลหะ (Metal ion) ออกจากผิวของแผ่นฐานซิลิคอน โดยสารละลายประกอบด้วย Hydrochloric acid (HCl), Hydrogen peroxide (H_2O_2) และ Deionized water (H_2O) ในอัตราส่วน $HCl : H_2O_2 : H_2O$ ที่อัตราส่วน 1 : 1 : 5 และนำแผ่นฐานซิลิคอนแช่ในสารละลายและให้อุณหภูมิคงที่ที่ $70^\circ C$ เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำแผ่นฐานซิลิคอนล้างด้วยน้ำ Deionized โดยให้น้ำ Deionized ไหลผ่านเป็นเวลา 3 - 5 นาที แล้วทำการเป่าแผ่นฐานซิลิคอนให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is centered on the page. It features a stylized golden structure resembling a traditional Thai temple or a book, with a silhouette of a person standing in front of it. Below the structure is a circular emblem with a book and a sunburst pattern. The university's name is written in Thai script around the bottom of the emblem.

ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอนในสารละลายโบรอน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอนในสารละลายโบรอน

วิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอนในสารละลายโบรอน แสดงรายละเอียด ดังนี้ โดยตัวอย่างจะแสดงวิธีการคำนวณในเงื่อนไขของสารละลายโบรอนที่มีเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอน 0.15% ซึ่งอัตราส่วนของสารตั้งต้นแสดงดังตารางที่ ข.1 และมวลโมเลกุล (Molecular weight) และความหนาแน่น (Density) ของสารตั้งต้นมีค่าดังตารางที่ ข.2

ตารางที่ ข.1 ปริมาตรส่วนประกอบของสารละลายโบรอนที่มีเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอน 0.15%

%Atomic of boron	ปริมาตร (ml)					
	TEOS	EtOH	H ₂ O	H ₃ BO ₃ : H ₂ O	HCl	CTAB : H ₂ O
0.15	5	1.5	10	6.005	0.005	1.853

ตารางที่ ข.2 มวลโมเลกุลและความหนาแน่นของสารตั้งต้นของสารละลายโบรอน

สารตั้งต้น	มวลโมเลกุล (g/mol)	ความหนาแน่น (g/ml)
TEOS, Si(OC ₂ H ₅) ₄	208.33	0.93
EtOH, C ₂ H ₅ OH	46.07	0.79
Deionized water, H ₂ O	18.02	1.00
Boric acid, H ₃ BO ₃	61.83	1.44
Hydrochloric acid, HCl	36.50	1.19
CTAB, C ₁₉ H ₄₂ BrN	364.45	-

- การคำนวณมวลของ H₃BO₃ และปริมาตรของ H₂O จากการสารละลาย H₃BO₃ : H₂O ในอัตราส่วน 6 wt% ของ H₃BO₃ ปริมาตร 6.005 ml สามารถคำนวณได้ดังนี้
สารละลาย H₃BO₃ : H₂O ปริมาตร 100 ml มีมวลของ H₃BO₃ เป็น 6 g

$$\text{สารละลาย H}_3\text{BO}_3 : \text{H}_2\text{O} \text{ ปริมาตร 6.005 ml มีมวลของ H}_3\text{BO}_3 \text{ เป็น } \frac{6 \text{ g} \times 6.005 \text{ ml}}{100 \text{ ml}} = 0.3603 \text{ g}$$

ปริมาตรของ H_3BO_3 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ข.1)

$$\text{ปริมาตรของสารตั้งต้น (ml)} = \frac{\text{มวลของสารตั้งต้น (g)}}{\text{ความหนาแน่นของสารตั้งต้น (g/ml)}} \quad (\text{ข.1})$$

$$\text{ปริมาตรของ } \text{H}_3\text{BO}_3 \text{ เป็น } \frac{0.3603 \text{ g}}{1.44 \text{ g/ml}} = 0.2502 \text{ ml}$$

$$\text{ปริมาตรของ } \text{H}_2\text{O} \text{ เป็น } 6.005 - 0.2502 = 5.755 \text{ ml}$$

ดังนั้น มวลของ H_3BO_3 เป็น 0.3603 g และปริมาตรของ H_2O เป็น 5.755 ml

- การคำนวณมวลของ HCl และปริมาตรของ H_2O จากปริมาตร 0.005 ml โดยสารละลาย HCl ที่ใช้มีความเข้มข้น 37 w/v % สามารถคำนวณได้ดังนี้

สารละลาย HCl ปริมาตร 100 ml มีมวลของ HCl เป็น 37 g

$$\text{สารละลาย HCl ปริมาตร 0.005 ml มีมวลของ HCl เป็น } \frac{37 \text{ g} \times 0.005 \text{ ml}}{100 \text{ ml}} = 0.0019 \text{ g}$$

$$\text{ปริมาตรของ HCl เป็น } \frac{0.0019 \text{ g}}{1.19 \text{ g/ml}} = 0.0016 \text{ ml}$$

$$\text{ปริมาตรของ } \text{H}_2\text{O} \text{ เป็น } 0.005 - 0.0016 = 0.0034 \text{ ml}$$

ดังนั้น มวลของ HCl เป็น 0.0019 g และปริมาตรของ H_2O เป็น 0.0034 ml

- การคำนวณมวลของ CTAB และปริมาตรของ H_2O จากการสารละลาย CTAB : H_2O ความเข้มข้น 0.1M ของ CTAB ปริมาตร 1.853 ml สามารถคำนวณได้ดังนี้

สารละลาย CTAB ปริมาตร 1000 ml มีสาร CTAB เป็น $0.1 \text{ mol} \times 364.5 \text{ g/mol} = 36.45 \text{ g}$

$$\text{สารละลาย CTAB ปริมาตร 1.853 ml มีสาร CTAB เป็น } \frac{36.45 \text{ g} \times 1.853 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} = 0.0675 \text{ g}$$

สาร CTAB ที่ใช้มีความบริสุทธิ์ 96% ดังนั้นมวลของ CTAB สามารถคำนวณได้ดังนี้

สาร CTAB ปริมาณ 96 g มีมวลของ CTAB เป็น 100 g

สาร CTAB ปริมาณ 0.0675 g มีมวลของ CTAB เป็น $\frac{0.0675 \text{ g} \times 100 \text{ ml}}{96 \text{ ml}} = 0.07 \text{ g}$

ดังนั้น มวลของ CTAB เป็น 0.07 g และปริมาตรของ H₂O เป็น 1.853 ml

- การคำนวณมวลของ TEOS, EtOH และ H₂O สามารถคำนวณได้ดังนี้

มวลของ TEOS เป็น 5 ml x 0.93 g/ml = 4.67 g

มวลของ EtOH เป็น 1.5 ml x 0.79 g/ml = 1.19 g

ดังนั้น มวลของ H₂O เป็น (10 + 5.755 + 0.0034 + 1.853) ml x 1.00 g/ml = 17.61 g

- การคำนวณจำนวน โมลของสารตั้งต้น สามารถคำนวณ ได้ดังสมการที่ (ข.2)

$$\text{จำนวน โมลของสารตั้งต้น (mol)} = \frac{\text{มวลของสารตั้งต้น (g)}}{\text{มวล โมเลกุลของสารตั้งต้น (g/mol)}} \quad (\text{ข.2})$$

ปริมาตร มวล และจำนวน โมลของสารตั้งต้นที่ได้จากการคำนวณ แสดงดังตารางที่ ข.3

ตารางที่ ข.3 ปริมาตร มวลและจำนวน โมลของสารตั้งต้นของสารละลายโบรอน

สารตั้งต้น	ปริมาตร (ml)	มวล (g)	จำนวน โมล (mol)
TEOS, Si(OC ₂ H ₅) ₄	5	4.67	2.24x10 ⁻²
EtOH, C ₂ H ₅ OH	1.5	1.19	2.57x10 ⁻²
Deionized water, H ₂ O	17.61	17.61	9.78 x10 ⁻¹
Boric acid, H ₃ BO ₃	0.250	0.36	5.83 x10 ⁻³
Hydrochloric acid, HCl	0.002	0.00	5.07 x10 ⁻⁵
CTAB, C ₁₉ H ₄₂ BrN	-	0.07	1.93 x10 ⁻⁴

- การคำนวณจำนวนโมเลกุลอะตอมของสารตั้งต้น สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (ข.3)

$$\text{จำนวนโมเลกุลอะตอม (atoms)} = \text{จำนวนโมล (mol)} \times 6.02 \times 10^{23} \frac{\text{atoms}}{\text{mol}} \times \text{จำนวนอะตอม} \quad (\text{ข.3})$$

- การคำนวณความหนาแน่นอะตอมของสารตั้งต้น สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (ข.4)

$$\text{ความหนาแน่นอะตอมสารตั้งต้น (atoms/cm}^3\text{)} = \frac{\text{จำนวนโมเลกุลอะตอมสารตั้งต้น (atoms)}}{\text{ปริมาณสารละลายทั้งหมด (ml)}} \quad (\text{ข.4})$$

- การคำนวณเปอร์เซ็นต์ของอะตอมสารตั้งต้น สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (ข.5)

$$\text{เปอร์เซ็นต์อะตอมสารตั้งต้น (\%)} = \frac{\text{ความหนาแน่นอะตอมสารตั้งต้น (atoms/cm}^3\text{)}}{\text{ความหนาแน่นอะตอมทั้งหมด (atoms/cm}^3\text{)}} \times 100 \quad (\text{ข.5})$$

เนื่องจากอะตอมของสารตั้งต้นมีมากกว่า 1 อะตอม ดังนั้นจึงแสดงจำนวนโมเลกุลอะตอม ความหนาแน่นอะตอมและเปอร์เซ็นต์ของอะตอมสารตั้งต้น ดังตารางที่ ข.4

ตารางที่ ข.4 จำนวนโมเลกุลอะตอม ความหนาแน่นอะตอมและเปอร์เซ็นต์ของอะตอมสารตั้งต้นของสารละลายโบรอน

สารตั้งต้น/อะตอม	Si	C	H	O	B	Br	N	Cl	ผลรวม
TEOS, $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$	1	8	20	4	0	0	0	0	33
EtOH, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	0	2	6	1	0	0	0	0	9
Deionized water, H_2O	0	0	2	1	0	0	0	0	3
Boric acid, H_3BO_3	0	0	3	3	1	0	0	0	7
Hydrochloric acid, HCl	0	0	1	0	0	0	0	1	2
CTAB, $\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{BrN}$	0	19	42	0	0	1	1	0	63
จำนวนอะตอม	1	29	74	9	1	1	1	1	117
จำนวน โมเลกุลอะตอม (atoms)	1.35×10^{22}	1.41×10^{23}	1.55×10^{24}	6.68×10^{23}	3.51×10^{21}	1.16×10^{20}	1.16×10^{20}	3.05×10^{19}	2.38×10^{24}
ความหนาแน่นอะตอม (atoms/cm ³)	5.53×10^{20}	5.79×10^{21}	6.38×10^{22}	2.74×10^{22}	1.44×10^{20}	4.77×10^{18}	4.77×10^{18}	1.25×10^{18}	9.78×10^{22}
เปอร์เซ็นต์ของอะตอม (%)	0.57	5.92	65.29	28.07	0.15	0.005	0.005	0.001	100

ภาคผนวก ค

วิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัสในสารละลายฟอสฟอรัส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัสในสารละลายฟอสฟอรัส

วิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัสในสารละลายฟอสฟอรัส แสดงรายละเอียดดังนี้ โดยตัวอย่างจะแสดงวิธีการคำนวณในเงื่อนไขของสารละลายฟอสฟอรัสที่มีเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัส 0.38% ซึ่งอัตราส่วนของสารตั้งต้น มวลโมเลกุล (Molecular weight) และความหนาแน่น (Density) ของสารตั้งต้นมีค่าดังตารางที่ ค.1

ตารางที่ ค.1 ปริมาตร มวลโมเลกุล และความหนาแน่นส่วนประกอบของสารละลายฟอสฟอรัสที่มีเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัส 0.38%

สารตั้งต้น	ปริมาตร (ml)	มวลโมเลกุล (g/mol)	ความหนาแน่น (g/ml)
TEOS, Si(OC ₂ H ₅) ₄	5	208.33	0.93
EtOH, C ₂ H ₅ OH	1.5	46.07	0.79
Deionized water, H ₂ O	10	18.02	1.00
Phosphoric acid, H ₃ PO ₄	0.714	98.00	1.69

- การคำนวณมวลของ H₃PO₄ และปริมาตรของ H₂O จากปริมาตร 0.714 ml โดยสารละลาย H₃PO₄ ที่ใช้มีความเข้มข้น 85 v/v% สามารถคำนวณได้ดังนี้
สารละลาย H₃PO₄ ปริมาตร 100 ml มีปริมาตรของ H₃PO₄ เป็น 85 ml
สารละลาย H₃PO₄ ปริมาตร 0.714 ml มีปริมาตรของ H₃PO₄ เป็น 0.607 ml
มวลของ H₃PO₄ เป็น 0.607 ml x 1.69 g/ml = 1.026 g
ปริมาตรของ H₂O เป็น 0.714 - 0.607 = 0.107 ml
ดังนั้น มวลของ H₃PO₄ เป็น 1.026 g และปริมาตรของ H₂O เป็น 0.107 ml

- การคำนวณมวลของ TEOS, EtOH และ H₂O สามารถคำนวณได้ดังนี้
มวลของ TEOS เป็น 5 ml x 0.93 g/ml = 4.67 g
มวลของ EtOH เป็น 1.5 ml x 0.79 g/ml = 1.19 g
มวลของ H₂O เป็น (10 + 0.107) ml x 1.00 g/ml = 10.107 g

- การคำนวณจำนวนโมลของสารตั้งต้น สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (ค.1)

$$\text{จำนวน โมลของสารตั้งต้น (mol)} = \frac{\text{มวลของสารตั้งต้น (g)}}{\text{มวล โมเลกุลของสารตั้งต้น (g/mol)}} \quad (\text{ค.1})$$

ปริมาตร มวล และจำนวน โมลของสารตั้งต้นที่ได้จากการคำนวณ แสดงดังตารางที่ ค.2

ตารางที่ ค.2 ปริมาตร มวลและจำนวน โมลของสารตั้งต้นของสารละลายฟอสฟอรัส

สารตั้งต้น	ปริมาตร (ml)	มวล (g)	จำนวน โมล (mol)
TEOS, Si(OC ₂ H ₅) ₄	5	4.67	2.24x10 ⁻²
EtOH, C ₂ H ₅ OH	1.5	1.19	2.57x10 ⁻²
Deionized water, H ₂ O	10.11	10.11	5.61x10 ⁻¹
Phosphoric acid, H ₃ PO ₄	0.607	1.03	1.05x10 ⁻²

- การคำนวณจำนวน โมเลกุลอะตอมของสารตั้งต้น สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (ค.2)

$$\text{จำนวนโมเลกุลอะตอม (atoms)} = \text{จำนวน โมล (mol)} \times 6.02 \times 10^{23} \frac{\text{atoms}}{\text{mol}} \times \text{จำนวนอะตอม} \quad (\text{ค.2})$$

- การคำนวณความหนาแน่นอะตอมของสารตั้งต้น สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (ค.3)

$$\text{ความหนาแน่นอะตอมสารตั้งต้น (atoms/cm}^3\text{)} = \frac{\text{จำนวน โมเลกุลอะตอมสารตั้งต้น (atoms)}}{\text{ปริมาณสารละลายทั้งหมด (ml)}} \quad (\text{ค.3})$$

- การคำนวณเปอร์เซ็นต์ของอะตอมสารตั้งต้น สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (ค.4)

$$\text{เปอร์เซ็นต์อะตอมสารตั้งต้น (\%)} = \frac{\text{ความหนาแน่นอะตอมสารตั้งต้น (atoms/cm}^3\text{)}}{\text{ความหนาแน่นอะตอมทั้งหมด (atoms/cm}^3\text{)}} \times 100 \quad (\text{ค.4})$$

เนื่องจากอะตอมของสารตั้งต้นมีมากกว่า 1 อะตอม ดังนั้นจึงแสดงจำนวน โมเลกุลอะตอม ความหนาแน่นอะตอมและเปอร์เซ็นต์ของอะตอมสารตั้งต้น ดังตารางที่ ค.3

ตารางที่ ค.3 จำนวนโมเลกุลอะตอม ความหนาแน่นอะตอมและเปอร์เซ็นต์ของอะตอมสารตั้งต้นของสารละลายฟอสฟอรัส

สารตั้งต้น / อะตอม	Si	C	H	O	P	ผลรวม
TEOS, Si(OC ₂ H ₅) ₄	1	8	20	4	0	33
EtOH, C ₂ H ₅ OH	0	2	6	1	0	9
Deionized water, H ₂ O	0	0	2	1	0	3
Phosphoric acid, H ₃ PO ₄	0	0	3	4	1	8
จำนวนอะตอม	1	10	31	10	1	53
จำนวน โมเลกุลอะตอม (atoms)	1.35×10^{22}	1.39×10^{23}	1.06×10^{24}	4.32×10^{23}	6.30×10^{21}	1.65×10^{24}
ความหนาแน่นอะตอม (atoms/cm ³)	7.83×10^{20}	8.06×10^{21}	6.14×10^{22}	2.51×10^{22}	3.66×10^{20}	9.57×10^{22}
เปอร์เซ็นต์ของอะตอม (%)	0.82	8.42	64.14	26.24	0.38	100

ภาคผนวก ง

วิธีการคำนวณหาความถี่ของอะตอมสารเจือวิธีของ Fick's first law

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิธีการคำนวณหาความลึกของอะตอมสารเจือวิธีของ Fick's first law

จากความหนาแน่นของอะตอมโบรอนและฟอสฟอรัสที่ได้จากการคำนวณจะส่งผลถึงความลึกของชั้น p⁺-Si และ n-Si ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ได้หาค่าความลึกของชั้น p⁺-Si และ n-Si ด้วยวิธีการคำนวณ โดยใช้วิธีของ Fick's first law ซึ่งกำหนดให้ปริมาณสารเจือที่ใช้ในการแพร่มีแบบไม่จำกัดจากฟิล์มสารเจือที่เตรียมได้ การคำนวณจะใช้ฟิล์มของสารละลายโบรอนที่มีเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอน 0.15% และทำการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ 1150°C เป็นเวลา 30 นาที เป็นตัวอย่างในการคำนวณความลึกของชั้น p⁺-Si

จากสมการที่ (ง.1) ของ Fick's first law

$$\frac{N_{(x,t)}}{N_0} = \text{erfc} \cdot z \quad (\text{ง.1})$$

โดยที่ $N_{(x,t)}$ คือ ความหนาแน่นของสารเจือที่ตำแหน่ง x ใด ๆ และเวลา t ใด ๆ (atoms/cm³)

N_0 คือ ความหนาแน่นของสารเจือที่ผิว (atoms/cm³)

$\text{erfc} \cdot z$ คือ Complementary error function ของ z

จาก $N_{(x,t)} = 1 \times 10^{16}$ atoms/cm³ เป็นความหนาแน่นของสารเจือในตำแหน่งที่ลึกที่สุด มีค่าเท่ากับ ความหนาแน่นของแผ่นฐานซิลิคอน

$N_0 = N_{\text{boron}} = 1.47 \times 10^{20}$ atoms/cm³ เป็นความหนาแน่นของสารเจือที่จะแพร่ได้

จะได้
$$\text{erfc} \cdot z = \frac{1 \times 10^{16} \text{ atom/cm}^3}{1.47 \times 10^{20} \text{ atom/cm}^3} = 6.82 \times 10^{-5}$$

จากสมการที่ (ง.2)
$$\text{erfc} \cdot z = 1 - \text{erf} \cdot z \quad (\text{ง.2})$$

จะได้
$$\text{erf} \cdot z = 1 - \text{erfc} \cdot z = 1 - (6.82 \times 10^{-5}) = 0.9999318$$

จากตาราง Error function จะได้ $z = 2.817$

จากสมการที่ (ง.3) ของสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusivity)

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right) \quad (\text{ง.3})$$

โดยที่ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ที่อุณหภูมิการแพร่จำเพาะ (cm^2/s)

D_0 คือ ค่าคงที่การแพร่ของสารเจือ ในที่นี้เป็นของ โบรอนมีค่าเท่ากับ $0.76 \text{ cm}^2/\text{s}$

E_A คือ พลังงานที่ใช้ในการแพร่ ในที่นี้เป็นของ โบรอนมีค่าเท่ากับ 3.46 eV

k คือ ค่าคงตัวของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ $8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

T คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่ ในที่นี้เป็น $273 + 1150^\circ\text{C} = 1423 \text{ K}$

จะได้
$$D = (0.76 \text{ cm}^2/\text{s}) \exp\left(-\frac{3.46 \text{ eV}}{(8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K})(1423\text{K})}\right) = 4.27 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$$

จากสมการที่ (ง.4) ของความลึกของสารเจือ

$$x = 2z\sqrt{Dt} \quad (\text{ง.4})$$

โดยที่ x คือ ระยะทางความลึกของการแพร่สารเจือ (μm)

t คือ เวลาที่ใช้ในการแพร่ ในที่นี้เป็น $30 \times 60 = 1800 \text{ s}$

จะได้
$$x = 2(2.817)\sqrt{(4.27 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s})(1800\text{s})} = 1.56 \times 10^{-4} \text{ cm} = 1.56 \mu\text{m}$$

ดังนั้นจากการคำนวณด้วยวิธีของ Fick's first law ค่าความลึกของชั้น $p^+\text{-Si}$ ที่ได้จากการแพร่ฟิล์มของสารละลายโบรอนที่มีเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอน 0.15% และทำการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ 1150°C เป็นเวลา 30 นาที มีค่าเท่ากับ $1.56 \mu\text{m}$

ค่าความลึกของชั้น $p^+\text{-Si}$ ที่ได้จากการแพร่สารเจือโบรอนและค่าความลึกของชั้น $n\text{-Si}$ ที่ได้จากการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสในเงื่อนไขต่าง ๆ จากการคำนวณด้วยวิธีของ Fick's first law แสดงดังตารางที่ ง.1 และ ง.2 ตามลำดับ

ตารางที่ ง.1 ค่าความลึกของชั้น p⁺-Si ที่ได้จากการแพร่สารเจือโบรอนในเงื่อนไขต่าง ๆ

%Atomic of boron	อุณหภูมิในการแพร่ (°C)	เวลาในการแพร่ (นาที)	ความลึกของชั้น p ⁺ -Si (μm)
0.150	1000	60	0.42
	1050		0.76
	1100		1.32
	1150	15	1.10
		30	1.56
		60	2.21
0.100	1150	30	1.52
0.125			1.54
0.300			1.63

ตารางที่ ง.2 ค่าความลึกของชั้น n-Si ที่ได้จากการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสในเงื่อนไขต่าง ๆ

%Atomic of phosphorus	อุณหภูมิในการแพร่ (°C)	เวลาในการแพร่ (นาที)	ความลึกของชั้น n-Si (μm)
0.382	1000	60	0.5766
0.377			0.5759
0.372			0.5752
0.367			0.5749
0.363			0.5745
0.358			0.5741

ภาคผนวก จ

ขั้นตอนการเตรียม Flash foam

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขั้นตอนการเตรียม Flash foam

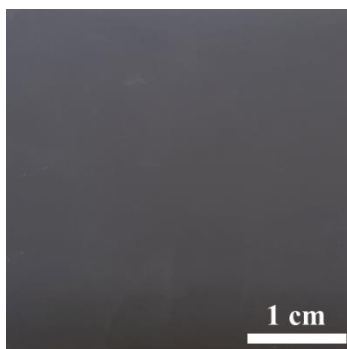
ขั้นตอนการเตรียม Flash foam กระจาย เริ่มจากการออกแบบลวดลายหน้ากากทึบแสง ป้องกันแสงแฟลชขนาด 3 cm x 3 cm ในที่นี้ได้ทำการออกแบบลวดลายแบบลายเส้นขนาด 250 μm ที่มีลักษณะเดียวกันกับลวดลายของเลเซอร์ โดยให้มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (Aperture ratio) อยู่ระหว่าง 5 - 30% แสดงดังตารางที่ จ.1 ซึ่งสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (จ.1)

$$\text{สัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (\%)} = \frac{\text{พื้นที่ช่องเปิด}}{\text{พื้นที่ช่องปิด}} \times 100 \quad (\text{จ.1})$$

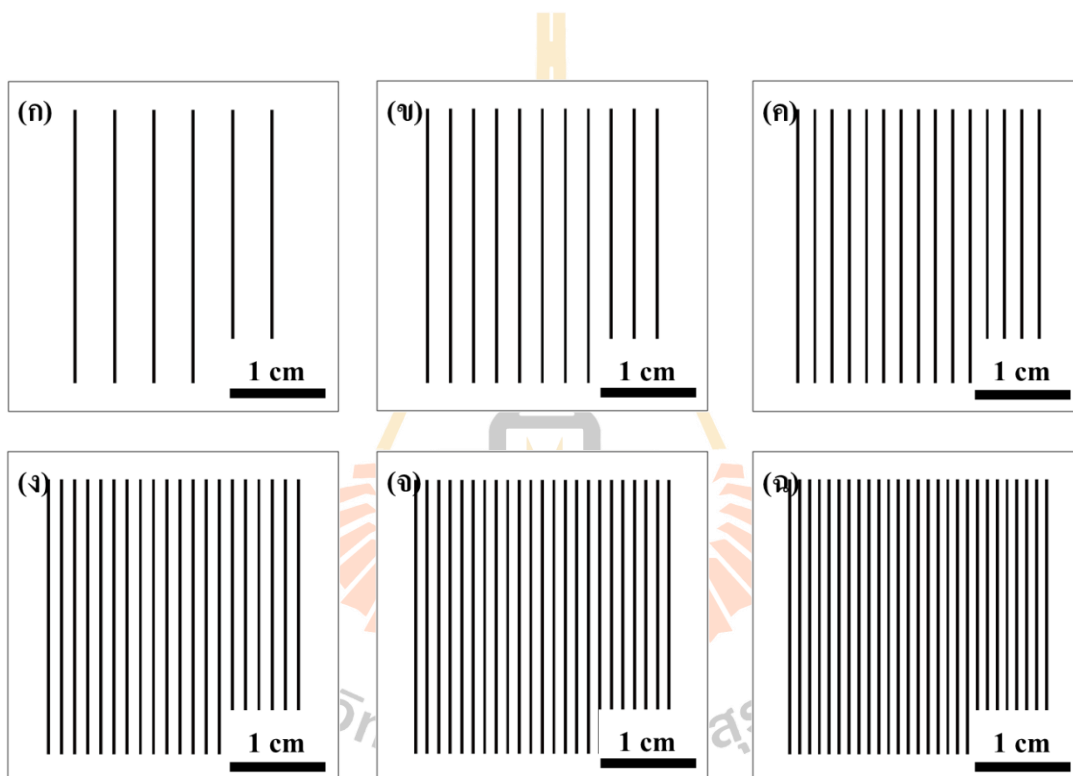
ตารางที่ จ.1 ความยาวทั้งหมดและพื้นที่ของช่องเปิดและช่องปิด และสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด

ช่องเปิด		ช่องปิด		สัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (%)
ความยาวทั้งหมด (cm)	พื้นที่ (cm^2)	ความยาวทั้งหมด (cm)	พื้นที่ (cm^2)	
0.150	0.450	2.850	8.550	5
0.275	0.825	2.725	8.175	10
0.400	1.200	2.600	7.800	15
0.500	1.500	2.500	7.500	20
0.600	1.800	2.400	7.200	25
0.700	2.100	2.300	6.900	30

จากนั้นนำ Flash foam แสดงดังรูปที่ จ.1 และหน้ากากทึบแสงป้องกันแสงแฟลชที่เตรียมไว้แสดงดังรูปที่ จ.2 เข้าเครื่อง Flash Stamp รุ่น JL-V ที่ห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยใช้ระดับความเข้มของแสงเท่ากับ 3.5 แสดงดังรูปที่ จ.3 แสงแฟลชจะทำปฏิกิริยากับ Flash foam ได้ลวดลายเป็นลักษณะบริเวณช่องเปิดและช่องปิดตามที่ออกแบบไว้แสดงดังรูปที่ จ.4



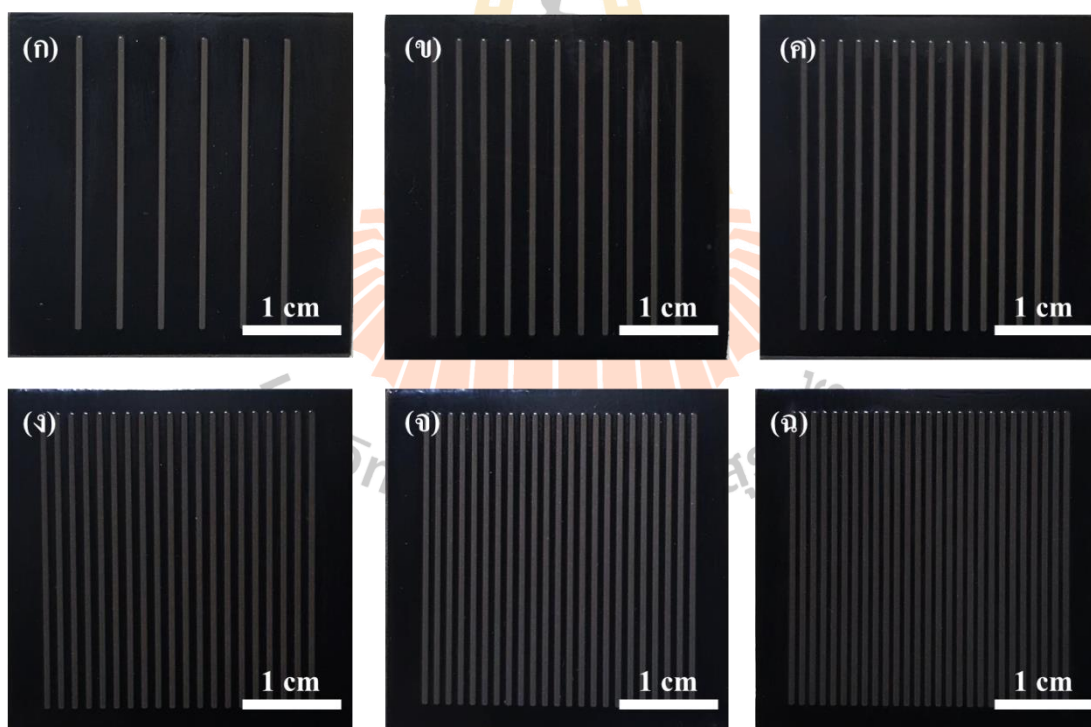
รูปที่ จ.1 แผ่น Flash foam ก่อนการฟลชแสงสร้างลวดลาย



รูปที่ จ.2 หน้ากากทึบแสงป้องกันแสงฟลชลวดลายช่องเปิดขนาด 250 μm โดยมีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (ก) 5% (ข) 10% (ค) 15% (ง) 20% (จ) 25% และ (ฉ) 30%



รูปที่ จ.3 เครื่อง Flash Stamp รุ่น JL-V



รูปที่ จ.4 แผ่น Flash foam ภายหลังการแฟลชแสงลดทลายช่องเปิดขนาด $250\ \mu\text{m}$ โดยมีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (ก) 5% (ข) 10% (ค) 15% (ง) 20% (จ) 25% และ (ฉ) 30%

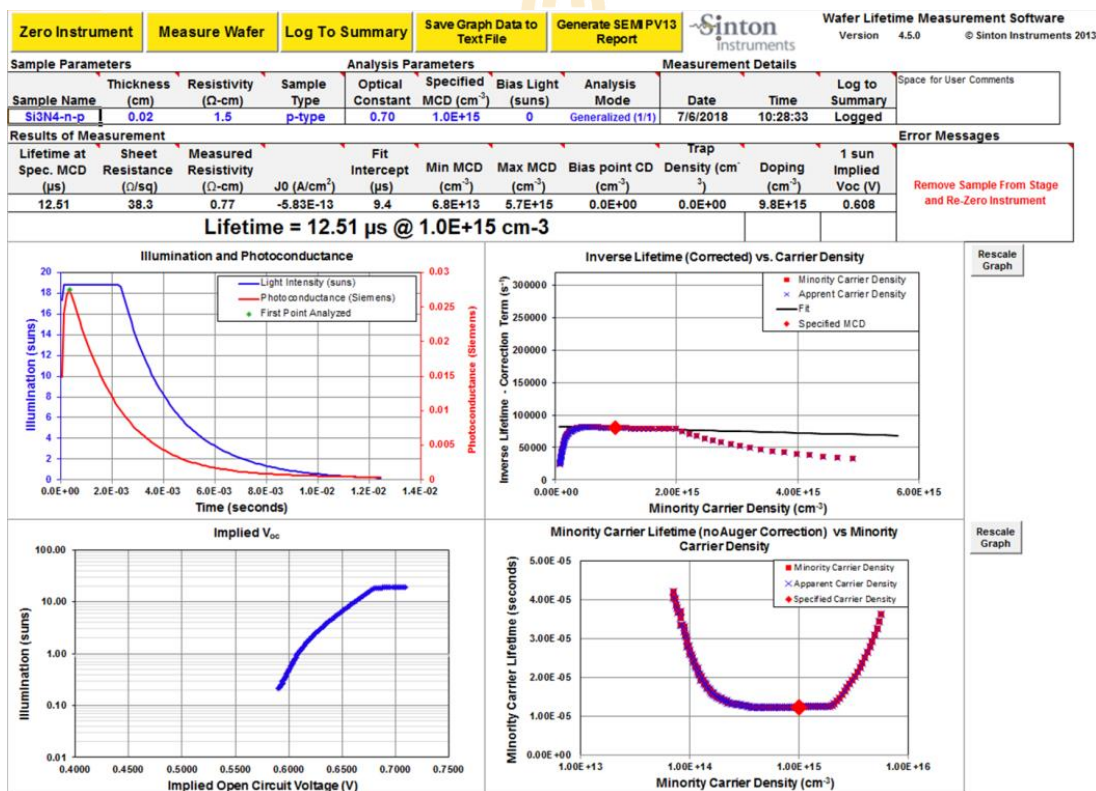


ภาคผนวก จ

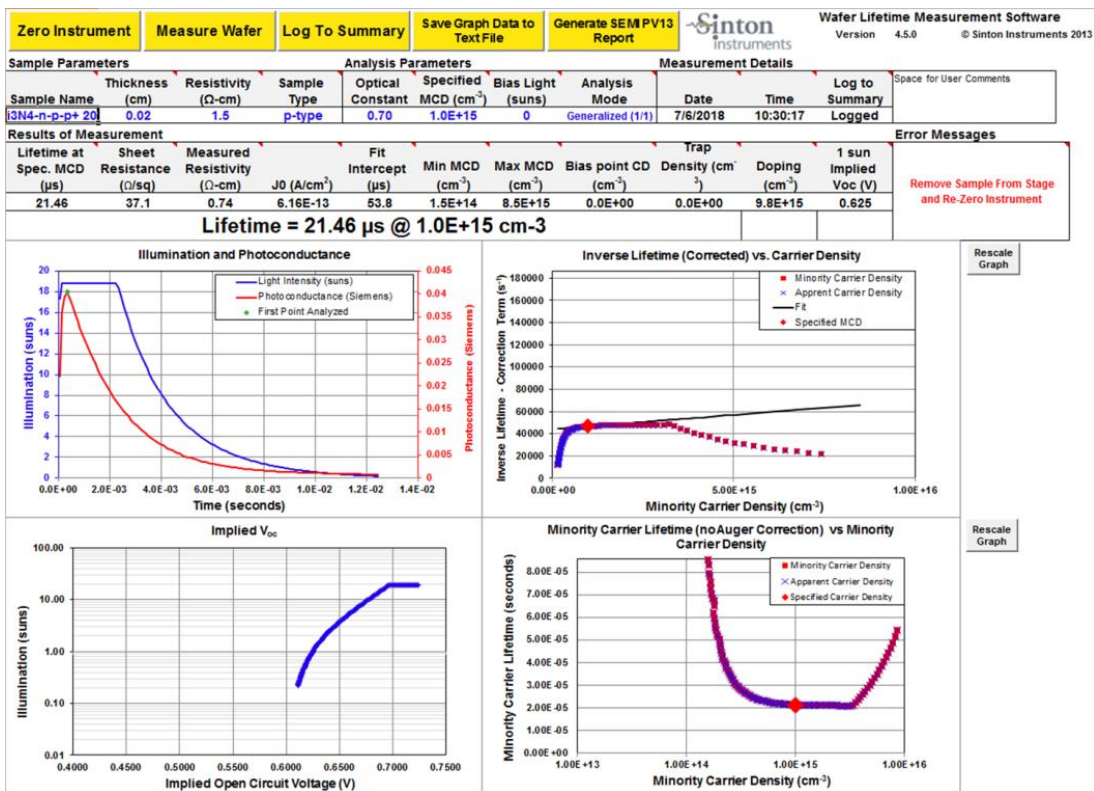
ผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะ (Lifetime) ด้วยเครื่อง
Photoconductance lifetime tester

ผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะ (Lifetime) ด้วยเครื่อง Photoconductance lifetime tester

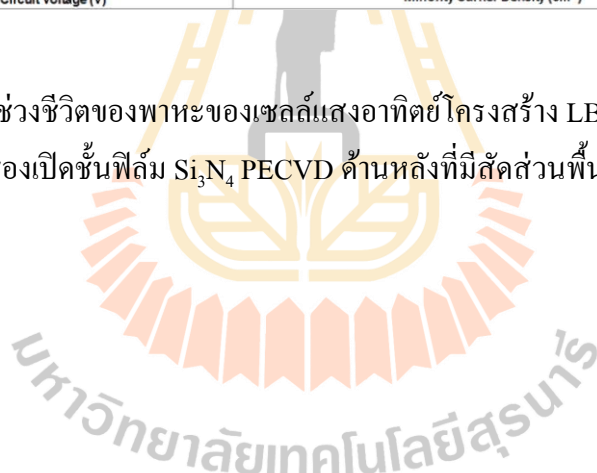
รายละเอียดผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง Photoconductance lifetime tester ยี่ห้อ Sinton instrument รุ่น WCT-120 โดยใช้เทคนิค Quasi-steady-state photoconductance (QSSPC) ที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ดังแสดงในบทที่ 4 ซึ่งผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะที่พื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p⁺-Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si₃N₄ PECVD ด้านหลังเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน แสดงดังรูปที่ น.1 - น.4

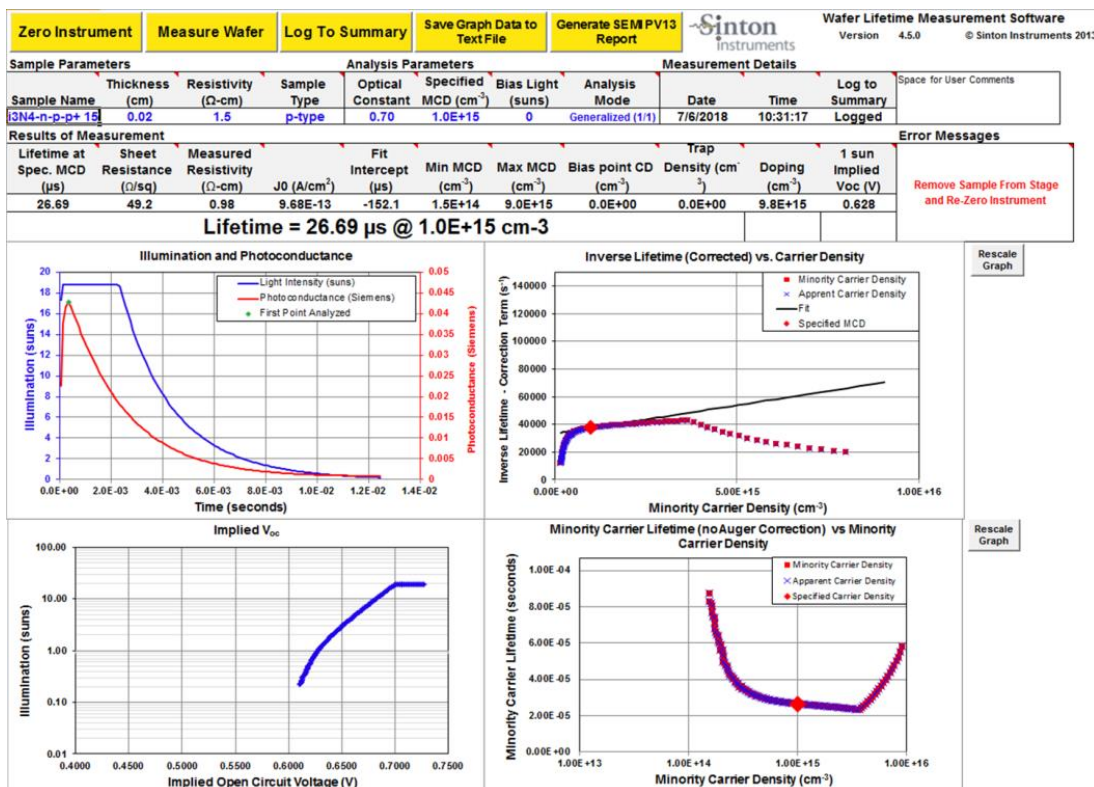


รูปที่ น.1 ผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐาน



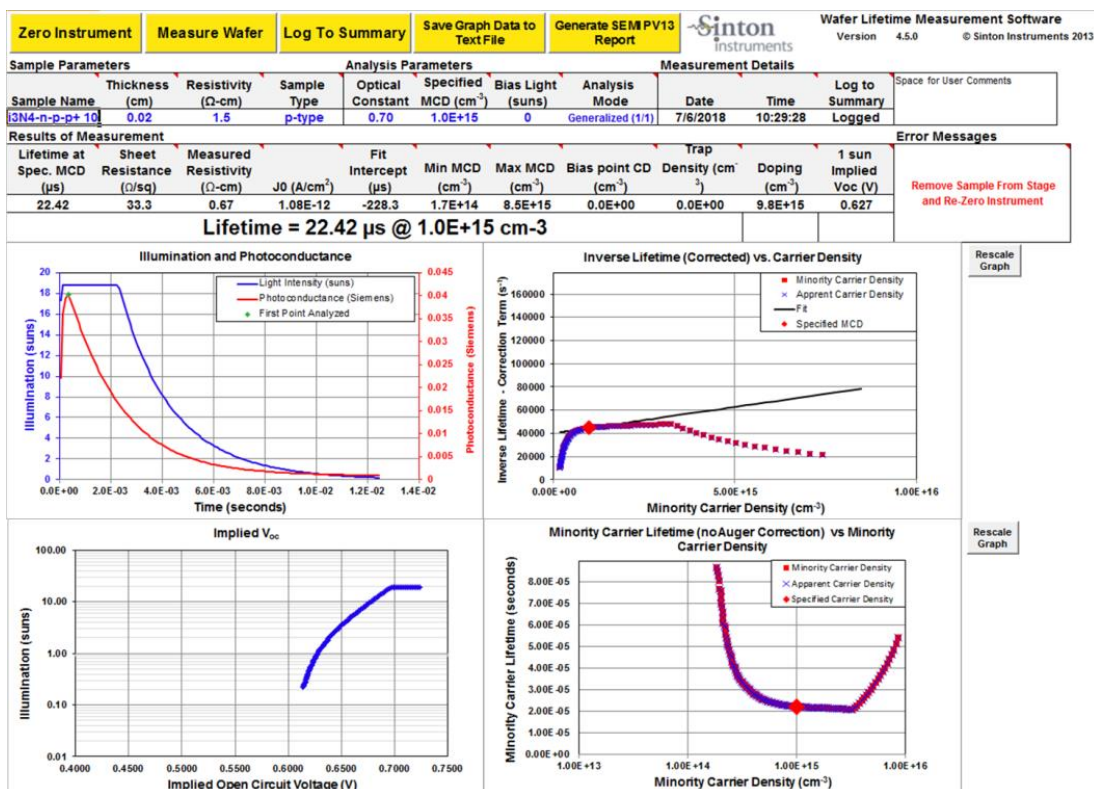
รูปที่ ๓.2 ผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p⁺-Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si₃N₄ PECVD ด้านหลังที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด 20%



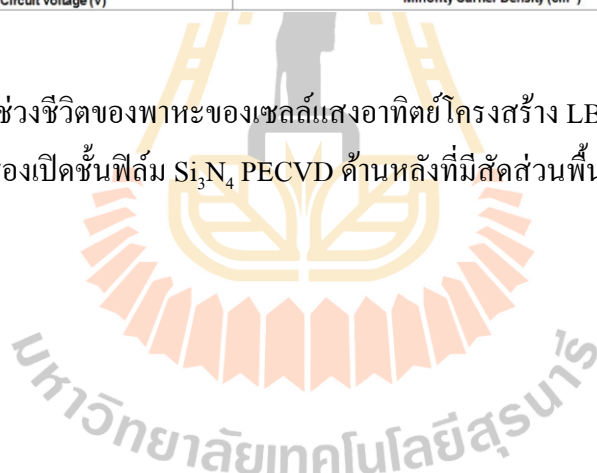


รูปที่ ๓. ผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p⁺-Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si₃N₄ PECVD ด้านหลังที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด 15%





รูปที่ ๓.4 ผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p⁺-Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si₃N₄ PECVD ด้านหลังที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด 10%



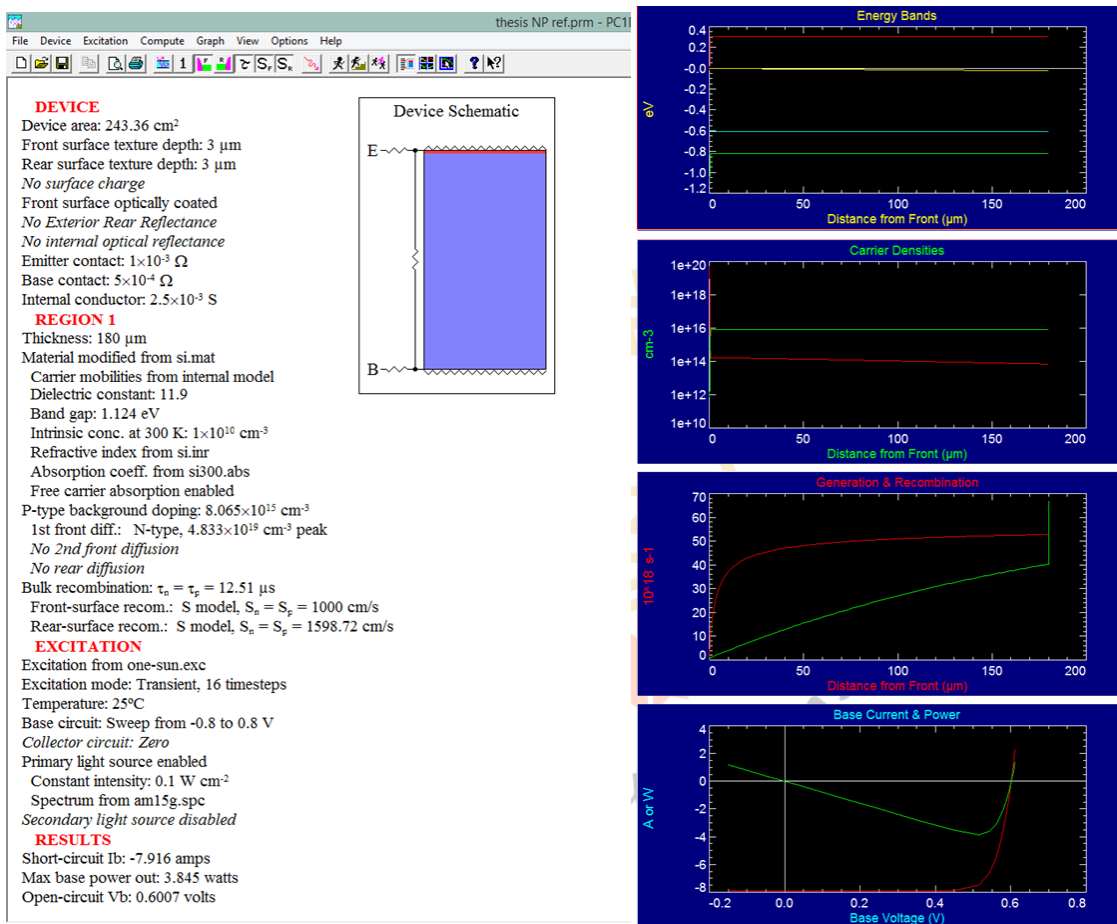
ภาคผนวก ช

ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม PC1D

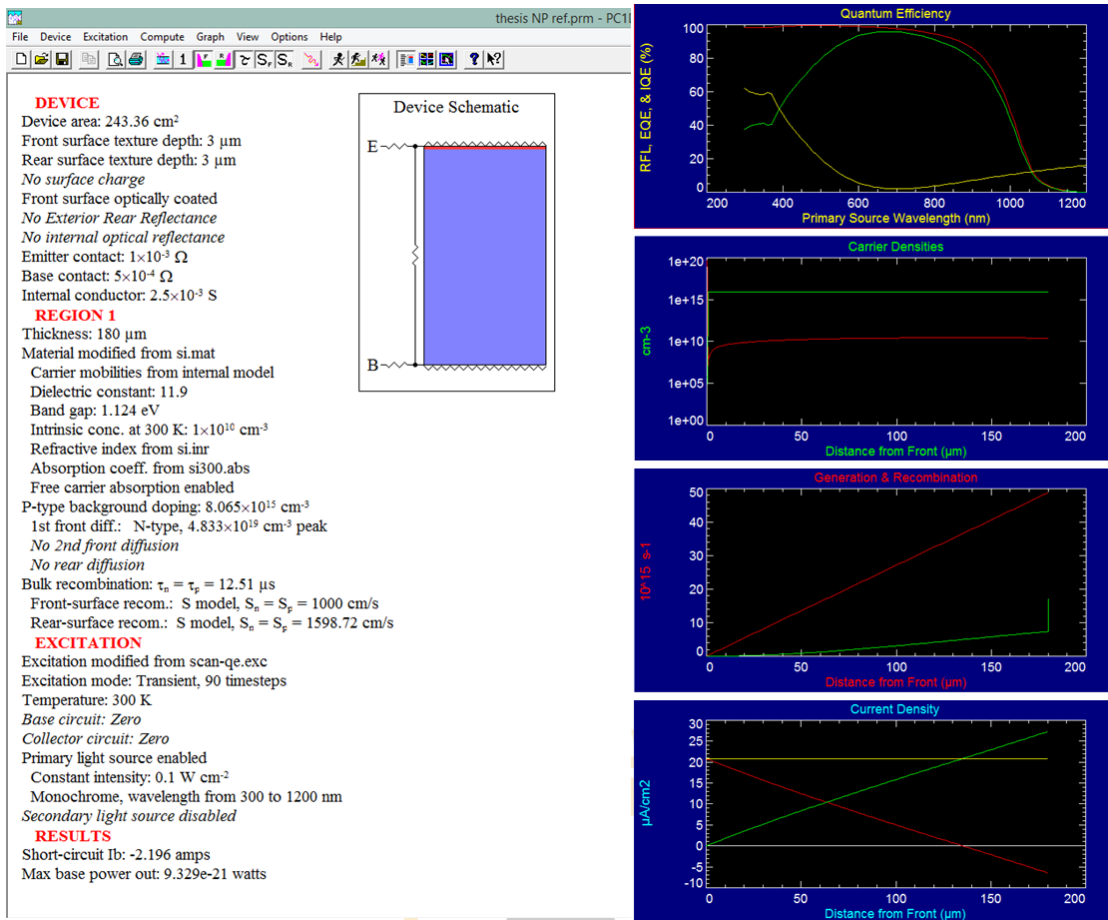
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม PC1D

การจำลองผลของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเงื่อนไขเดียวกับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีการนำผลการวัดค่าการสะท้อนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis ค่าช่วงอายุของพาหะและอัตราการเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่พื้นผิวด้วยเครื่อง Lifetime tester มาใช้แทนค่าในโปรแกรม PC1D ร่วมด้วย แสดงผลดังรูปที่ ข.1 - ข.8

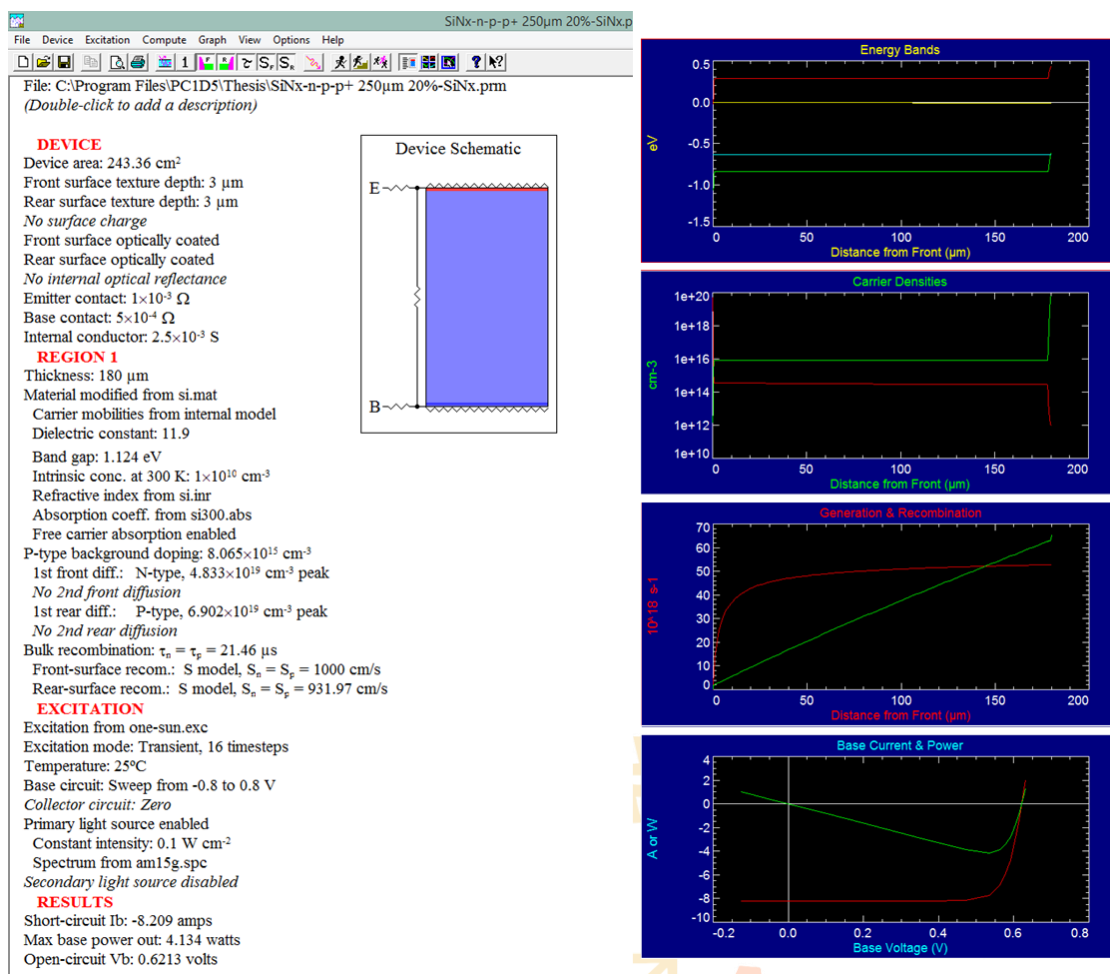


รูปที่ ข.1 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานด้วยโปรแกรม PC1D โดยใช้เงื่อนไขการกระตุ้นแบบ One-sun

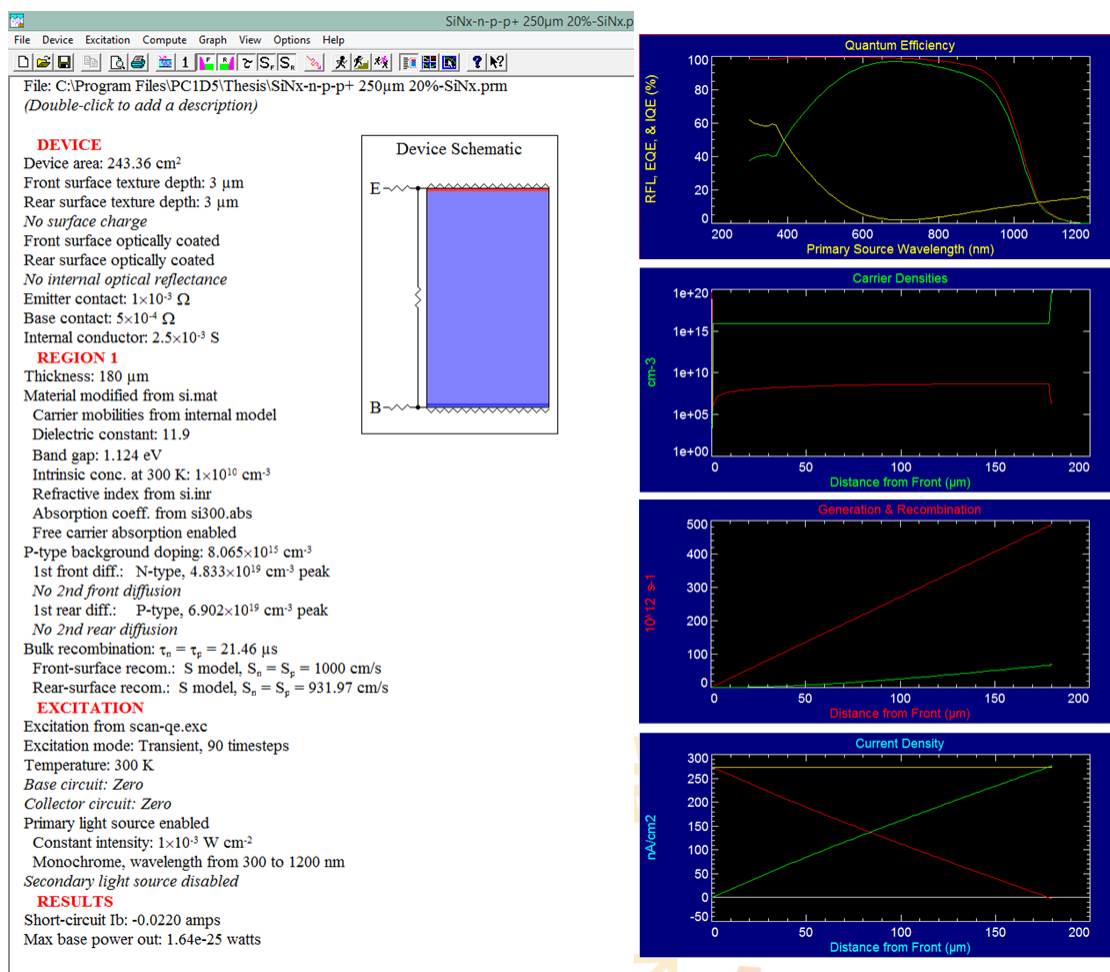


รูปที่ ข.2 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานด้วยโปรแกรม PC1D โดยใช้เงื่อนไขการกระตุ้นแบบ Scan-QE

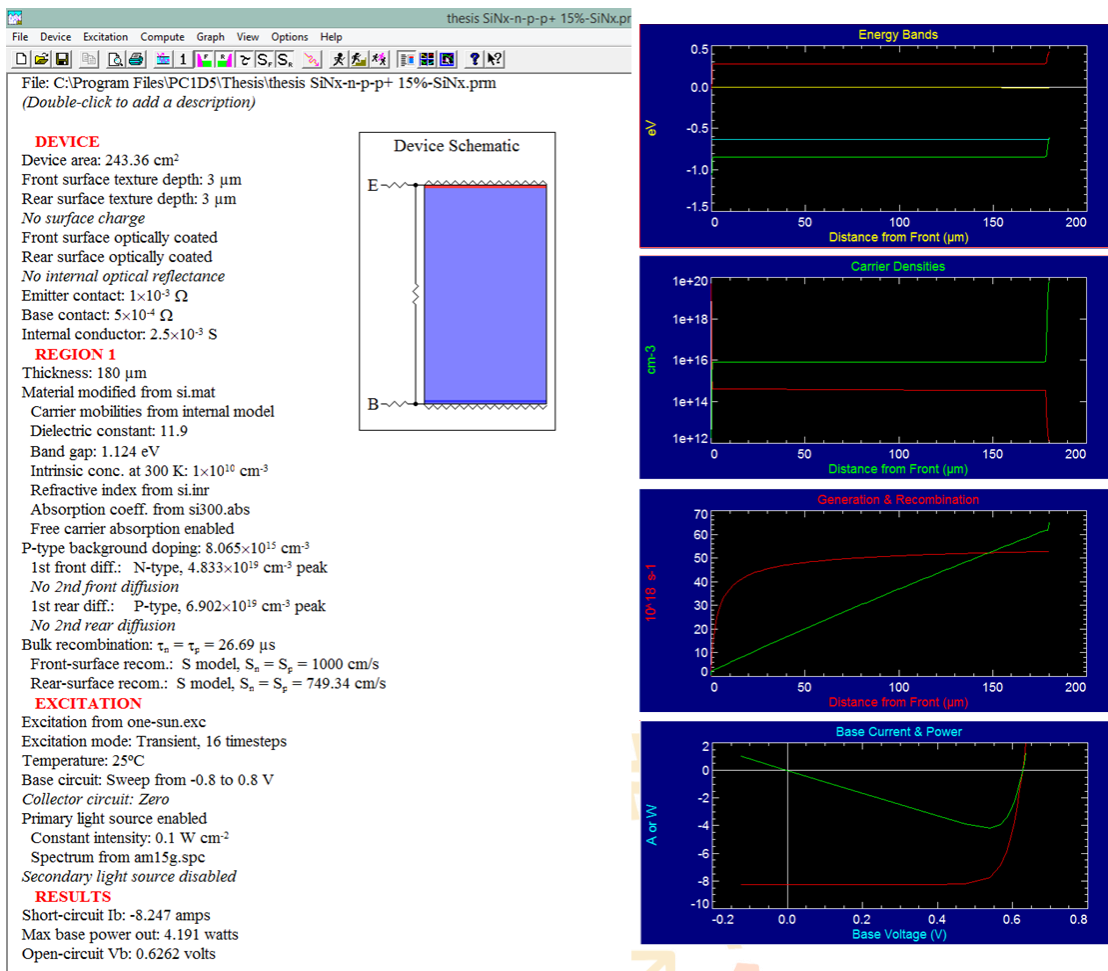




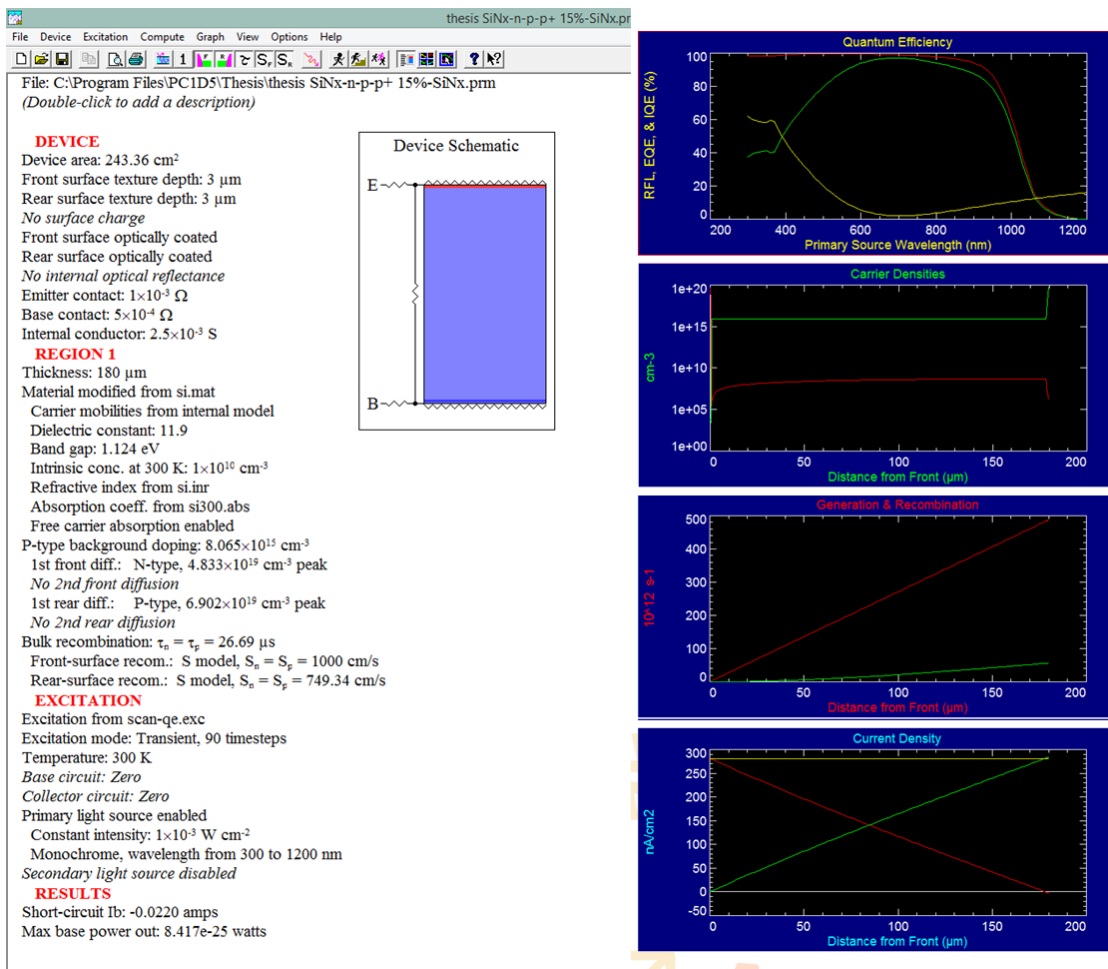
รูปที่ 3 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p⁺-Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si₃N₄ ด้านหลังที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด 20% ด้วยโปรแกรม PC1D โดยใช้เงื่อนไขการกระตุ้นแบบ One-sun



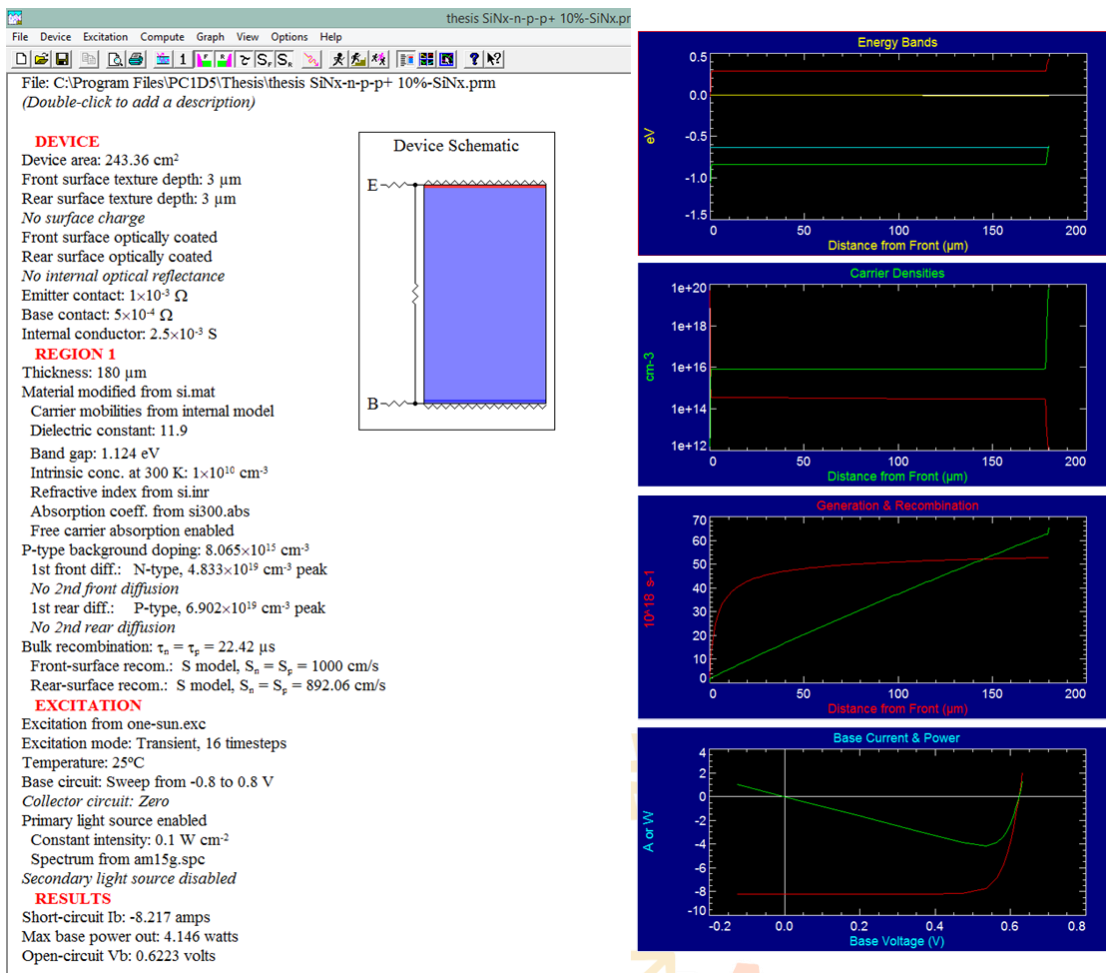
รูปที่ ข.4 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p⁺-Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si₃N₄ ด้านหลังที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด 20% ด้วยโปรแกรม PC1D โดยใช้เงื่อนไขการกระตุ้นแบบ Scan-QE



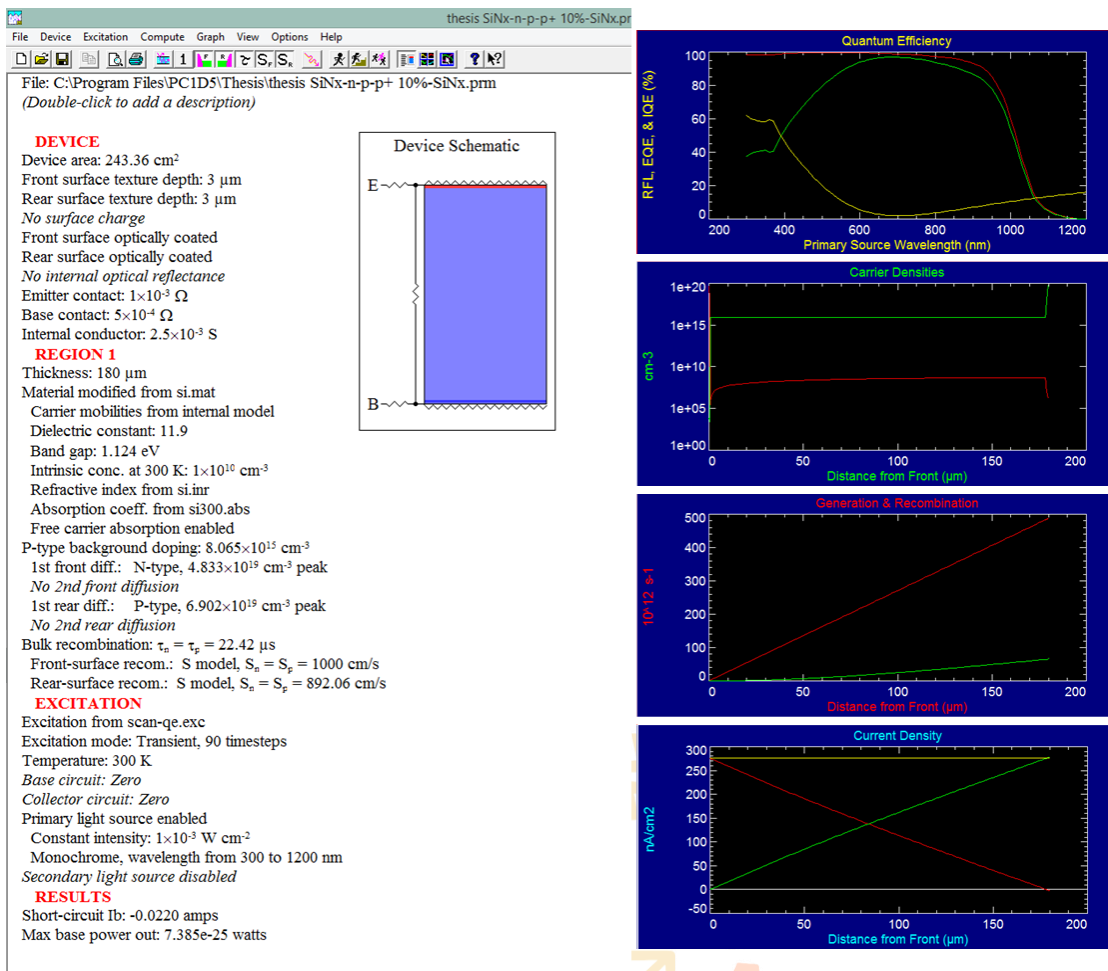
รูปที่ ๕.5 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p⁺-Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si₃N₄ ด้านหลังที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด 15% ด้วยโปรแกรม PC1D โดยใช้เงื่อนไขการกระตุ้นแบบ One-sun



รูปที่ ๖.6 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p⁺-Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si₃N₄ ด้านหลังที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด 15% ด้วยโปรแกรม PC1D โดยใช้เงื่อนไขการกระตุ้นแบบ Scan-QE



รูปที่ ๗.7 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p⁺-Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si₃N₄ ด้านหลังที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด 10% ด้วยโปรแกรม PC1D โดยใช้เงื่อนไขการกระตุ้นแบบ One-sun



รูปที่ ข.8 ผลการจำลองเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีบริเวณ p⁺-Si และบริเวณช่องเปิดชั้นฟิล์ม Si₃N₄ ด้านหลังที่มีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด 10% ด้วยโปรแกรม PC1D โดยใช้เงื่อนไขการกระตุ้นแบบ Scan-QE

ภาคผนวก ซ

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในระหว่างการศึกษา

กมลชนก เมฆหมอก, ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์ และณัฐพล ช่วงสุวนิช. (2560). ผลของการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนแสงแบบ Gradient-Index ที่มีผลต่อสมบัติทางแสงและไฟฟ้าของการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์สีดํา. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13. 31 พฤษภาคม - 2 มิถุนายน 2560, โรงแรมดิเอ็มเพรส, เชียงใหม่, หน้า 1597 - 1603.

กมลชนก เมฆหมอก, วรากร ลิมศิริ และทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์. (2561). การสร้างชั้น Local Back Surface Field (LBSF) ที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนโดยวิธีการประทับลายด้วย Flash foam. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14. 13 - 15 มิถุนายน 2561, โรงแรมโนโวเทล, ระยอง, หน้า 791 - 794.

Kamonchanok Mekmork and Thipwan Fangsuwannarak. (2018). Local Back Surface Field (LBSF) for Solar Cell by Using Flash Foam Stamp method. 7th International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE 2018). 28 - 30 November 2018, Chatrium Hotel Riverside Bangkok, Thailand, pp. 149 - 152.

กมลชนก เมฆหมอก, วรากร ลิมศิริ, ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์, พีรวุฒิ รัตนวิชัย และทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์. (2562). ผลของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15. 21 - 24 พฤษภาคม 2562, โรงแรมกรีนเนอรี่ รีสอร์ท เขาใหญ่, นครราชสีมา, หน้า 1050 - 1055.

Kamonchanok Mekmork, Thipwan Fangsuwannarak, Supanut Laohawiroj, Peerawoot Rattanawichai and Warakorn Limsiri. (2019). Borosilicate glass using as a rear passivation layer localized by a simplified flash foam stamping technique for high efficiency photovoltaic structure. The Second Materials Research Society of Thailand International Conference. 10 - 12 July 2019, The Zign Hotel Pattaya, Thailand.

Local back surface field (LBSF) for solar cell by using flash foam stamp method

Kamonchanok Mekmork, Thipwan Fangsuwannarak*

School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

Abstract:

The development of high efficiency solar cells can be achieved by reducing the rate of carrier recombination at the junction interface by building an internal electric field. In this research, we have initially fabricated local back surface field (LBSF) layer for solar cell prototype development by using a simple flash foam stamp method. Flash foam stamp was produced patterns in order to imprint dopant film directly on Si substrate. In diffusion process, the dopant patterned area obtains low sheet resistance values, adjustably below 56.93 Ohm/sheet that are lower than that of p-Si substrate (80.84 Ohm/sheet). This is noted that localized boron diffusion procedure to form LBSF layer can be achieved via a flash foam stamp method. The aperture ratio of the LBSF pattern below 20% effectively influences to the carrier-lifetime improvement. It was found that the aperture ratio of 15% obtained the longer carrier-lifetime of 26.69 μ s with gain by 90% comparing to sample without LBSF layer. The proficient carrier-lifetime can result in the higher efficiency solar cell. This non-complex process using flash foam stamp is an alternative production procedure to be co-operated effectively with solar cell industrial production for power efficiency improvement.

Keywords: Photovoltaic; Boron sol-gel; Local back surface field; Flash foam and stamping technique

*Corresponding author. Tel.: +66-4422-4582, Fax: +66-4422-4601

E-mail address: thipwan@g.sut.ac.th

1. Introduction

Solar cells have been continuously developed to provide high energy conversion efficiency. The solar cell with a local back surface field (LBSF) will be efficiency up to 24% (Green, 2001). Because of different concentration of p⁺/p junction at the rear side of p-Si substrate, electric fields are formed to reduce the surface carrier recombination. There is also a dielectric layer as a passivation layer to reduce the defects on the surface.

The LBSF layer can be produced in several ways, such as using laser doping, diffusion of doping gas and ion implantation on the silicon (Eisenberg et al., 2016; Gall et al., 2013; Wang et al., 2012), which are high power consumption, complexity and rising cost. Thus, other low cost technique for LBSF accomplishment is continuously invented.

Flash foam is a photosensitive polymer material with micro-porous structure, typically made from polyethylene. When flash foam is exposed to an intense burst of light, its micro-porous surface will be sealed. A designed mask on top of the flash foam is exposed, transferring the pattern to the flash foam to create a flash foam stamp. Solution can be adsorbed and stored in the porous foam and then transferred by stamping onto sample surface. In case of nano-imprint investigation, it has been used as a micro casting or soft lithography (He et al., 2015).

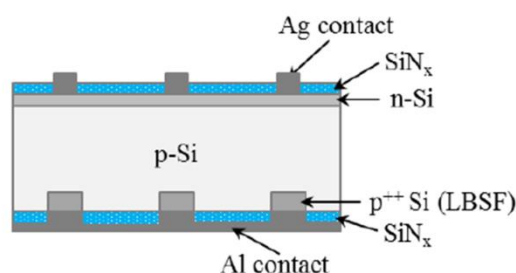


Fig. 1 The LBSF solar cell structure in this research

This research investigates the formation of an LBSF layer on the silicon solar cells by patterning H_3BO_3 solution through flash foam stamp, instead of using a laser doping. The LBSF solar cell shows the structure in Fig. 1. The groove pattern of H_3BO_3 solution stamping on wafer was imaged by ZEISS Light microscope. The sheet resistances of LBSF and n-Si layer were directly measured by four-point probe method. Thickness and refractive index of dielectric layer was evaluated by ellipsometry. Carrier life-time of LBSF cell was analyzed by a WCT-120 Sinton photoconductance lifetime tester. Formation of LBSF layer via stamping procedure is an alternative method based on uncomplicated procedure, low cost technique and high potential for commercial solar cells production.

2. Material and methods

The H_3BO_3 solution and H_3PO_4 solution as boron and phosphorus dopant precursor, respectively were prepared by the sol-gel method for forming LBSF layer and n-Si emitter front layers, respectively. The H_3BO_3 solution composes of TEOS, H_2O , EtOH, H_3BO_3 and HCl with a mole fraction of 0.022 : 0.851 : 0.026 : 0.006 : 0.0001, respectively. The H_3PO_4 solution consists of TEOS, H_2O , EtOH and H_3PO_4 with a mole fraction of 0.022 : 0.556 : 0.026 : 0.012, respectively. Both solutions were prepared at 70°C for 60 minutes.

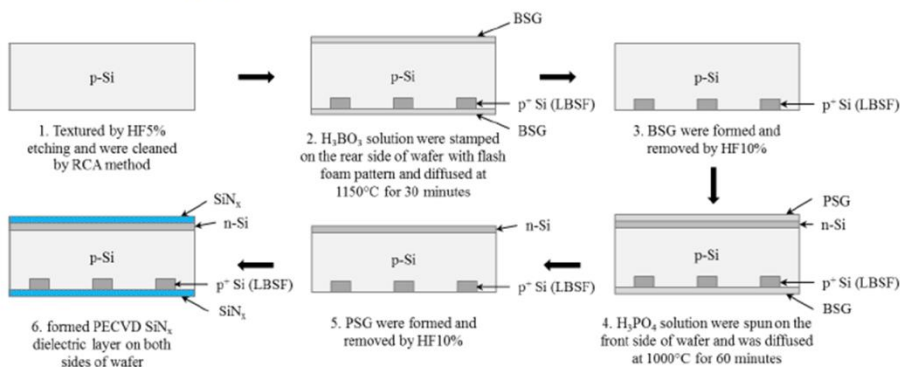


Fig. 2 LBSF preparation steps by using the stamp method

The preparation steps were shown in Fig. 2. P-type poly-crystalline silicon wafers, 200 μm thick, area of 9 cm^2 as Si substrate were textured by HF5% etching and wafer cleaning were operated by standard ratio corporation of American (RCA) method. Fig. 3 shows the line-pattern width of 250 μm and aperture ratio between 5-20% on the flash foam surface. H_3BO_3 solution adsorbed within the patterned flash foam were stamped to form the dopant area patterns on the rear side of p-Si wafer by using an semi-automatic stamp machine that was designed in-house as shown in Fig. 4. After that the wafers were sintered at 1150°C for 30 minutes in a thermal diffusion process. The high-temperature treatment acts as a thermal diffusion procedure to drive the boron dopant into the shallow p-Si wafer in order to form the p^+ areas. The borosilicate glass (BSG) were removed by HF10%. Subsequently, the H_3PO_4 solution were spun on the front side of wafer at two speed steps at 1000 rpm/min for 10 seconds and 3500 rpm/min for 30 seconds. The prepared wafers were diffused at 1000°C for 60 minutes. The high-treatment acts as a thermal diffusion temperature to drive the phosphorus dopants into the silicon wafer in order to form the shallow n/p junction. The phosphosilicate glass (PSG) was removed by HF10% and then silicon nitride (SiN_x) dielectric layer was coated on both sides of wafers by plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) method for surface passivate improvement.

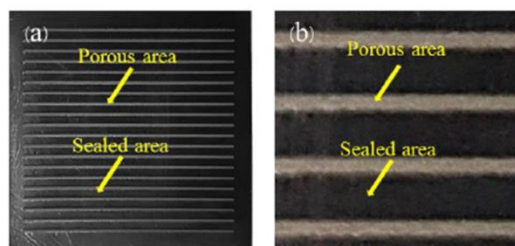


Fig. 3 (a) Line pattern of flash foam surface (b) magnified image

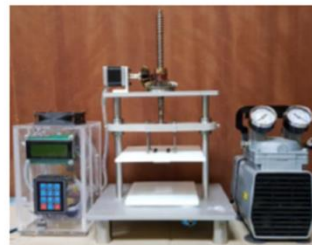


Fig. 4 Semi-automatic stamp machine

3. Results and discussion

H_3BO_3 solution was stamped on p-Si wafer to illustrate the small line pattern width of $250\ \mu m$ as shown in Fig. 5. Katsu (2002) revealed that aperture ratio between 5% and 20% influences on the rate of surface carrier combination velocity and carrier lifetime of LBSF solar cell (Katsu, 2002). The H_3BO_3 dopant pattern provided the width error below 5% comparing to the designed pattern as shown in Fig. 6. LBSF area forming after thermal diffusion obtains the higher conductivity with the sheet resistance (ρ_{sheet}) of 56.93 ohm/sheet defined as p^+ Si areas than that of p-Si substrate (80.84 ohm/sheet) It is noted that the boron in H_3BO_3 solution stamp can locally diffused into the p-Si substrate that become LBSF layer, finally. After second thermal diffusion, the ρ_{sheet} of n-Si emitter layer is 69.75 ohm/sheet.

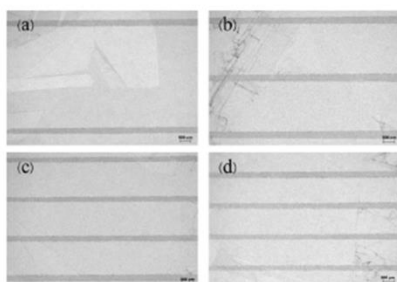


Fig. 5 Pattern of H_3BO_3 solutions for LBSF areas, Aperture ratio (a) 5%, (b) 10%, (c) 15% and (d) 20%

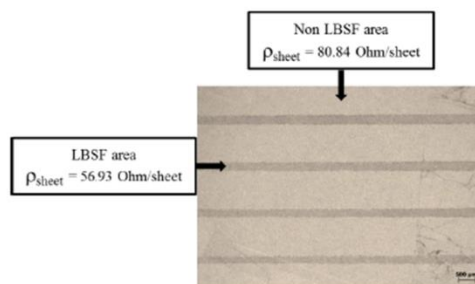


Fig. 6 ρ_{sheet} of LBSF areas and non LBSF areas at rear side wafer

In this study, dielectric SiN_x layer as an antireflection layer of solar cell has film thickness of 95.22 nm and refractive index $n = 2.10$ that is between the refractive index of the glass (1.5) and the refractive index of the silicon wafer (3.4). When the light incidents to SiN_x film, the ray will be refracted into the deeper layer with low refractive angle referring with the normal line. This result leads to reduction of the light reflection at solar cell surface according to the Snell's Law.

The minority carrier lifetime was determined at consideration of the minority carrier density at $2 \times 10^{14}\ cm^{-3}$. The carrier lifetime of the silicon with aperture ratio 0, 5, 10, 15 and 20% was 13.98, 14.7, 22.42, 26.69 and 21.46, respectively as shown in Fig. 7. The results show that the samples with LBSF existence obtain the longer lifetime than the sample without LBSF. It was approximately 12.7 μs or gain by 90.9% due to effect of the back surface electric field. The various aperture ratio values of p^+ Si area affect the carrier lifetime because extremely small amount p^+ Si area effects on

*7th International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE 2018):
Technology & Innovation for Global Energy Revolution
28-30 November 2018, Bangkok, Thailand*

the contact resistance increase finally resulting to lower V_{oc} and I_{sc} parameters in solar cell. The optimization of aperture ratio is 15% to obtain the longest carrier lifetime in this research condition.

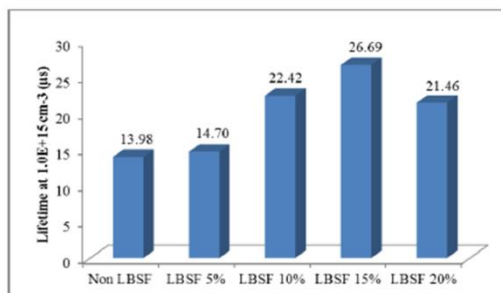


Fig. 7 Carrier lifetimes of the samples at various aperture ratio conditions

4. Conclusion

LBSF layer fabrication using H_3BO_3 solution with flash foam stamp technique achieves in this work. Under thermal diffusion boron dopant was locally diffused into shallow p-Si wafer at the line pattern. Comparing to a sample with no LBSF layer, the carrier lifetime of LBSF sample with 15% aperture ratio increases by 90%. The longer lifetime directly relates to solar cell efficiency improvement such as higher V_{oc} and I_{sc} . The flash foam stamp is a simple method to initially produce the opening area of LBSF solar cell cooperating with typically thermal diffusion process. The resistivity of p^+ Si is tunable from varying H_3BO_3 concentration. Therefore, the flash foam stamp is an alternative technique to be effectively improvable the high efficiency LBSF solar cells which is consistent with the industrial production process.

Acknowledgement

The author would like to gratitude to Suranaree University of Technology (SUT), National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) and Solartron Public Company Limited (SLT), Thailand for support of advanced measurement tool.

References

- Eisenberg, Y., Kreinin, L., Bordin, N. and Eisenberg, N. 2016. Effective Surface Recombination of p^+ Layers Doped Using Ion Implantation or Surface Deposited B Sources. *Energy Procedia*, 92, 16-23.
- Gall, S., Manuel, S. and Lerat, J.F. 2013. Boron laser doping through high quality Al_2O_3 passivation layer for localized B-BSF PERL solar cells. *Energy Procedia*, 38, 270-277.
- Green, M.A. 2001. *Crystalline silicon solar cells*. London: Imperial College Press.
- He, Y., Xiao, X., Wu, Y. and Fu, J.Z. 2015. A facile and low-cost micro fabrication material: flash foam. *Scientific Reports*, 5, 13522.
- Katsu, T. 2002. Space solar cell. Google Patents.
- Wang, Z., Han, P., Lu, H., Qian, H., Chen, L., Meng, Q., Tang, N., Gao, F., Jiang, Y., Wu, J., Wu, W., Zhu, H., Ji, J., Shi, Z., Sugianto, A., Mai, L., Hallam, B. and Wenham, S. 2012. Advanced PERC and PERL production cells with 20.3% record efficiency for standard commercial p-type silicon wafers. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20(3), 260-268.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวกมลชนก เมฆหมอก เกิดเมื่อวันที่ 15 พฤศจิกายน พ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนจอมสุรางค์อุปถัมภ์ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมและนาโนเทคโนโลยี ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปี พ.ศ. 2555 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เริ่มทำงานที่บริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) ในตำแหน่งวิศวกร โดยรับผิดชอบเกี่ยวกับการควบคุมกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดและตรงตามความต้องการของลูกค้า หาสาเหตุและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

ในปี พ.ศ. 2559 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้ทำงานวิจัยเพื่อพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างใหม่ให้มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานให้สูงขึ้นกว่าโครงสร้างมาตรฐาน โดยได้รับการอุดหนุนการวิจัยการวิจัยระดับปริญญาโท จากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) กระทรวงพลังงาน ประจำปีงบประมาณ 2561 ทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก (OROG) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และทุนนำเสนอผลงานระดับบัณฑิตศึกษา จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มีผลงานวิจัยทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ ได้แก่ การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13 ปี 2560 เรื่องผลของการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนแสงแบบ Gradient-Index ที่มีผลต่อสมบัติทางแสงและไฟฟ้าของการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์สีดำ, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14 ปี 2561 เรื่องการสร้างชั้น Local Back Surface Field (LBSF) ที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนโดยวิธีการประทับลายด้วย Flash foam, 7th International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE 2018) เรื่อง Local Back Surface Field (LBSF) for Solar Cell by Using Flash Foam Stamp method, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15 ปี 2562 เรื่องผลของอุณหภูมิและเวลาในกระบวนการเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และ 2nd Materials Research Society of Thailand International Conference เรื่อง Borosilicate glass using as a rear passivation layer localized by a simplified flash foam stamping technique for high efficiency photovoltaic structure