



รายงานการวิจัย

การสร้างชั้นรอยต่อพาสซีเวชันคุณภาพสูงของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย
เทคนิคต้นทุนต่ำจากการประทับลาย
Fabrication of high quality passivated contacts in Solar cells
by using a low-cost stamp technique

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การสร้างชั้นรอยต่อพาสซีเวชันคุณภาพสูงของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย
เทคนิคต้นทุนต่ำจากการประทับลาย
Fabrication of high quality passivated contacts in Solar cells
by using a low-cost stamp technique

ผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผศ.ดร. ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2558

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2561

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปี
งบประมาณ 2558 ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผศ.ดร. ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์

2561



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบของเครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติ (Quasi-automatic stamp machine) การสร้างลวดลายของฟิล์มบางไดอิเล็กทริก และฟิล์มสารเจือ บนแผ่นซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น เพื่อปรับปรุงโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยไม่พึ่งพาเทคนิคสร้างลวดลายแบบโฟโตลิโทกราฟี ที่มีขั้นตอนความซับซ้อน เครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติสามารถสร้างลวดลายฟิล์มบางได้ในขั้นตอนเดียว ปรุหัยวัสดุ สามารถสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนต่ำได้ ส่วนประกอบเครื่องต้นแบบประกอบด้วย ชุดแผ่นประทับลายผลิตจากวัสดุโพลีเมอร์ไวแสงแฟลช (Flash foam) มีโครงสร้างรูพรุน ดูดซับสารละลายได้ดี ชุดส่งกำลังโดยใช้บอลสกรู และเฟืองขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์แบบสเต็ป ที่ควบคุมความเร็วรอบและทิศทางการหมุนได้ ด้วยการควบคุมการทำงานจากคำสั่งโปรแกรมที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ชนิดอาดูโน (Arduino) วัตถุประสงค์ของการออกแบบเครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติต้นแบบ เพื่อสามารถใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนโครงสร้างที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่มีขนาดต่าง ๆ ได้ เช่น 3 cm^2 , 4 cm^2 , 5.5 cm^2 และ 8 cm^2 โดยขนาดของลายเส้นเล็กสุดได้ 100 ไมครอน ผลการทดสอบพบว่าเครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติ ให้ลวดลายฟิล์มบางลงบนแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ที่แม่นยำ ได้ขนาดของลายเส้นที่มีความสม่ำเสมอได้ตามที่ต้องการ ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2.5% เมื่อเทียบกับลายต้นแบบ

เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนรอยต่อ n/p โครงสร้างชั้นสนามไฟฟ้าด้านหลังบางบริเวณ (Local back surface field, LBSF) ได้ทดสอบผลิตด้วยเครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติ โดยทำการประทับลายของโบรอน ซึ่งเป็นแหล่งสารเจือสำหรับการสร้างบริเวณ p^{++} ด้านหลังเซลล์ และขั้นตอนการประทับลายของกรดไฮโดรฟลูออริก สำหรับสกัดเปิดช่องให้กับชั้นไดอิเล็กทริกที่บริเวณเดียวกันกับ p^{++} ซึ่งขนาดลวดลายดังกล่าวมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมาก โดยเซลล์ที่มีขนาดลายเส้น $500 \mu\text{m}$ ที่ Aperture ratio 15% ให้ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 1.46% เมื่อเทียบกับเซลล์ที่ไม่เปิดช่อง ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ด้วยวิธีประทับลาย สามารถนำไปผลิตในปริมาณมากในอุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ขั้นตอนการผลิตเซลล์ไม่ซับซ้อนสอดคล้องกับการผลิตเดิมที่มีอยู่

Abstract

This research involves with design and fabrication of a prototype quasi-automatic machine for producing the film patterns based on stamping technique. The patterned dielectric film and doping film were created on n/p junction silicon wafer in order to improve the higher efficiency of silicon solar cells without using a complex photolithography technique. The quasi-automatic stamp machine can produce the patterned film in one procedure step, conserve the raw solution material and use for producing low-cost solar cells. The stamp machine consists of the many main components such as flash foam part which is a good adsorb porous-polymer. Power transmission part by using a ball screw system and gear driver with stepping motor to be controllable its speed and its directional rotation. The stamper distance to solar cell is controlled by programing Arduino microcontroller. This design contributes solar cell production with various sizes such as cells 3 cm², 4 cm², 5.5 cm² and 8 cm². Flash foam is a polymer material which has flash light responsibility. The line pattern was obtained the smallest size of 100 micro-meters. The experimental results are found that the machine obtained accurately the line pattern on the solar cell wafers. The desired width of line is patterned straightly with its error below 2.5% comparing with the original-pattern.

Prototype of crystalline n/p Si solar cells based local back surface field (LBSF) were demonstrated by using a quasi-automatic stamp machine. Formation of p⁺⁺ pattern from stamping boron dopant solution was tested on the rear side of n/p-Si substrate. In additional study, patterning hydrofluoric acid stamps on dielectric layer to form the line opening which is positioned to the p⁺⁺ line. The line width of localized p⁺⁺ region directly effects to solar cell efficiency. 500 micrometers width with 15% aperture ratio can contribute the power conversion efficiency improvement by 1.46% comparing to a solar cell with fully dielectric rare-layer. Therefore, LBSF solar cells based stamping technique lead to mass-production in PV industrial process owing to low-cost and simple techniques.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	6
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	6
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	7
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	7
บทที่ 2 ทฤษฎีการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	
2.1 บทนำ	9
2.2 การออกแบบเครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติ	9
2.3 การเลือกขนาดของสเต็ปมอเตอร์และการออกแบบวงจรไฟฟ้า	15
2.3.1 การคำนวณหาขนาดของสเต็ปมอเตอร์	15
2.3.2 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	16
2.3.3 วงจรควบคุมสเต็ปมอเตอร์	17
2.4 สรุป	18
บทที่ 3 การทดสอบประทับลวดลายสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์	
3.1 บทนำ	19
3.2 ลักษณะพื้นผิวของแผ่น Flash foam	19
3.2.1 การสร้างลวดลายสารไวแสงด้วย Foam stamp	20
3.2.2 การสร้างลวดลาย Borosilicate ด้วย Foam stamp.....	22
3.2.3 การเปิดช่องไดโอดเล็กริกด้วย Foam stamp	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 สรุป	27
บทที่ 4 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนต้นแบบด้วยวิธีการประทับลาย	
4.1 บทนำ	28
4.2 กระบวนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกซิลิคอนเชิงพาณิชย์.....	28
4.3 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนต้นแบบ LBSF ด้วยวิธีการประทับลาย.....	32
4.3.1 การผลิตเซลล์ที่มีบริเวณ p++ Si ในแบบลวดลายเส้น และลายจุด ด้วยวิธีการประทับลาย	32
4.3.2 การวัดคุณสมบัติทางแสงและวัดค่า life-time.....	33
4.3.3 ผลการวัดค่าดัชนีหักเหแสงและความหนาของฟิล์มไดออกไซด์ทริกบน เซลล์	35
4.4 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนต้นแบบด้วยการประทับลาย.....	38
4.5 การวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วย และความคุ้มค่า.....	43
4.6 สรุป	47
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลงานวิจัย	48
5.1.1 การออกแบบและสร้างเครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติสำหรับเซลล์ แสงอาทิตย์	48
5.1.2 การถ่ายทอผลผลิตด้วย Foam stamp.....	48
5.1.3 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนต้นแบบด้วยวิธีการประทับลาย	48
5.1.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนโครง สร้าง LBSF ต้นแบบด้วยวิธีการประทับลาย.....	49
5.2 ข้อเสนอแนะ	49
บรรณานุกรม	50
ประวัติผู้วิจัย	53

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องประทับลาย	10
ตารางที่ 3.1 ผลการประทับลาย BSG แบบลายเส้นและลายจุดเปรียบเทียบกับลวดลาย ที่ออกแบบในเงื่อนไขขนาดลวดลาย	24
ตารางที่ 3.2 ผลการประทับลาย BSG แบบลายเส้นเปรียบเทียบกับลวดลายที่ออกแบบ ในเงื่อนไข Aperture ratio	25
ตารางที่ 4.1 นิยามของเซลล์แสงอาทิตย์ทดสอบในโครงสร้างเงื่อนไขต่าง ๆ	33
ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาและค่าดัชนีหักเหแสงของชั้นฟิล์มบางไดอิเล็กทริก.....	35
ตารางที่ 4.3 ค่าช่วงชีวิตของพาหะ และค่าอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะ ค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดัน	36
ตารางที่ 4.4 ค่าทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์โครง สร้าง LBSF	41
ตารางที่ 4.5 ส่วนประกอบของต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์.....	44
ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกโพลีซิลิคอนโครงสร้าง มาตรฐานอุตสาหกรรมในประเทศไทย กับการคาดการณ์ต้นทุนการผลิตเซลล์ ในงานวิจัย.....	46
ตารางที่ 4.7 สรุปต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์ในโครงสร้างต่าง ๆ ของตลาดโลก.....	47

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 1.1	กฎของ Liebig สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน	2
รูปที่ 1.2	ผลการคำนวณประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนในฟังก์ชันของพารามิเตอร์ความเร็วของการรวมตัวใหม่	3
รูปที่ 1.3	โครงสร้างของการทำพาสซีเวชันที่ผิวในแบบแผนพื้นฐานต่าง ๆ กัน (ก) BSF เต็มพื้นที่ด้านหลัง (ข) SiN _x -passivated bifacial cell (ค) Oxide-passivated point contact (ง) Oxide-passivated point contact กับ LBSF	3
รูปที่ 1.4	เซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงชนิดซิลิคอนในโครงสร้างแบบ PERL (Passivated Emitter, Rear Locally-diffusion cells).....	4
รูปที่ 1.5	บริเวณการตอบสนองแสงคลื่นสั้นและคลื่นยาวของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Selective emitter	5
รูปที่ 2.1	ส่วนประกอบของเครื่องประทับลายต้นแบบ	10
รูปที่ 2.2	เครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติ	13
รูปที่ 2.3	ชุดหัวบรรจุแผ่น Flash foam	13
รูปที่ 2.4	แผ่น POM สำหรับฐานวางแผ่นซิลิคอน.....	14
รูปที่ 2.5	แผ่นอะคริลิคสำหรับรองแผ่น POM และต่อร่วมกับท่อดูดสุญญากาศ.....	14
รูปที่ 2.6	เครื่องประทับลาย ชุดควบคุมสตีปมอเตอร์ และเครื่องดูดสุญญากาศ.....	15
รูปที่ 2.7	วงจรไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ขนาด 24v 3A	16
รูปที่ 2.8	การเชื่อมต่อของอุปกรณ์ควบคุมสตีปมอเตอร์.....	17
รูปที่ 3.1	(ก) โครงสร้างพื้นผิวของ Flash foam ที่กำลังขยาย 300 เท่า และ (ข) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	19
รูปที่ 3.2	ภาพถ่าย (ก) เครื่อง Flash Stamp รุ่น JL-V และ (ข) หลอดแฟลชภายในเครื่อง	20
รูปที่ 3.3	ลวดลายหน้ากากปิดแสงลักษณะแบบขั้วไฟฟ้ากริด.....	20
รูปที่ 3.4	(ก) ลักษณะของลวดลายที่เกิดขึ้นบน Foam stamp และ (ข) ภาพขยายกำลังขยาย 50 เท่า.....	21
รูปที่ 3.5	ลวดลายสารไวแสงที่เกิดขึ้นหลังจากการประทับลาย และ (ข) ภาพขยายที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	21
รูปที่ 3.6	(ก) ลวดลายหลังจากผ่านการ Etching back และ (ข) ภาพถ่ายลักษณะลวดลายหลังจากผ่านการ Etching back ที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	22

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.7	23
รูปที่ 3.8	23
รูปที่ 3.9	25
รูปที่ 3.10	26
รูปที่ 4.1	28
รูปที่ 4.2	29
รูปที่ 4.3	29
รูปที่ 4.4	29
รูปที่ 4.5	30
รูปที่ 4.6	30
รูปที่ 4.7	30
รูปที่ 4.8	30
รูปที่ 4.9	32
รูปที่ 4.10	34
รูปที่ 4.11	34
รูปที่ 4.12	37
รูปที่ 4.13	37
รูปที่ 4.14	38

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 4.15	ลวดลายการเปิดช่องชั้นฟิล์ม SiN_x ด้านหลังแผ่นเซลล์ ด้วยเทคนิคการ ประทับลายที่มี Aperture ratio ประมาณ 15% และขนาดลายเส้นเปิด เท่ากับ (ก) 100 μm (ข) 250 μm และ (ค) 500 μm	39
รูปที่ 4.16	เครื่อง Fast firing ที่สร้างขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ F5105.....	40
รูปที่ 4.17	(ก) ภาพถ่ายด้านบนของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ และ (ข) ด้านหลังเซลล์	40
รูปที่ 4.18	กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ LBSF ในลายเส้นเปิดช่อง SiN_x	42
รูปที่ 4.19	กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ LBSF ในลายจุดเปิดช่อง SiN_x	42



บทที่ 1

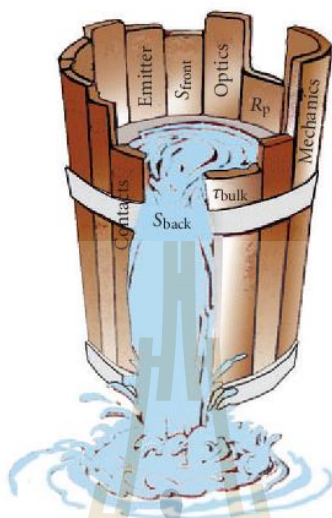
บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

จากการที่ประเทศไทยมีแนวโน้มการใช้พลังงานสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และความจำเป็นที่ต้องเตรียมหาแหล่งพลังงานสำรองในอนาคต เพื่อช่วยกระจายความเสี่ยงในการจัดหาเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้า การพัฒนาพลังงานทดแทนอย่างจริงจังจะเป็นหนทางที่ช่วยลดการพึ่งพาและการนำเข้าพลังงานได้ พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนอย่างหนึ่งซึ่งสามารถนำมาทดแทนก๊าซธรรมชาติสำหรับการผลิตไฟฟ้าได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีต้นทุนการจัดหาพลังงาน เป็นแหล่งพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงปราศจากกลไกทางกล และไม่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกใด ๆ ระหว่างการแปลงพลังงาน ในปัจจุบันได้มีการสนับสนุนในเชิงนโยบายการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบมากขึ้น จากการเริ่มนโยบายการสนับสนุนการรับซื้อพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับ VSPP (Very small power producer) ในปี พ.ศ. 2551 พร้อมกับมีเพิ่มราคารับซื้อไฟฟ้า (Adder) ทำให้เกิดการขยายตัวในการติดตั้งเพื่อขายไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งขนาดกำลังผลิตเข้าใกล้ระดับกำลังไฟฟ้าเป้าหมายตามนโยบายที่กำหนด อย่างไรก็ตาม การสนับสนุนเทคโนโลยีการผลิตและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นการสนับสนุนกระบวนการต้นน้ำนั้นยังมีสัดส่วนที่น้อยกว่า ดังนั้นการสนับสนุนด้านเทคโนโลยีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อก่อให้เกิดองค์ความรู้และมุ่งไปสู่การผลิตและปฏิบัติได้นั้นจะสามารถทำให้ประเทศไทยมีศักยภาพด้านพลังงานทดแทนทั้งการใช้งานซึ่งเป็นกระบวนการปลายน้ำจนถึงด้านองค์ความรู้ทางเทคโนโลยีและการผลิตอย่างยั่งยืนซึ่งเป็นกระบวนการต้นน้ำ สิ่งเหล่านี้จะเป็นส่วนสร้างความมั่นคงอย่างยั่งยืนด้านพลังงานของชาติได้ในอนาคต

จากผลงานด้านวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์นั้น เราพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงชนิดผลึกซิลิคอนในโครงสร้างแบบ PERL (Passivated Emitter, Rear Locally-diffusion cells) ที่ห้องปฏิบัติการเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ UNSW ได้พัฒนาให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดประมาณ $25 \pm 5\%$ อย่างไรก็ตามเราพบว่ากระบวนการผลิตมีความซับซ้อนจากการผลิตชั้นพาสซีเวชันแบบเปิดช่องรอยสัมผัสด้วยเทคนิค Photolithography จึงทำให้โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์นี้ทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุดไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริงในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม นอกจากนั้นต้นทุนการผลิตที่สูงเนื่องจากการผลิตลายโลหะมีกระบวนการที่ใช้ระบบสุญญากาศพิเศษด้วยเทคนิค Thermal evaporation ชั้นพาสซีเวชันคือชั้นฉนวนไดอิเล็กทริกบาง ๆ เช่น SiO_2 และ SiN_x ที่อยู่ระหว่างชั้นสารกึ่งตัวนำซิลิคอนกับขั้วไฟฟ้าซึ่งมีโครงสร้างแบบ MIS (Metal-Insulator-Semiconductor) ทำให้เกิดการสะสมของประจุต่างกันเกิดเป็นสนามไฟฟ้าอ่อน ๆ ผลของสนามไฟฟ้าที่บริเวณผิวสัมผัสของ MIS นี้จะส่งผลให้ความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะมีค่าลดลง หรืออีกนัยหนึ่งคือช่วงชีวิตของพาหะยาวขึ้น และเกิด V_{oc} มีค่าสูงขึ้น

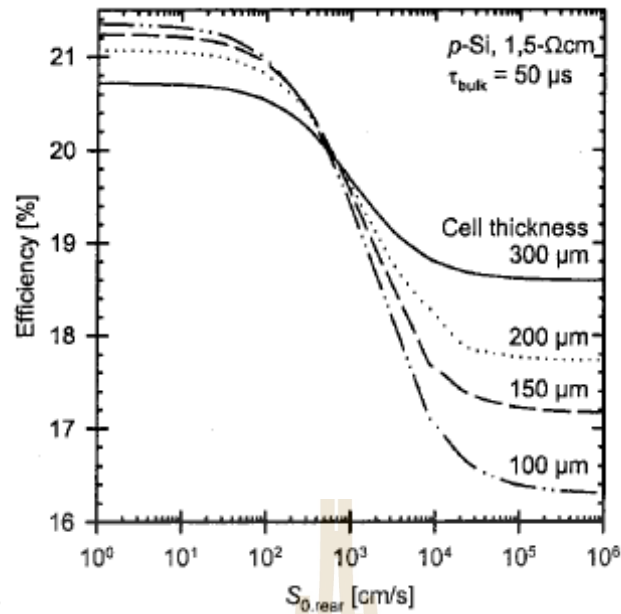
ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์สูงชัน รูปที่ 1 แสดงการนำกฎของ Liebig มาปรับใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อพิจารณาถึงปัจจัยของการสูญเสียพลังงานในเซลล์ เราพบว่าการสูญเสียมากที่สุดนั้นเนื่องจากเกิดความเร็วของการรวมตัวใหม่สูงที่บริเวณผิวโดยเฉพาะที่ด้านหลังของเซลล์ (Rear surface recombination)



รูปที่ 1.1 กฎของ Liebig สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน [S.W.Glunz, 2007]

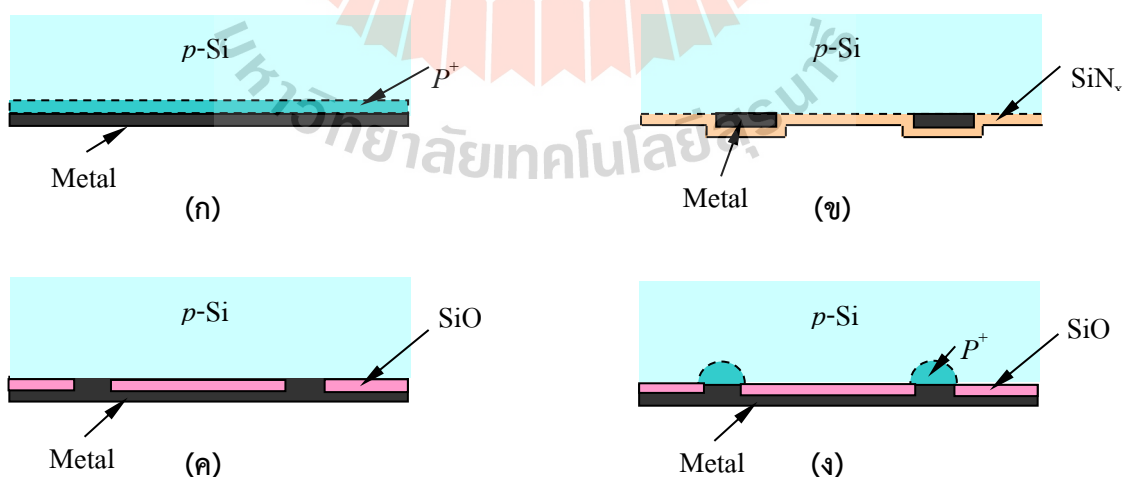
เมื่อต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์จำเป็นต้องลดความเร็วของการรวมตัวใหม่ของพาหะข้างน้อย (Minority carriers) ที่ผิวนั้นทำได้โดยหลักการของพาสซีเวชันที่ผิว (Surface passivation) ให้มีประสิทธิภาพสูง ถึงแม้ว่าการทำพาสซีเวชันที่ผิวจะสามารถให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงเข้าใกล้ค่าจำกัดสูงสุดของเซลล์ชนิดซิลิคอนก็ตาม แต่กระบวนการผลิตก็ยังคงพึ่งพาเทคโนโลยีของ Photolithography และเลเซอร์ ซึ่งมีขั้นตอนซับซ้อนและยุ่งยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีต้นทุนการผลิตที่สูงมาก แม้ว่าจุดประสงค์หลักของการใช้ Photolithography นั้นไม่ได้มุ่งไปสู่การทำลวดลายที่มีขนาดเล็กก็ตาม

โดยทั่วไปเป็นที่ยอมรับกันว่าจุดหลักสำคัญอย่างหนึ่งของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนให้ได้ประสิทธิภาพสูงคือการทำให้ผิวทั้งด้านบน และด้านหลังของเซลล์เกิดพาสซีเวชัน (Passivation) คุณภาพสูง เพื่อลดความเร็วของการรวมตัวใหม่ของพาหะข้างน้อยเป็นผลให้ V_{oc} มีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์สูงชัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเซลล์ยังมีความบางลงมากเท่าใด ค่าความเร็วของการรวมตัวใหม่นี้ก็จะมีผลกระทบมากขึ้นด้วยแสดงความสัมพันธ์ด้วยผลการคำนวณดังรูปที่ 2 สำหรับการลดค่าความเร็วของการรวมตัวใหม่นั้นมีหลายวิธี อาทิเช่น วิธีแรกคือการลดความหนาแน่นของสถานะที่ผิวสัมผัส (Density of interface states, D_{it}) วิธีที่สองคือการทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นเพื่อผลักพาหะข้างน้อยออกไปไม่ให้เกิดการรวมตัวที่บริเวณผิวเสียก่อน วิธีการพื้นฐานเหล่านี้เรียกโดยรวมว่าการทำพาสซีเวชันที่ผิว (Surface passivation)



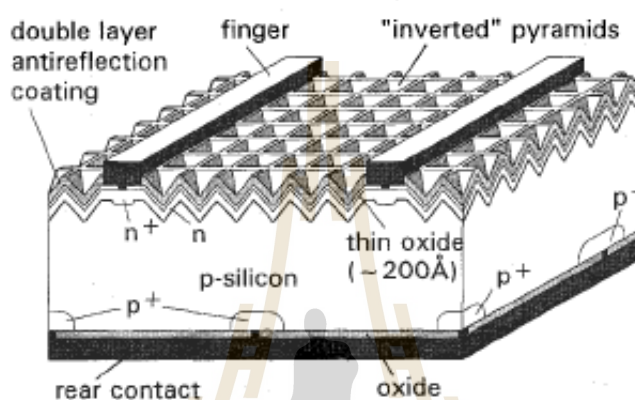
รูปที่ 1.2 ผลการคำนวณประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนในฟังก์ชันของพารามิเตอร์ความเร็วของการรวมตัวใหม่ [Metz A., et.al. 2000]

วิธีการต่าง ๆ ในการทำพาซิเวชันที่ผิวนั้นมีแบบแผนพื้นฐานต่าง ๆ กันแสดงดังรูปที่ 3 ดังนี้ 1. การสร้างชั้น P+ บางๆ เพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ด้านหลังทั้งหมดของเซลล์ (Back surface field, BSF) [A. Mandelkorn, et.al. 1973] แสดงในรูป (ก) 2. การสร้างชั้นฟิล์มบาง SiN_x ในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบสองหน้า [R. Hezel et.al. 1989] แสดงในรูป (ข) 3. การสร้างชั้นออกไซด์แบบจุดสัมผัส (Oxide-passivated point contact) หรือเรียกว่า Local back passivation (LBSF) ในรูป (ค) และแบบ LBSF ที่มีการแพร่ p^{++} [J. Zhao, et. al. (1990)] แสดงในรูป (ง)



รูปที่ 1.3 โครงสร้างของการทำพาซิเวชันที่ผิวในแบบแผนพื้นฐานต่าง ๆ กัน (ก) BSF เต็มพื้นที่ด้านหลัง (ข) SiN_x -passivated bifacial cell (ค) Oxide-passivated point contact (ง) Oxide-passivated point contact กับ LBSF

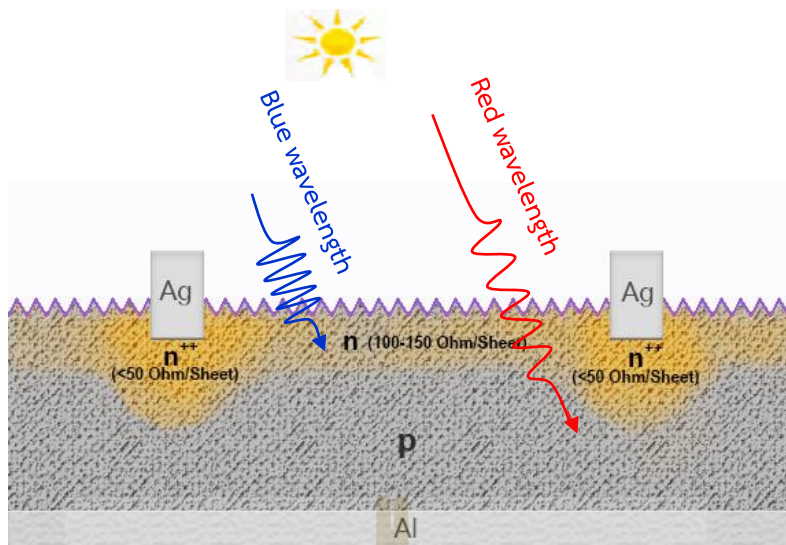
ปัจจุบันนี้แบบแผนพื้นฐานของการทำพาซิเวชันที่ผิวได้มีการนำมาพัฒนาในรูปแบบหลักการที่แตกต่างกันเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานดีขึ้น เช่นหลักการของเซลล์ซิลิคอนแบบ IBBC (Interdigitated back-side buried contact) ที่ UNSW ได้ประสิทธิภาพสูงถึง 19.2% [J-H. Guo, et. al., 2005] และบริษัท Sunpower ได้พัฒนาหลักการแบบ BC-BS (Back-contact back-side) ได้ประสิทธิภาพกว่า 22% [D. De Ceuster, et. al. 2007] และงานวิจัยล่าสุดที่กลุ่ม Fraunhofer ISE and ISFH ได้พัฒนาหลักการ BC-BJ (Back-contact back junction) ที่เน้นต้นทุนการผลิตต่ำกว่านั้นให้ประสิทธิภาพดีที่สุดในที่ 21.3% [F. Granek, et. al 2009]



รูปที่ 1.4 เซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงชนิดซิลิคอนในโครงสร้างแบบ PERL (Passivated Emitter, Rear Locally-diffusion cells) [J. Zhao, M.A. Green, et. al, (1996)]

ถึงแม้ว่าการทำพาซิเวชันที่ผิวในรูปแบบหลักการที่แตกต่างกันเพื่อให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงเข้าใกล้ค่าจำกัดสูงสุดของเซลล์ชนิดซิลิคอน แต่กระบวนการผลิตทั้งหมดก็ยังคงพึ่งพาเทคโนโลยีของ Photolithography และเลเซอร์ ยกตัวอย่างเช่นโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงกว่า 25% ซึ่งมีขั้นตอนการผลิตที่ซับซ้อนและยุ่งยาก และมีราคาต้นทุนการผลิตสูง ในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ PERL มีส่วนประกอบหลักที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้เกินกว่า 25% สามารถพิจารณาเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้

1. การสร้างชั้นป้องกันการสะท้อนแสงแบบสองชั้น (Dual anti-reflection layer, DARL) เพื่อลด %R ตลอดย่านแสง Visible ทำให้ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมสูงขึ้น จากการสร้างชั้น SiN_x และ SiN_xO_y
2. การสร้างบริเวณ Selective Emitter (SE) ของชั้นรับแสงให้มีค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่น (Sheet resistivity, ρ_{sheet}) ที่แตกต่างกัน แสดงในรูปที่ 1.5 โดยที่บริเวณรับแสงให้มีค่าสูงแต่ไม่เกิน $120 \Omega/\text{sheet}$ และบริเวณใต้ขั้วไฟฟ้ากริดให้มีค่า ρ_{sheet} ต่ำ ๆ เพื่อให้เกิดความต้านทานไฟฟ้าที่รอยสัมผัส (Contact resistance, R_c) ส่งผลให้ความต้านทานอนุกรม (Series resistance, R_s) ลดลง และ Fill factor (FF) สูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงขึ้น



รูปที่ 1.5 บริเวณการตอบสนองแสงคลื่นสั้นและคลื่นยาวของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Selective emitter

3. การสร้างชั้นออกไซด์แบบจุดสัมผัส หรือเรียกว่าการเปิดช่องออกไซด์ เพื่อให้เกิดบริเวณ LBSF เกิดสนามไฟฟ้าที่ด้านหลังสูง ลดผลของความต้านทานที่รอยสัมผัสระหว่างชั้นออกไซด์และซิลิคอน ส่งผลให้ค่า V_{OC} ค่า FF และค่า I_{SC} ของเซลล์สูงขึ้น

โดยทั่วไปจุดประสงค์หลักของการเปิดช่องออกไซด์ด้านหลังเซลล์ หรือการสร้างบริเวณ Selective emitter ไม่ได้มุ่งไปสู่การทำลวดลายที่มีขนาดเล็กกว่าไมครอน ดังนั้นเทคนิคการประทับลาย (stamp) จึงเป็นเทคนิคทางเลือกใหม่ที่สามารถสร้างลวดลายฟิล์มบางภายในกระบวนการเดียว ผลิตซ้ำได้จำนวนมากในเวลาสั้น อีกทั้งชุด Stamp มีอายุการใช้งานได้นาน สามารถออกแบบเพื่อให้ได้ขนาด และลวดลายที่คมชัด สำหรับโครงการวิจัยนี้มีแนวคิดสร้างชุด Stamp ให้มีลวดลายที่เหมาะสมสำหรับการเปิดช่อง SiO_2 เพื่อสร้างเป็นชั้น Localized passivation ให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ อีกทั้งเป็นแนวคิดใหม่ในการทำลายกำแพงหรือข้อจำกัดในการนำเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERL ที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดเข้าสู่การผลิตในอุตสาหกรรม การศึกษานี้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญสำหรับการพัฒนาประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ

ดังนั้นผู้เสนอโครงการจึงมีแนวคิดนำเทคนิคการประทับลาย (Stamping technique) ซึ่งเป็นเทคนิคทางเลือกใหม่ไม่เพียงเป็นเทคนิคที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ ใช้เวลาสั้น ผลิตลวดลายช่องเปิดชั้นออกไซด์พาซิเวชันได้ปริมาณมากแล้วยังสามารถพัฒนาได้ลวดลายที่คมชัด สม่ำเสมอ สะดวก และรวดเร็ว ใช้วัสดุสารละลายที่สามารถสังเคราะห์เองได้ หรือสารละลาย Resist ทั่วไปในปริมาณน้อยกว่า ไม่เหลือทิ้ง อีกทั้งยังมีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถบูรณาการองค์ความรู้ของการพัฒนาใช้เทคนิค Stamp ไปสู่กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์ได้ในอนาคต เทคนิค Stamp ยังสามารถสร้างลวดลายได้หลายชั้นซึ่ง

หลักการใหม่นี้มีความเหมาะสมสำหรับการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ฟิล์มบางให้สะดวก และง่ายขึ้นทั้งในระดับวิจัย ได้ใช้เทคนิค Stamp เพื่อสร้างลวดลายขนาดเล็ก ลดกระบวนการของ Photolithography ยกตัวอย่างเช่นได้มีการวิจัยสร้างชุด PDMS stamp สำหรับการผลิตอุปกรณ์แสดงผลเป็นแผ่นม้วน [S. Y Hwang et.al., 2009] การสร้างรูปแบบผิวไม่เรียบที่แผ่นฐานกระจกเพื่อลดผลการสะท้อนแสงกลับให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง [K. S Han, 2010] การสร้างผิวแผ่นฐานซิลิคอนให้เกิดโครงสร้างขรุขระทรงพีระมิดขนาดเล็กสม่ำเสมอด้วยการสร้างเปิดช่องลวดลายของ Photoresist เพื่อให้เกิดการกัดผิวแบบ Isotropic etching ส่งผลให้เกิดการสะท้อนกลับลดลง [S. Landis, 2013] อย่างไรก็ตามการนำเทคนิค stamp มาใช้เพื่อสร้างชั้น Localized passivation ยังไม่มีผลรายงาน

สำหรับโครงการวิจัยนี้มีแนวคิดการนำเทคนิค Stamp สารละลาย HF ที่มีรูปแบบของลวดลายขนาดไมโครเมตร เพื่อประทับสารละลายสกัดบริเวณฟิล์ม SiO_2 ให้เกิดลวดลายเปิดช่องตามต้องการบนฐานของแข็งเรียบอย่างแผ่นซิลิคอนได้ภายใต้อุณหภูมิห้อง เกิดเป็นช่องเปิดไดอิเล็กทริกสำหรับพาสซีเวชันที่ผิว จากหลักการดังกล่าวจะให้ประโยชน์ในส่วนของการผลิต ที่ง่ายขึ้น และรวดเร็วขึ้น ลดต้นทุนได้มากเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีการผลิตที่ใช้กันในปัจจุบัน อีกทั้งการศึกษานี้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญสำหรับวิศวกรรมเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปสู่การพัฒนาใช้งานได้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 สนับสนุนการวิจัยด้านพลังงานหมุนเวียนจากการวิจัยและพัฒนาปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนด้วยเทคนิคที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ เพื่อเพิ่มความเข้มแข็งด้านการวิจัยพลังงานในประเทศ

1.2.2 เพื่อหาแนวทางการใช้เทคโนโลยีการสร้างชุดประทับลาย (Stamp) เพื่อลดกระบวนการสร้างลวดลายขนาดเล็กที่มีความซับซ้อน และเพื่อศึกษาภาพการผลิตในปริมาณมากในกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง

1.2.3 เพิ่มขีดความสามารถการวิจัยด้านเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อก้าวสู่วัสดุทางวิศวกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบแผ่นใหม่

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 กระบวนการทำลวดลายช่องเปิดไดอิเล็กทริกที่เหมาะสมสำหรับจุดสัมผัสออกไซด์เพื่อสร้างชั้นพาสซีเวชันให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์

1.3.2 สร้างชั้นพาสซีเวชันที่ผิวด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิค Stamp

1.3.3 ศึกษาวิธีและทำการทดสอบคุณภาพทางอิเล็กทรอนิกส์-แสง และไฟฟ้าชั้นเปิดช่องพาสซีเวชันที่สร้างขึ้นกับเซลล์แสงอาทิตย์

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ความรู้ที่เกี่ยวข้องและเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินโครงการจากหนังสือ วารสารวิชาการ สิทธิบัตร และเอกสารต่างๆที่เกี่ยวข้อง (Literature Survey)

1.4.2 ศึกษาแบบแผนของโครงสร้างชั้นพาสซีเวชันด้านหลังเพื่อให้เกิดคุณภาพการพาสซีเวชันที่ผิวที่ดีและเหมาะสมกับโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

1.4.3 ศึกษากลไกการสร้างชุด Stamp ที่มีประสิทธิภาพ และการประทับสร้างลวดลายชั้นพาสซีเวชันด้านหลังด้วยเทคนิค Stamp

1.4.4 สร้างชั้นรอยต่อพี-เอ็นสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ และสร้างชั้น SiO_2 บาง ๆ และศึกษาการทดสอบประทับลาย 2 วิธีคือสร้างลวดลายผ่านกระบวนการ Photoresist etching และสร้างลวดลายเปิดช่อง SiO_2 ได้โดยตรง

1.4.5 ทดลองวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่นคุณสมบัติขั้วไฟฟ้าโอห์มมิก ค่าความต้านทานอนุกรมค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวสัมผัส ค่าช่วงชีวิตของพาหะ เพื่อให้เกิดคุณภาพการพาสซีเวชันที่ผิวที่ดีและเหมาะสมกับโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

1.4.6 ตรวจสอบวิเคราะห์โครงสร้างของชั้นพาสซีเวชันด้วยการวัดโครงสร้างด้วยเครื่องวัดกำลังขยายสูงด้วยอิเล็กตรอน (SEM) เพื่อวิเคราะห์ร่วมกับผลการวัดทางไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์

1.4.7 ทดสอบวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์ที่ผลิตได้จริง และจากการจำลองด้วยโปรแกรมคณิตศาสตร์ PC1D

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.5.1 เป็นองค์ความรู้ในการแนวทางใหม่สำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบ LBSF ด้วยเทคนิค Stamp ซึ่งเป็นแนวทางที่ไม่พึ่งพาเทคโนโลยีเลเซอร์ และระบบสุญญากาศพิเศษ เพื่อลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์

1.5.2 เผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ และตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการ ดังนี้

กมลชนก เมฆหมอก วรากร ลี้มศิริ และ **ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณ์รักษ์** “การสร้างชั้น Local Back Surface Field (LBSF) ที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนโดยวิธีการประทับลายด้วย Flash foam” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 13-15 มิถุนายน 2561 จ.ระยอง หน้า 791-794

A. Mangkornkaew and T. Fangsuwannarak, Characterization of patterns of Localized Doping Using Stamping technique for Selective n-Emitter Solar Cell Structure, Materials Science and Engineering 241, 012042 (2017)

1.5.3 ผลิตภัณฑ์ในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สำเร็จในปีการศึกษา 2560 ได้ 1 คนที่มีความรู้ ความสามารถเฉพาะในการพัฒนาเทคโนโลยีผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่ได้



บทที่ 2

การออกแบบและสร้างเครื่องประทับลายสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

2.1 บทนำ

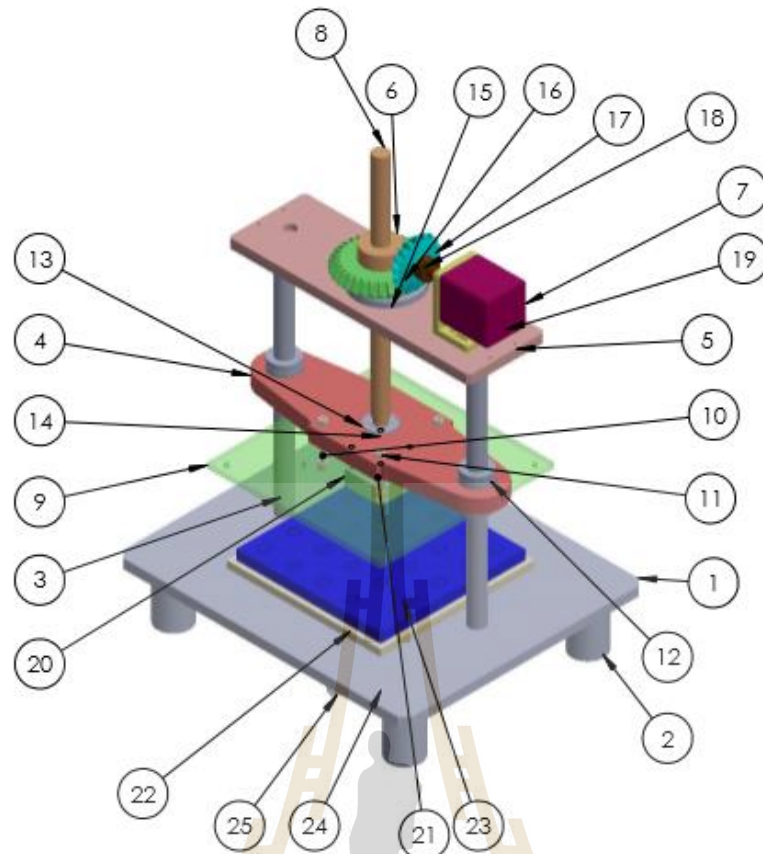
การศึกษาเทคนิคใหม่ของการเปิดช่องไดโอดเล็กทรอนิกส์ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน ประสิทธิภาพสูงของงานวิจัยนี้ ได้ใช้แนวคิดแบบใหม่จากการใช้วิธีการประทับลวดลายสารละลายด้วยแผ่น Flash foam สำหรับเปิดช่องให้กับเซลล์แสงอาทิตย์เป็นครั้งแรก โดยไม่พึ่งพาเทคนิคโฟโตลิโทกราฟีที่มี ขั้นตอนการผลิตซับซ้อน ทำให้ไม่เหมาะสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับอุตสาหกรรม ปัจจุบันมีการใช้เทคนิคเลเซอร์เปิดช่องไดโอดเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีข้อดีในแง่การผลิตที่รวดเร็ว มีประสิทธิภาพและความแม่นยำ ถูกต้อง แต่ต้องเพิ่มขั้นตอนการผลิตฟิล์มบางของอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นในโครงสร้างสำหรับป้องกันการเกิดจุดบกพร่องและเป็นแหล่งสารเจือปนบริเวณที่เปิดช่องไดโอดเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นวิธีการเปิดช่องไดโอดเล็กทรอนิกส์ด้วยการประทับลวดลายของสารละลายสีกัดผิวไดโอดเล็กทรอนิกส์ จึงเป็นทางเลือกของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง ที่ประกอบด้วยบริเวณแพร่สารเจือปนบริเวณหรือลวดลายที่ต้องการ ที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ และมีขั้นตอนการผลิตไม่ซับซ้อน

2.2 การออกแบบเครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติ

เครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติที่ออกแบบด้วยโปรแกรม Solid work ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ส่วนหลัก ๆ คือ

1. ชุดโครง และ ฐานรองยึดชิ้นงาน โดยที่แผ่นฐานของเครื่องใช้แผ่นอะลูมิเนียมหนา 10 cm และแผ่นรองรับแผ่นซิลิคอนใช้วัสดุ POM
2. ระบบขับเคลื่อนหัวประทับลาย ด้วยมอเตอร์แบบสเตปเปอร์ NEMA 17 พิกัด 24V 2A
3. ชุดไฟฟ้าและระบบควบคุมการประทับลาย ด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าขนาด 24V 3A
4. ชุดหัวประทับลายจากวัสดุ Flash foam เป็นวัสดุโพลีเมอร์มีลักษณะเป็นโฟมมีรูพุด และมีความสมบัติเช่นเดียวกับสารไวแสง หรือ Photo resist

ภาพของเครื่องประทับลายที่ออกแบบแสดงในรูปที่ 2.1 และตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดของ ชิ้นส่วน แบบและขนาดเขียนด้วยโปรแกรม Solid work รูปที่ 2.2 แสดงภาพของเครื่องที่ประกอบสมบูรณ์



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครื่องประทับลายต้นแบบ

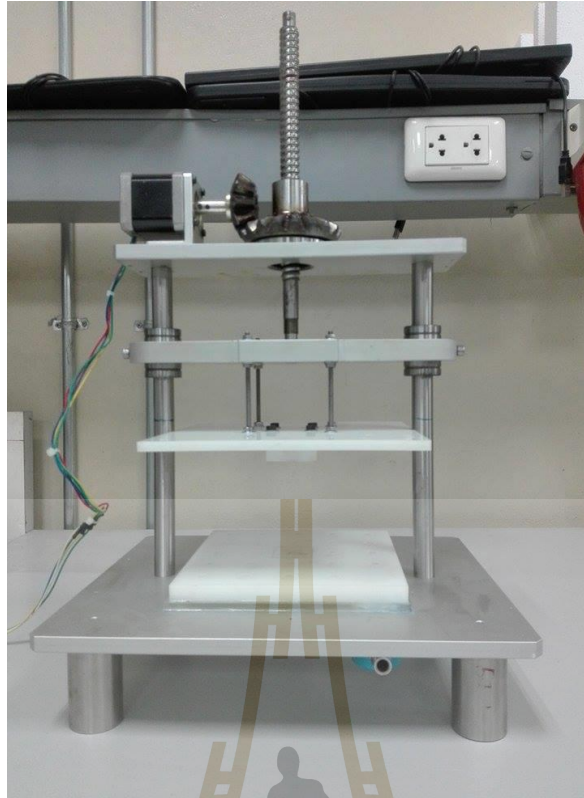
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องประทับลาย

No.	ชื่อส่วนประกอบ	ลักษณะ	หน้าที่	จำนวน
1	ฐานล่าง (Base plate)	อะลูมิเนียมสีเหลี่ยมตัน	สำหรับรองเสา และรองปอม	1
2	ขา (Leg)	เหล็กทรงกลมกลวง	สำหรับต่อข้างใต้ฐานล่าง เพื่อให้ ง่ายต่อการเคลื่อนย้าย	4
3	เสา (Post)	เหล็กกลมตัน	ทำเกรียวสำหรับยึดฐานล่างกับฐาน บน	2
4	ตัวยึดเสา (Locking post)	แผ่นอะลูมิเนียม	ติดกับแบริ่งที่ใช้ยึดกับเสาเพื่อให้ เป็นแนวเคลื่อนที่ขึ้นลงตรงกลาง เจาะรูเพื่อติดกับบอล	1
5	ฐานบน (Base on)	อะลูมิเนียมแผ่นสีเหลี่ยม	ใช้ยึดเสาด้านบนกับ เป็นช่องใส่ แกนของบอลสกรู	1

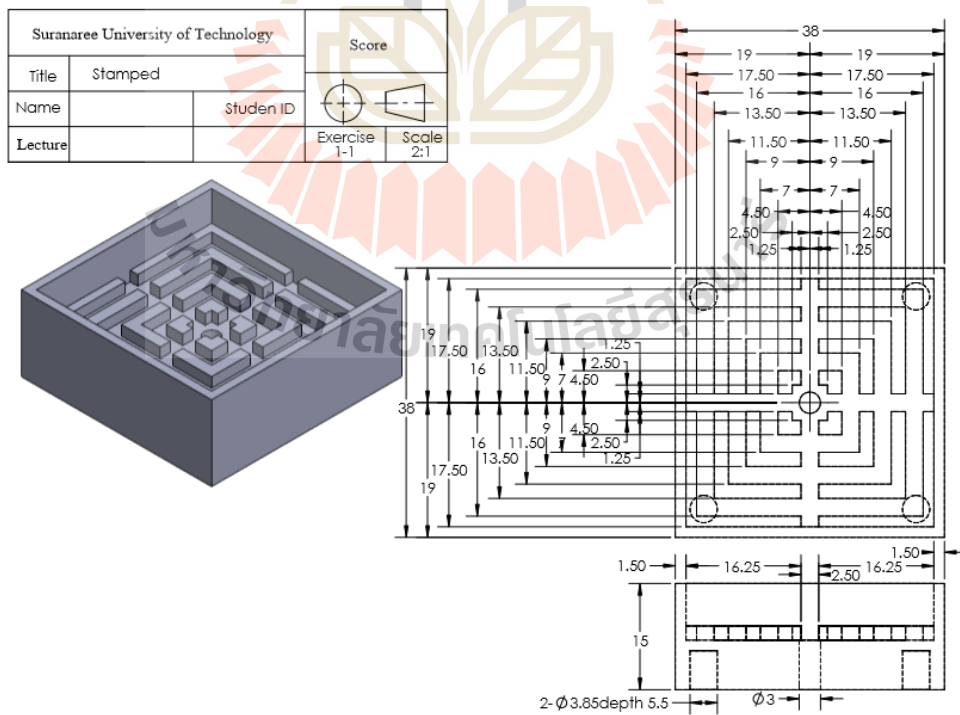
6	บอล (Ball)	เหล็กทรงกลม	ใช้สำหรับใส่ลูกปืนเพื่อให้สกรูเคลื่อนที่สะดวก	1
7	สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper motor)	มอเตอร์รูปทรงสี่เหลี่ยม	ใช้ขับบอลสกรู ควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ในการสั่งบอร์ดให้ไปขับสเต็ปมอเตอร์รุ่น NEMA 17	1
8	สกรู (Screw)	เหล็กเกลียว	เป็นแกนยึดกับหัวประทับลาย ใช้ในการเคลื่อนที่ขึ้นลง	1
9	ที่รองสำหรับเปลี่ยนหัวประทับลาย (Pad stamped)	อะคริลิคแผ่นสี่เหลี่ยม	เจาะรูสำหรับเปลี่ยนขนาดของหัวประทับลาย	1
10	โบลต์ ขนาด M4x20 (Blots M4x20)	มีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 mm ยาว 20 mm	ใช้สำหรับยึดหัวประทับลายกับตัวยึดเสา	4
11	นัท M4 (Nut M4)	มีรูตรงกลางเป็นเกลียว ขนาด 4 mm	ที่ไว้ใส่กับโบลต์ M4	8
12	แบริ่ง 1 (Bearing 1)	เหล็กทรงกลมกลวงมีลูกปืนอยู่ข้างใน	เป็นตัวที่ติดกับตัวยึดเสา ลดแรงต้านขณะเคลื่อนที่	1
13	แบริ่ง 2 (Bearing 2)	เหล็กทรงกลมกลวงมีลูกปืนอยู่ข้างใน	เป็นตัวที่ติดกับตัวยึดเสา ลดแรงต้านขณะเคลื่อนที่	1
14	แบริ่ง 3 (Bearing 3)	เหล็กทรงกลมกลวงมีลูกปืนอยู่ข้างใน	เป็นตัวที่ยึดติดกับกับแกนสกรูด้านล่าง	1
15	ฐานลองเกียร์ (Base gear)	เหล็กทรงกลมกลวงมีลูกปืนอยู่ข้างใน	เป็นแบริ่งขนาดใหญ่ที่ใช้ต่อกับเกียร์และยึดกับฐานบน ลดแรงต้านขณะเคลื่อนที่	1
16	เกียร์ 1 (Gear 1)	เหล็กทรงกลมมีเฟือง 18 ซี่	เป็นเกียร์ที่ใช้ติดกับฐานบนกับบอลสกรู	1
17	เกียร์ 2 (Gear 2)	เหล็กทรงกลมมีเฟือง 10 ซี่	เป็นเกียร์ที่ติดกับแกนของสเต็ปเปอร์มอเตอร์	1

18	ที่สวมเกียร์(Gear shaft)	เหล็กเกียร์เจาะรูตรงกลาง	เป็นที่สวมเกียร์กับสเต็ปเปอร์มอเตอร์ให้ยึดติดกัน	1
19	ฐานรองมอเตอร์ (Pad motor)	อะลูมิเนียมฉาก	เป็นฐานใช้รองมอเตอร์ เพื่อปรับระยะที่ให้เสถียร	1
20	หัวประทับลาย (Stamped)	POM สีเหลือง สกัดลาย CNC ด้านล่าง	มีลักษณะสีเหลือง มีช่องสำหรับใส่ Flash foam	1
21	ตัวหนอน M4x10 (Socket set screw M4x10)	เป็นเกลียวแฉก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 mm ยาว 10 mm	ใช้สำหรับยึดหัวประทับลายกับที่รองสำหรับเปลี่ยนหัวประทับลาย	4
22	ฐานรองแผ่น POM สำหรับดูดสุญญากาศ (Pad POM)	อะคริลิกแผ่นสีเหลือง	ใช้สำหรับรองฐานรองแผ่น POM สำหรับดูดสุญญากาศ เพื่อไม่ให้แผ่นมีลมรั่ว	1
23	แผ่น POM ต่อร่วมกับระบบดูดสุญญากาศ	POM แผ่นสีเหลือง สกัดร่องด้วย CNC เพื่อยึดแผ่นซิลิโคนด้วยการดูดสุญญากาศ	เพื่อยึดแผ่นซิลิโคนด้วยการดูดสุญญากาศ	1
24	ท่อ พีวีซี (PVC)	ท่อพีวีซีทรงกลมกลาง	สำหรับต่อกับหัวต่อกับเครื่องดูดสุญญากาศ	1
25	หัวต่อลม (Quick coupler)	เหล็กทรงกลมกลวงมีช่องสำหรับยึดสายท่อลม	เป็นตัวที่ใช้สำหรับต่อกับเครื่องดูดสุญญากาศ	1

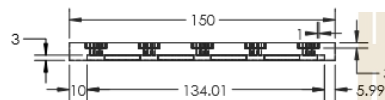
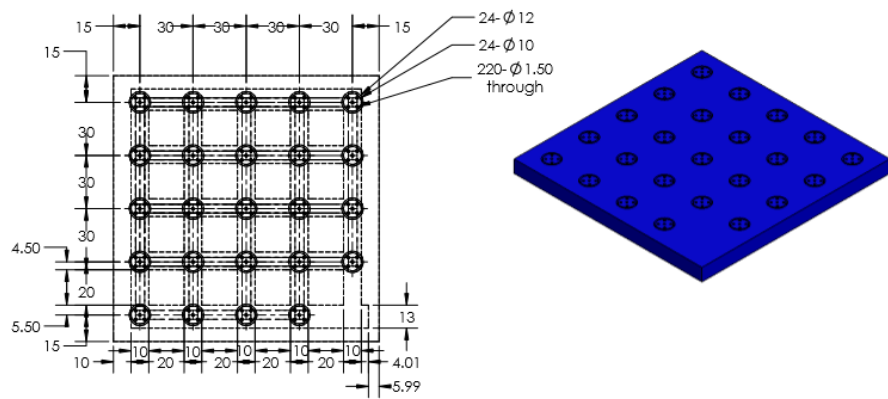
รูปที่ 2.2 แสดงภาพเครื่องประทับลวดลายกึ่งอัตโนมัติ ในส่วนของชุดหัวประทับลายเพื่อบรรจุแผ่น Flash foam แสดงแบบในรูปที่ 2.3 ได้ทำการสกัดเป็นร่องด้วย CNC รูปที่ 2.4 แสดงแผ่นฐานรองแผ่นซิลิโคน สกัดรูเล็ก ๆ และประกบกับแผ่นอะคริลิก ในรูปที่ 2.5 และเชื่อมให้ 2 แผ่นติดกันด้วยซิลิโคนติดรอบ ๆ ขอบแผ่น รูของแผ่นในรูปที่ 2.5 จะต่อร่วมกับระบบดูดสุญญากาศต่อไป การต่อระบบสุญญากาศเข้ากับชุดแผ่นรองเซลล์ซิลิโคน ได้ใช้เครื่องดูดสุญญากาศ ยี่ห้อ GAST รุ่น DOA-P604-BN ที่ระดับ 0 – 160 psi ต่อร่วมกับชุดแผ่น POM – อะคริลิก เพื่อยึดแผ่นเซลล์ไม่ให้เคลื่อนที่ขณะประทับลวดลายของสารละลายที่ต้องการลงบนแผ่นเซลล์ แสดงเครื่องประทับลาย ชุดควบคุมสตีปเปอร์มอเตอร์ และเครื่องดูดสุญญากาศในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.2 เครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติ

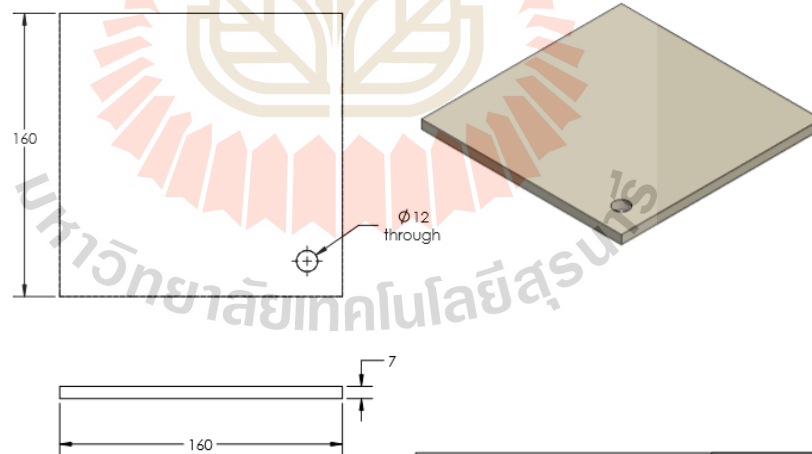


รูปที่ 2.3 ชุดหัวบรรจุแผ่น Flash foam



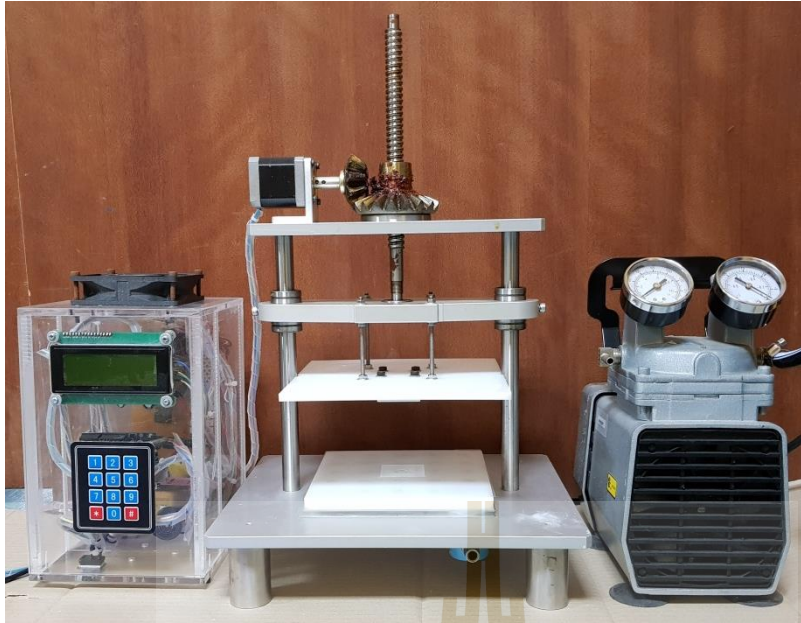
Suranaree University of Technology		Score	
Title	POM		
Name	Student ID		
Lecture		Exercise 1-1	Scale 1:2

รูปที่ 2.4 แผ่น POM สำหรับฐานวางแผ่นซิลิคอน



Suranaree University of Technology		Score	
Title	Pad POM		
Name	Student ID		
Lecture		Exercise 1-1	Scale 1:2

รูปที่ 2.5 แผ่นอะคริลิกสำหรับรองแผ่น POM และต่อร่วมกับท่อดูดสูญญากาศ



รูปที่ 2.6 เครื่องประทุบลาย ชุดควบคุมสตีปมอเตอร์ และเครื่องดูสัญญาณ

2.3 การเลือกขนาดของสตีปมอเตอร์และการออกแบบวงจรไฟฟ้า

ก่อนทำการเลือกขนาดของสตีปมอเตอร์ ได้ทดสอบการประทุบลายด้วยการกดด้วยแรงคน ซึ่งจะได้อัตราแรงกด (F) เริ่มต้นค่าหนึ่งและคำนวณเป็นค่าแรงบิด (Torque) และนำค่าดังกล่าวไปเลือกค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่ขายตามท้องตลาด โดยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานของสตีปมอเตอร์ได้แก่ ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ที่ควบคุมความเร็วและการหมุนของสตีปมอเตอร์ และวงจรขับสตีปเปอร์มอเตอร์ ที่รับสัญญาณ PWM (Pulse width modulation) จากไมโครคอนโทรลเลอร์

2.3.1 การคำนวณหาขนาดของสตีปมอเตอร์

จากการทดลองประทุบลายด้วยมือ แรงกดที่ได้ลวดลายจากการประทุบลายมีค่าประมาณ 5 N และกำหนดให้ค่าแรงโน้มถ่วงของโลกเท่ากับ 9.81 m/s^2 จะได้น้ำหนักของแรงกด ดังสมการที่ (2.1)

$$m = \frac{F}{g} = \frac{5 \text{ N}}{9.81 \text{ m/s}^2} = 0.51 \text{ kg} \quad (2.1)$$

โดยที่ m คือ น้ำหนักของแรงกด (kg)

F คือ แรงในการกด (N)

g คือ แรงโน้มถ่วงของโลกเท่ากับ 9.81 m/s^2

การคำนวณหาค่าแรงบิด ได้กำหนดแฟคเตอร์เท่ากับ 10 เท่า ทำให้ได้น้ำหนักแรงกดเท่ากับ 5.1 kg จากนั้นคำนวณแรงในการกดจะได้เท่ากับ 50 N ซึ่งค่าที่ได้จากการเผื่อโหลด จะสามารถนำมาหาค่า

แรงบิดได้จากสมการที่ (2.2)

$$T = \frac{Fp}{2\pi e} = \frac{50 \text{ N} \times 2 \text{ mm}}{2 \times \pi \times 0.8} = 0.02 \text{ N.m} \quad (2.2)$$

โดยที่ T คือ แรงบิดที่เกิดขึ้น

F คือ แรงกดที่เอาชนะแรงเสียดทาน (N)

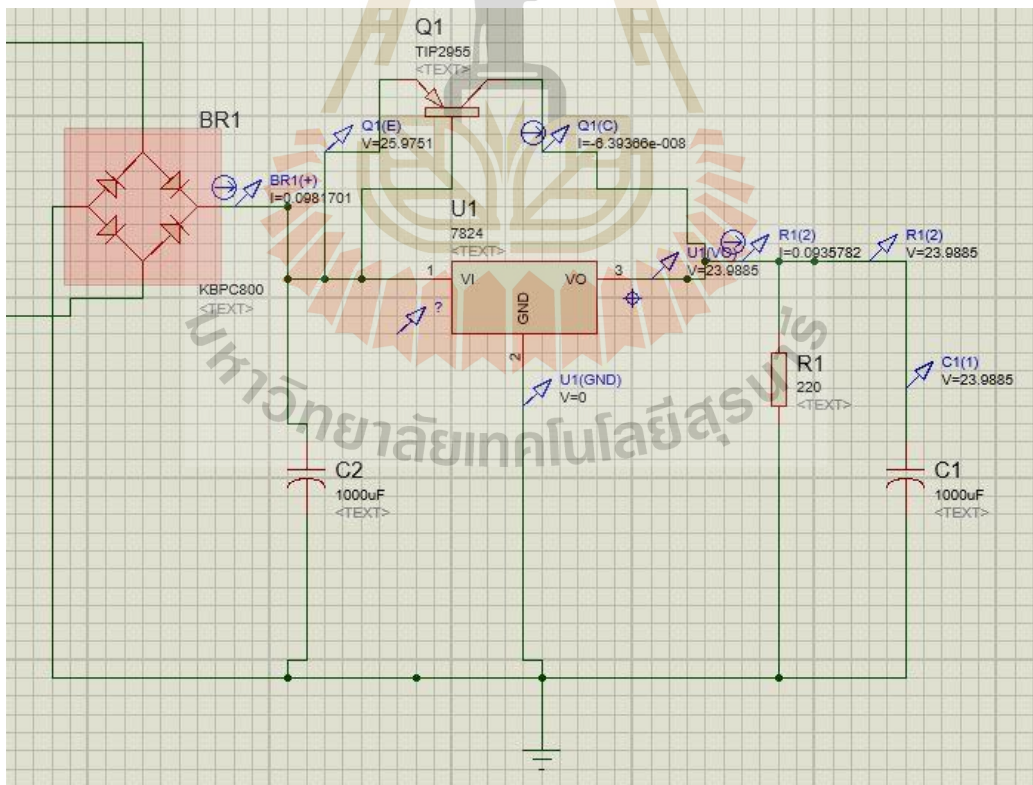
p คือ ระยะ Pitch ของบอลสกรู (Nm)

e คือ ประสิทธิภาพของบอลสกรู (80%)

ดังนั้นจึงเลือกสเต็ปมอเตอร์ที่มีค่าแรงบิดมากกว่า 0.02 N.m เลือกใช้สเต็ปมอเตอร์ รุ่น NEMA ที่มีค่าแรงบิดอยู่ที่ 0.48 N.m พิกัด 24V 2A

2.3.2 การออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

การออกแบบแหล่งจ่ายตามพิกัดของมอเตอร์ ดังนั้นจึงต้องเลือกหม้อแปลงที่มีขนาด 24v 3A และออกแบบวงจรไฟฟ้าและจำลองการทดสอบผ่านโปรแกรม Proteus รูปที่ 2.7 แสดงแบบวงจรของแหล่งจ่ายไฟฟ้า



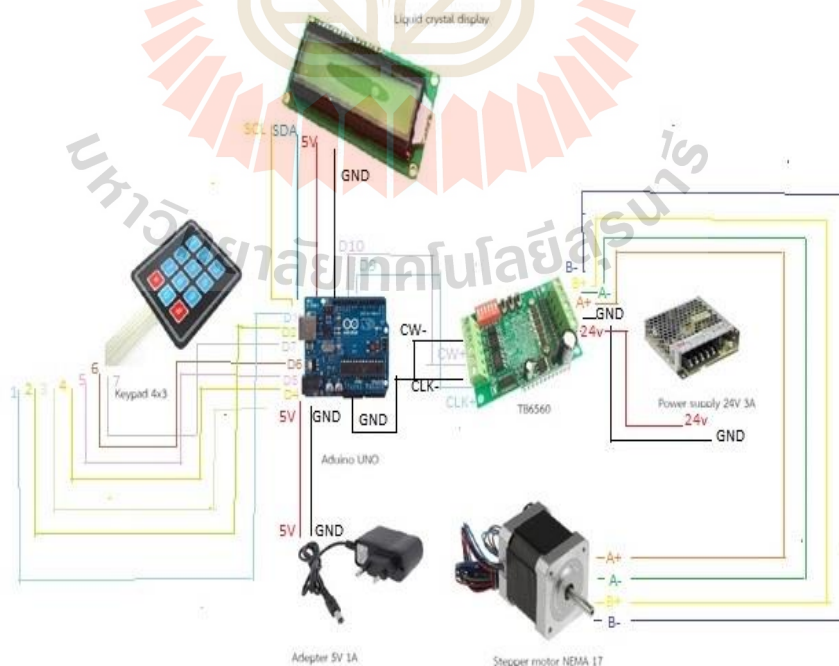
รูปที่ 2.7 วงจรไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ขนาด 24v 3A

2.3.3 วงจรควบคุมสเต็ปมอเตอร์

การควบคุมสเต็ปมอเตอร์พิจารณา 2 ส่วนคือ การควบคุมความเร็วของสเต็ปมอเตอร์ และการควบคุมทิศทางหมุนของสเต็ปมอเตอร์ โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เป็นตัวที่ควบคุมการทำงาน การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ใช้วิธี PWM (Pulse width modulation) โดยการสร้างพัลส์รูปสี่เหลี่ยมให้มีเวลาของการเปิดและปิด (Duty cycle) ขนาดต่างๆ ซึ่งถ้าให้ช่วงเวลาของการเปิดมาก จะทำให้มอเตอร์มีความเร็วในการหมุนที่เร็วมากขึ้นตามไปด้วย โดยพัลส์ที่กล่าวมานั้นจะมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ซึ่งการควบคุมการหมุน สั่งได้โดยการใส่เครื่องหมายลบ (-) หน้าค่า PWM (Pulse width modulation) ไมโครคอนโทรลเลอร์ จะได้ทิศทางอีกด้านหนึ่งหนึ่ง ซึ่งสัญญาณ PWM จะเป็นค่าที่ป้อนให้บอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ทำงาน โดยมีลักษณะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ควบคุมสเต็ปมอเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.8

การป้อนค่าควบคุมการทำงานของเครื่องประตบปลายนั้นได้ใช้วิธีป้อนค่าเป็นตัวเลขให้ทำงานตามต้องการ โดยใช้ปุ่มกด Keypad 4x3 ในการป้อนค่าและใช้จอแสดงผลแอลซีดี (Liquid crystal, LCD) ในการแสดงผล เพื่อเลือกกำหนดค่าที่เหมาะสมสำหรับการกดประตบลวดลาย เนื่องจากลวดลายที่ประตบมีขนาดแตกต่างกัน ดังนั้นจึงใช้ระดับการกดที่แตกต่างกัน

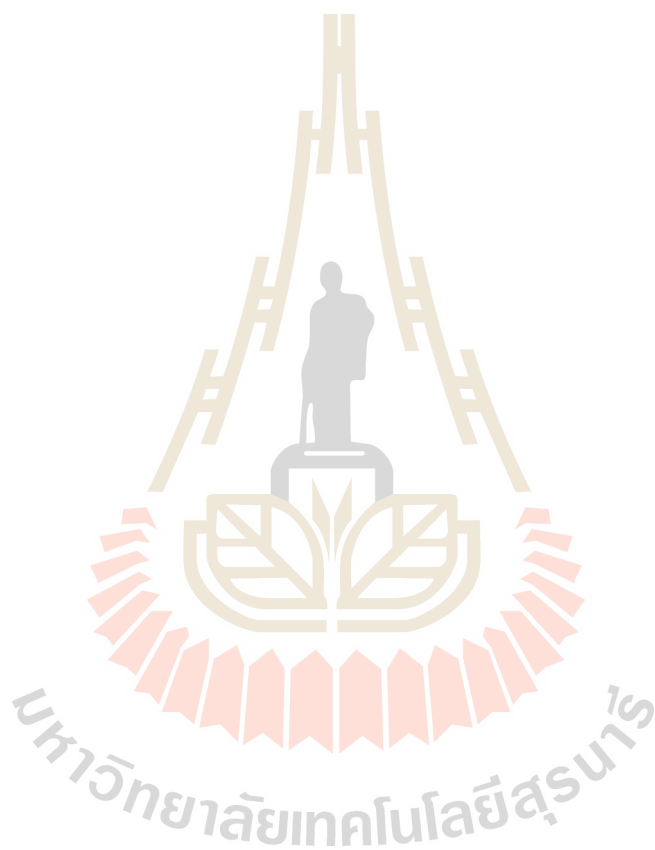
การออกแบบเขียน Code คำสั่งเพื่อควบคุมสเต็ปมอเตอร์ใช้โปรแกรม Aduino ในการเขียน โดยสามารถป้อนระยะทางเคลื่อนที่ของหัวประตบปลายในระดับต่าง ๆ ตามคำสั่งที่เขียนกำหนดได้ 64 steps และเมื่อถึงระยะประตบลวดลายสามารถกำหนดเลือกเวลาการแช่ค้างไว้ได้ไม่เกิน 1 นาที



รูปที่ 2.8 การเชื่อมต่อของอุปกรณ์ควบคุมสเต็ปมอเตอร์

2.4 สรุป

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการสร้างเครื่องประทับลายต้นแบบสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ เครื่องสามารถปรับระดับหัวประทับบนชิ้นงานได้หลายระดับ ขึ้นกับขนาดของลวดลาย และสารละลายที่ถ่ายทอดลวดลายลงบนชิ้นงาน ชุดหัวประทับลายสามารถสวมประกอบร่วมกับแผ่น Flash foam และสามารถเปลี่ยนขนาดพื้นที่ใหญ่ได้



บทที่ 3

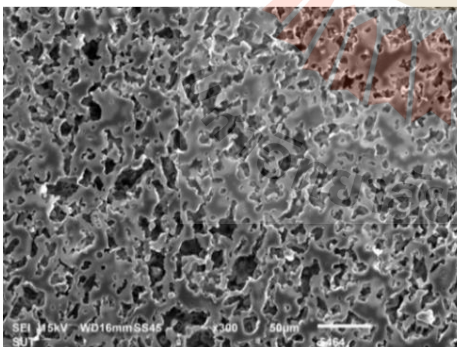
การทดสอบประสิทธิภาพลวดลายสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

3.1 บทนำ

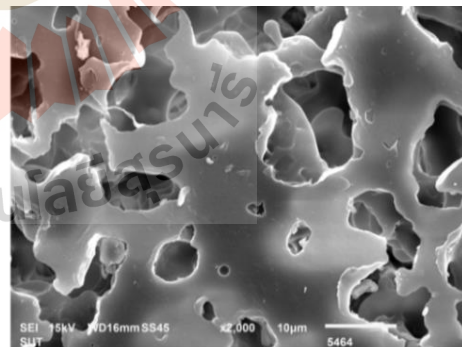
การเปิดช่องไดโอดเล็กทริกของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Local Back Surface Field (LBSF) โดยปกติพิจารณาสัดส่วนของการเปิดช่องต่อพื้นที่ทั้งหมด (Aperture ratio) เป็นหลักมากกว่าการพิจารณาเพียงขนาดของช่องเปิดซึ่งอาจมีขนาดใหญ่ จึงไม่มีความจำเป็นที่ต้องใช้วิธีโฟโตลิโทกราฟี เมื่อพิจารณาโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Selective emitter ดังนั้นวิธีการประทับลายในงานวิจัยจึงเป็นการศึกษาครั้งแรกเลือกใช้การผลิตลวดลายขนาดใหญ่ระดับ 100 ไมครอนขึ้นไป สำหรับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอน ในบทนี้ได้กล่าวถึงคุณลักษณะทางโครงสร้างของ Flash foam การสร้างลวดลายของฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ และลวดลายของฟิล์มสารละลายโบรอนสำหรับโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบ LBSF รวมถึงการวิเคราะห์ลักษณะของลวดลายที่เกิดขึ้น

3.2 ลักษณะพื้นผิวของแผ่น Flash foam

Flash foam เป็นวัสดุโพรเมอร์ไวแสงประเภท poly-imide ชนิดหนึ่ง ความหนาสามารถเลือกได้ตามความเหมาะสมเพื่อดูดซับสารละลายในปริมาณที่ต่างกัน ลักษณะพื้นผิวของแผ่นสามารถวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์ขยายด้วยวิธียิงลำอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) จากเครื่อง JEOL รุ่น j6010LV โครงสร้าง Flash foam ในสภาพปกติมีลักษณะเป็นรูพรุนแสดงในรูปที่ 3.1(ก) และ (ข)



(ก)

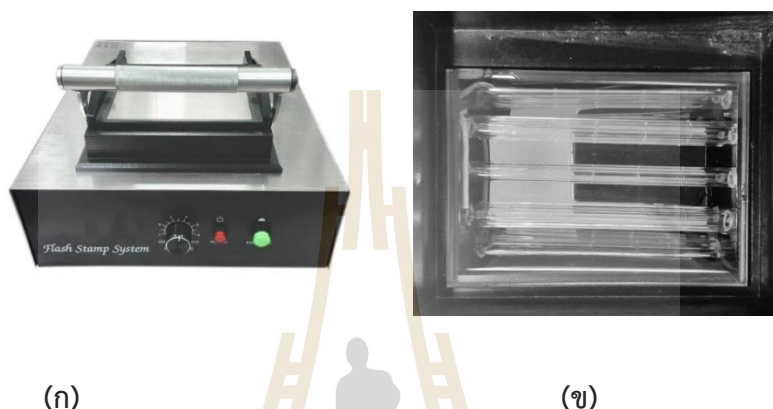


(ข)

รูปที่ 3.1 (ก) โครงสร้างพื้นผิวของ Flash foam ที่กำลังขยาย 300 เท่า และ (ข) ที่กำลังขยาย 2000 เท่า

เทคนิคการประทับลายได้เลือกใช้ Flash foam ที่เป็นวัสดุโพลีเมอร์ไวแสง เมื่อมีแสงแฟลชส่องผ่านจะเกิดปฏิกิริยาทำให้โพลีเมอร์ที่มีลักษณะรูพรุนละลาย และเชื่อมต่อกัน ลวดลายบนแผ่น Flash foam สามารถสร้างได้ตามแบบลวดลายของหน้ากาก ซึ่งแผ่น Flash foam มีลักษณะที่เป็นรูพรุนที่

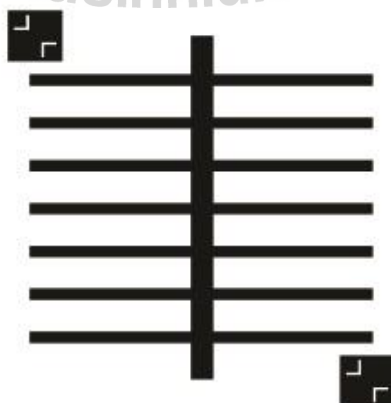
สามารถดูดซับสารละลาย เพื่อใช้สำหรับการประทับลายของสารละลายที่ต้องการได้ แสดงพื้นผิวของ Flash foam ในรูปที่ 1 โดยการสร้าง Flash foam ประทับลายได้ใช้เครื่อง Flash รุ่น JL-V มีแหล่งกำเนิดแสงแฟลชจำนวน 5 หลอด แสดงดังรูปที่ 3.2 ในขั้นแรกเริ่มจากการออกแบบลวดลายหน้ากากที่บดแสง ป้องกันแสงแฟลชตามที่ต้องการ จากนั้นนำ Flash foam และแบบลวดลายหน้ากากที่เตรียมไว้เข้าเครื่อง Flash Stamp แสงแฟลชจะทำปฏิกิริยากับ Flash foam ซึ่งจะได้ลวดลายเป็นลักษณะบริเวณลายเปิดและลายปิดตามที่ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2 ขนาดที่ Flash foam สามารถผลิตเล็กที่สุดได้ขนาดไม่ต่ำกว่า $100\ \mu\text{m}$



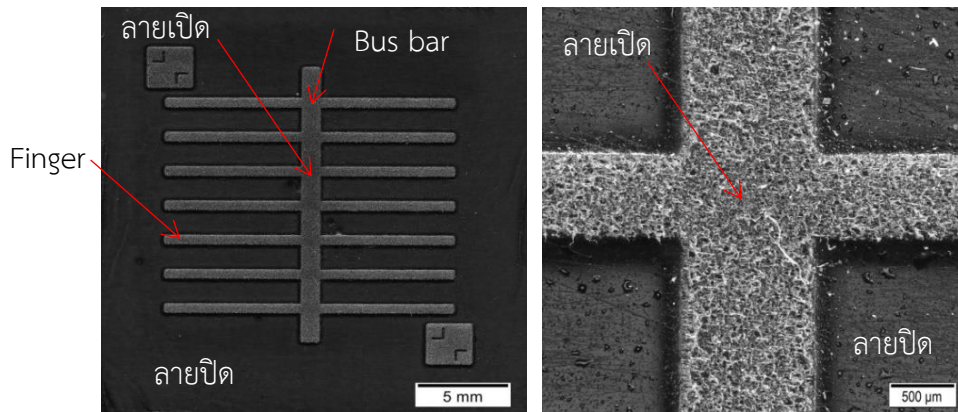
รูปที่ 3.2 ภาพถ่าย (ก) เครื่อง Flash Stamp รุ่น JL-V และ (ข) หลอดแฟลชภายในเครื่อง

3.2.1 การสร้างลวดลายสารไวแสงด้วย Foam stamp

การศึกษาลวดลายในขั้นต้นใช้ลวดลายหน้ากากปิดแสงลักษณะแบบขั้วไฟฟ้ากริด มีขนาด Bus bar กว้างเท่ากับ $1000\ \mu\text{m}$ และบริเวณ Finger มีขนาดกว้างเท่ากับ $500\ \mu\text{m}$ แสดงในรูปที่ 3.3 โดยได้ออกแบบให้มีขนาดใหญ่กว่าแบบของขั้วไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อประทับสารไวแสง (Photo resist) ในบริเวณลวดลายขั้วไฟฟ้า จากนั้นนำหน้ากากที่เตรียมไว้วางบนแผ่น Foam ไวแสงและเข้าเครื่อง Flash Stamp เป็นเวลาไม่กี่วินาที จะได้ลวดลายบน Foam Stamp แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ลวดลายหน้ากากปิดแสงลักษณะแบบขั้วไฟฟ้ากริด

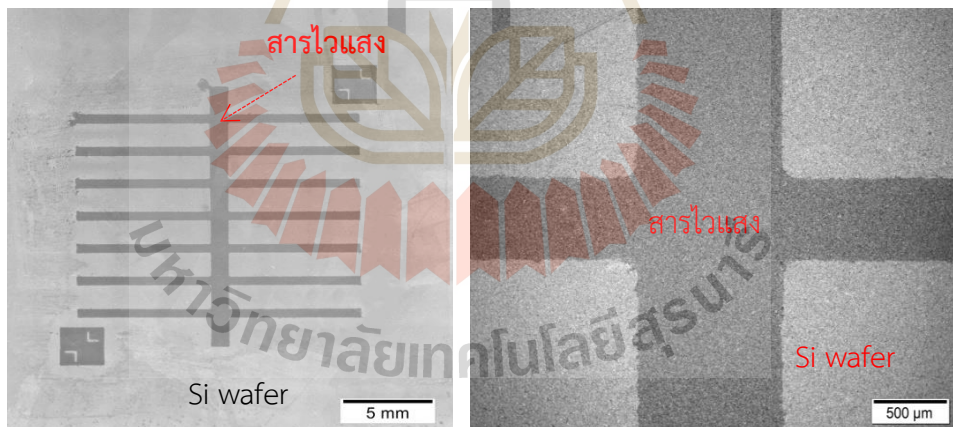


(ก)

(ข)

รูปที่ 3.4 (ก) ลักษณะของลวดลายที่เกิดขึ้นบน Foam stamp และ (ข) ภาพขยายกำลังขยาย 50 เท่า

รูปที่ 3.4 แสดงลวดลายที่เกิดขึ้นบน Foam stamp จากผลพบว่าลวดลายเกิดขึ้นมีลักษณะเช่นเดียวกับแบบตามรูปที่ 3.3 และเมื่อวัดขนาดลวดลายของ Bus bar ที่เกิดขึ้นบน Foam stamp พบว่ามีขนาดเท่ากับ 1080.56 μm ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าแบบประมาณ 8.05 % และขนาดของ Finger วัดได้ 542.38 μm ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าแบบประมาณ 8.41 % หลังจากนั้นให้ Foam stamp ดูดซับสารไวแสงและสวมเข้ากับหัวเครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติ



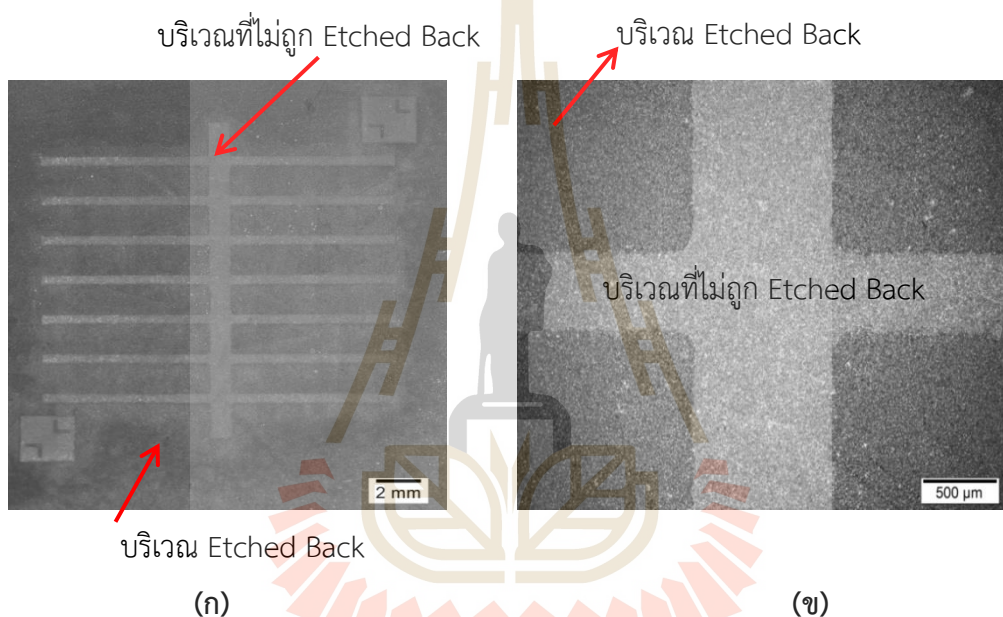
(ก)

(ข)

รูปที่ 3.5 (ก) ลวดลายสารไวแสงที่เกิดขึ้นหลังจากการประทับลาย และ (ข) ภาพขยายที่กำลังขยาย 50 เท่า

รูปที่ 3.5 แสดงภาพลวดลายสารไวแสงพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นบนชั้น n^{++} Si หลังการประทับลาย ซึ่งสารไวแสงนี้ทำหน้าที่เป็นหน้ากปกป้องกั้นการกัดพื้นผิวซิลิคอนในกระบวนการกัดเคมี Etching back หลังจากที่ถูกประทับลวดลายแล้ว ได้ทำการวัดขนาดของลวดลายที่เกิดขึ้นพบว่า Bus bar มีขนาดประมาณ 999.12 μm ซึ่งมีขนาดลดลงจากแบบที่ออกแบบไว้ 0.09 % และขนาดของ Finger วัดได้ประมาณ 513.36

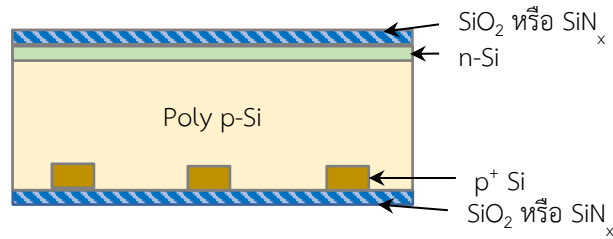
μm พบว่ามีขนาดใหญ่กว่าแบบที่ออกแบบไว้ 2.67 % จากผลแสดงให้เห็นว่าลวดลายสารไวแสงมีความคลาดเคลื่อนจากต้นแบบไม่เกิน 3% บ่งบอกให้เห็นว่าวิธีการประทับลายสามารถใช้ได้ในงานอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ได้เช่นกัน เมื่อนำแผ่นซิลิคอนที่ถูกประทับลวดลายด้วยสารไวแสง และนำไปผ่านกระบวนการสกัดเคมี Etching back ด้วยการแช่ HF นาน 15 วินาที เพื่อให้ส่วนของชั้น n^{++} Si ถูก Etched back ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นเพิ่มขึ้น ซึ่งค่านี้จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา Etched back ที่นานขึ้น จากผลพบว่าขนาดของลวดลายสารไวแสงบริเวณ Bus bar วัดได้ $928.74 \mu\text{m}$ ซึ่งมีขนาดลดลงประมาณ 7.13 % และบริเวณ Finger วัดขนาดได้ประมาณ $398.82 \mu\text{m}$ ซึ่งมีขนาดลดลงจากแบบที่ออกแบบไว้ประมาณ 20.24 % ลวดลายสารไวแสงที่ผ่านการ Etching back แสดงดังรูปที่ 3.6 จากขนาดที่ลดลงสามารถออกแบบลวดลายให้ใหญ่ขึ้นเพื่อชดเชยผลการสกัดที่ขอบของลายเส้น



รูปที่ 3.6 (ก) ลวดลายหลังจากผ่านการ Etching back และ (ข) ภาพถ่ายลักษณะลวดลายหลังจากผ่านการ Etching back ที่กำลังขยาย 50 เท่า

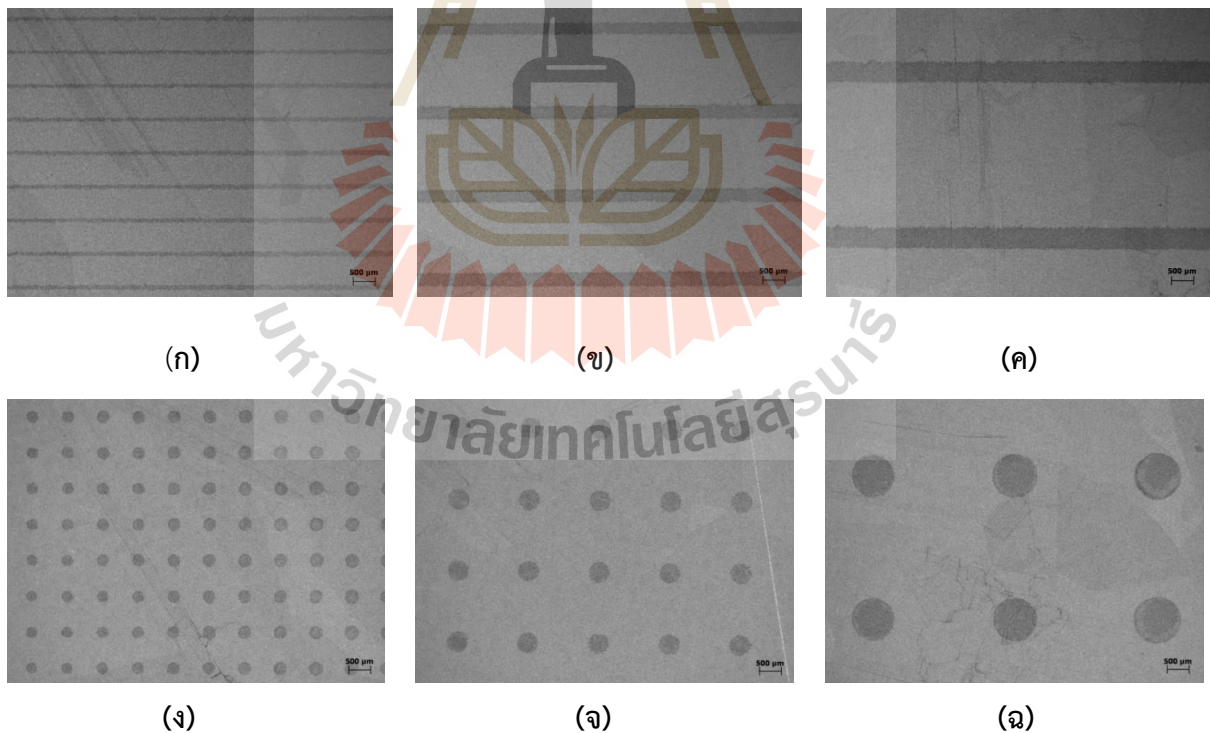
3.2.2 การสร้างลวดลาย Borosilicate ด้วย Foam stamp

ในงานวิจัยได้ทดสอบการประทับลายของ Borosilicate glass (BSG) ด้วยการใส่สารละลายประกอบโบรอนเข้มข้นสูงที่เตรียมในห้องปฏิบัติการ สำหรับเป็นแหล่งสารเจือโบรอน เพื่อได้บริเวณ p^{++} region หลังกระบวนการแพร่ที่อุณหภูมิสูง ที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF แสดงโครงสร้างเซลล์ดังรูปที่ 3.7 ค่า Aperture ratio เป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิด p^{++} region กับระยะห่างระหว่างช่องเปิด ซึ่งมีผลต่ออัตราการรวมตัวใหม่ที่ผิวและค่าช่วงชีวิตของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ ขณะเดียวกันขนาดของบริเวณ p^{++} region ยังมีผลต่อตัวแปรทางไฟฟ้าต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์เช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทดสอบการประทับลวดลายสารละลายโบรอนในขนาดต่าง ๆ



รูปที่ 3.7 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบ LBSF

ในขั้นตอนแรกนำแผ่นฐานผลึกโพลีซิลิคอนชนิด p-type ขนาด $3 \times 3 \text{ cm}^2$ มีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะระหว่าง 1-3 โอห์มเซนติเมตร ความหนา $200 \mu\text{m}$ นำมากำจัดชั้นออกไซด์ (Native oxide) ด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) เข้มข้น 5% เป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นทำความสะอาดพื้นผิวด้วยวิธี RCA ต่อมาทำการประทับลายสารละลายประกอบโบรอนด้วยเครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติ ในรูปแบบลายเส้นที่ด้านหลังของแผ่นฐาน p-Si โดยมีความกว้างของลายโบรอนประมาณ $250 \mu\text{m}$ และมี Aperture ratio ที่ 100, 50, 20, 15, 10 และ 5% ทำการอบลวดลายโบรอนที่ประทับได้ที่อุณหภูมิ $200 \text{ }^\circ\text{C}$ จากนั้นอบที่อุณหภูมิสูงประมาณ $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ เพื่อให้สารเจือโบรอนแพร่ในบริเวณลวดลายที่ต้องการ



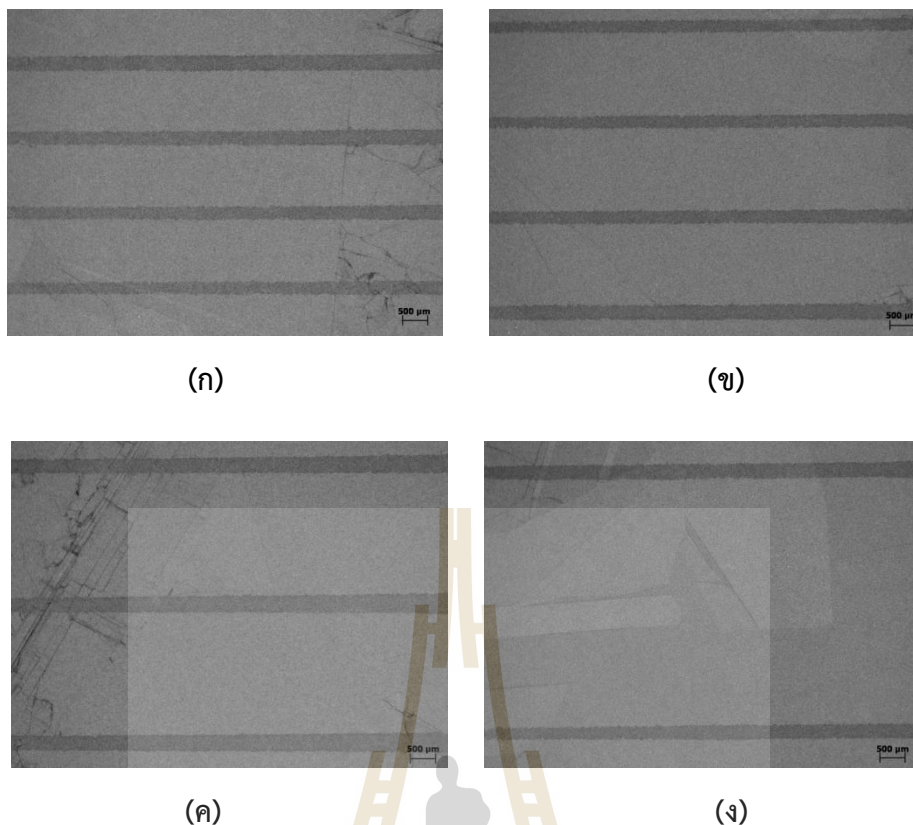
รูปที่ 3.8 ลวดลายฟิล์ม BSG บนแผ่นฐาน p-Si ด้วยการประทับลาย (ก) ลวดลายขนาด $100 \mu\text{m}$ (ข) ขนาด $250 \mu\text{m}$ และ (ค) ขนาด $500 \mu\text{m}$ และลวดลายแบบจุดขนาด (ง) $250 \mu\text{m}$ (จ) $500 \mu\text{m}$ และ (ฉ) $1000 \mu\text{m}$

รูปที่ 3.8 แสดงภาพถ่ายลวดลายของ BSG แบบลายเส้นและลายจุด กำหนด Aperture ratio เท่ากับ 15% โดยประทับลายบนแผ่นฐาน p-Si ในขนาด 100-1000 μm และแสดงรายละเอียดความคลาดเคลื่อนจากแบบได้ในตารางที่ 3.1 จากข้อมูลการวัดขนาดลวดลายด้วยกล้อง Microscope กำลังขยาย 10 เท่า ซึ่งทำการวัดทั้งหมด 5 ครั้งและนำมาเฉลี่ย พบว่าขนาดลวดลายที่ได้จากการประทับลายมีขนาดที่ใกล้เคียงกับขนาดลวดลายที่ออกแบบไว้ โดยมีขนาดแตกต่างกันไม่เกิน 2.5% ในลวดลายจุดไม่สามารถได้ลวดลายในขนาด 100 μm ได้จากข้อจำกัดของสมบัติไวแสง และขนาดรูพรุนของแผ่น Foam พอร์เมอร์ที่ใช้

ตารางที่ 3.1 ผลการประทับลาย BSG แบบลายเส้นและลายจุดเปรียบเทียบกับลวดลายที่ออกแบบในเงื่อนไขขนาดลวดลาย

ลวดลาย	ลวดลายจากการออกแบบ		ลวดลายจากการประทับลาย			
	ขนาดลวดลาย (μm)	ระยะห่าง (μm)	ขนาดลวดลายเฉลี่ย (μm)	Error (%)	ระยะห่างเฉลี่ย (μm)	Error (%)
แบบเส้น	100	660	101.38	1.4%	674.67	2.2%
	250	1650	251.58	0.6%	1664.72	0.9%
	500	3300	493.16	-1.4%	3303.14	0.1%
แบบจุด	250	575	261.20	4.5%	560.74	-2.5%
	500	1150	506.54	1.3%	1151.54	0.1%
	1000	2300	1000.60	0.1%	2286.79	-0.6%

รูปที่ 3.9 (ก)-(ง) แสดงลวดลายของ BSG ลงบนแผ่นฐาน p-Si ที่มีเงื่อนไข Aperture ratio ที่ 20% 15% 10% และ 5% ตามลำดับ จากผลในตารางที่ 3.2 พบว่าขนาดลวดลายที่ได้มีขนาดที่ใกล้เคียงกับขนาดลวดลายที่ออกแบบไว้ โดยมีขนาดแตกต่างกันไม่เกิน 3.6% ดังนั้นวิธีการประทับลายสาร BSG สำหรับการแพร่ในบางบริเวณจึงสามารถนำวิธีการประทับลายซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน ต้นทุนต่ำ สามารถประทับลายได้หลายครั้ง ไม่ใช้ปริมาณสารละลายมากเนื่องจากประทับลายในบริเวณที่ต้องการได้โดยตรง



รูปที่ 3.9 ลวดลาย BSG บนแผ่นฐาน p-Si ด้วยการประทับลายมีขนาด 250 μm และ Aperture ratio ที่ (ก) 20% (ข) 15% (ค) 10% และ (ง) 5%

ตารางที่ 3.2 ผลการประทับลาย BSG แบบลายเส้นเปรียบเทียบกับลวดลายที่ออกแบบในเงื่อนไข Aperture ratio

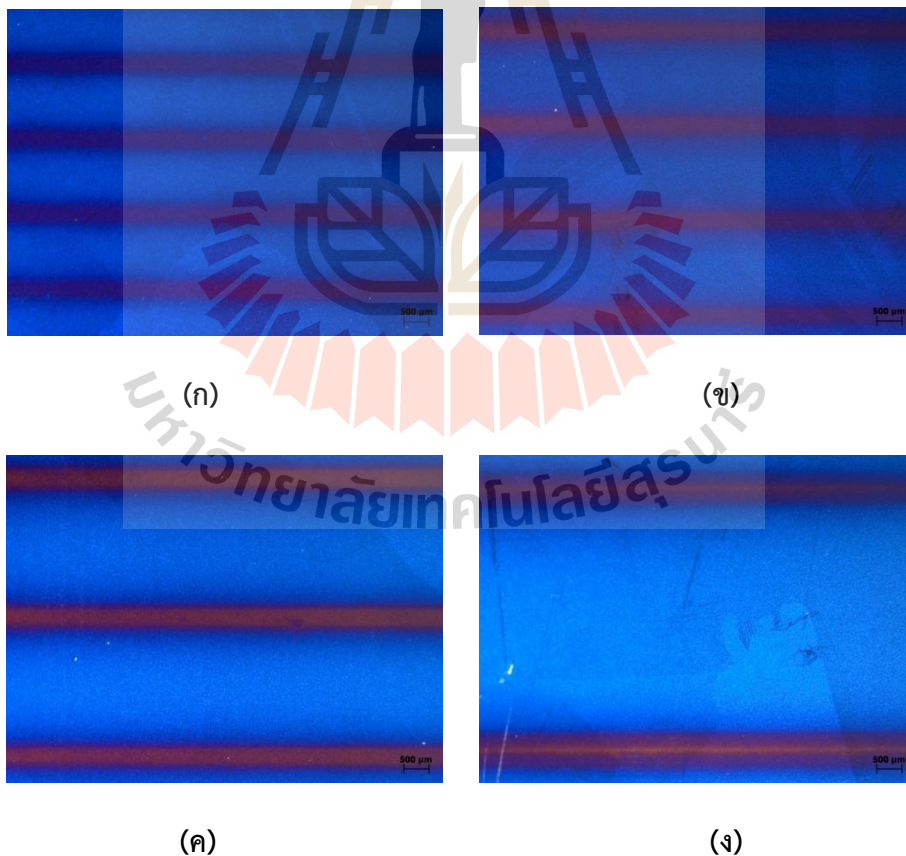
Aperture ratio (%)	ลวดลายจากการออกแบบ		ลวดลายจากการประทับลาย			
	ขนาดลวดลาย (μm)	ระยะห่าง (μm)	ขนาดลวดลายเฉลี่ย (μm)	Error (%)	ระยะห่างเฉลี่ย (μm)	Error (%)
20	250	1250	254.09	1.6%	1252.92	0.2%
15		1650	251.58	0.6%	1664.72	0.9%
10		2500	256.59	2.6%	2458.26	-1.7%
5		5000	259.09	3.6%	4940.31	-1.2%

เมื่อนำลายประทับของ BSG ที่เป็นสารละลายประกอบโบรอน มีค่าเปอร์เซ็นต์อะตอมโบรอนประมาณ 0.15% ไปผ่านกระบวนการแพร์ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1150°C เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่มีอัตราการไหลเท่ากับ 100 sccm และนำไปวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่น

พบว่าเกิดบริเวณ p^{++} Si มีค่า ρ_{sheet} เท่ากับ 68.89 Ohm/sheet มีค่าต่ำกว่า ρ_{sheet} ของแผ่นฐานในบริเวณที่ไม่มีการประทับลาย BSG ซึ่งบริเวณแผ่นฐาน Si มีค่าประมาณ 107.86 Ohm/sheet ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการประทับลายสารละลายโบรอนสามารถสร้างชั้น LBSF ได้ โดยมี ρ_{sheet} มีค่าแตกต่างกันใน 2 บริเวณอย่างเห็นได้ชัด

3.2.3 การเปิดช่องไดอิเล็กทริกด้วย Foam stamp

ในขั้นตอนหลังจากการแพร่สารเจือโบรอนที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้อะตอมสารเจือโบรอนแพร่ในบริเวณที่ประทับลาย BSG แล้วได้ทำการสร้างชั้นซิลิกอนไนไตรด์ (SiN_x) ด้วยเทคนิค PECVD ที่อุณหภูมิ 450°C และความดัน 1500 mTorr โดยใช้ส่วนผสมของก๊าซซิลเลน (SiH_4) และแอมโมเนีย (NH_3) สำหรับทำปฏิกิริยา ชั้น SiN_x นี้สร้างขึ้นที่บริษัทโซลาร์ตรอนจำกัด (มหาชน) หลังจากนั้นเปิดช่องชั้นซิลิกอนไนไตรด์ที่ด้านหลัง เพื่อให้ขั้วโลหะไฟฟ้าสามารถเชื่อมต่อกับบริเวณ p^{++} การสกัดช่องเปิดได้ใช้วิธีการประทับลายด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) เข้มข้น 25% เป็นเวลา 1 นาที ตามลวดลายของบริเวณ p^{++} หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปล้างน้ำ DI และเป่าให้แห้ง



รูปที่ 3.10 ลวดลายการเปิดช่องชั้นฟิล์ม SiN_x ด้วยการประทับลายแบบที่ขนาด 250 μm ในเงื่อนไข Aperture ratio ที่ (ก) 20% (ข) 15% (ค) 10% และ (ง) 5%

รูปที่ 3.10 (ก)-(ง) แสดงลวดลายช่องเปิด SiN_x ที่ออกแบบให้ขนาดเท่ากับ $250 \mu\text{m}$ ในเงื่อนไข Aperture ratio เท่ากับ 20% 15% 10% และ 5% ตามลำดับ จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า วิธีการประทับลายสารละลาย HF สามารถเปิดช่อง SiN_x ได้ อย่างไรก็ตามการประทับกรดที่เป็นสารสกัดฟิล์มบาง จะได้ความแม่นยำของลวดลายต่ำกว่าวิธีการประทับสารไวแสง หรือ BSG ลงบนแผ่นฐาน Si

3.3 สรุป

จากผลการทดสอบสร้างลวดลายด้วยการใช้ Foam stamp พบว่าไม่เพียงแต่การนำสารละลายต่าง ๆ ที่ต้องการประทับให้เกิดลวดลาย เพื่อใช้เป็นฟิล์มบางได้โดยตรง หรือประทับสารไวแสงเพื่อเป็นหน้าปกป้องกันการกัดผิวชิ้นงาน ในงานประยุกต์ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE อีกทางหนึ่งเมื่อประทับสารละลายสารเจือ ยังสามารถผลิตเป็นบริเวณ n^{++} region หรือ p^{++} ได้ในเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF วิธีการประทับลายจึงเป็นวิธีทางเลือกต้นทุนต่ำสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับอุตสาหกรรมได้ อย่างไรก็ตามวิธีการประทับลายมีข้อจำกัดเรื่องขนาดของลวดลายไม่ต่ำกว่า $100 \mu\text{m}$ เนื่องจากสมบัติเฉพาะของวัสดุ Foam พอลิเมอร์ไวแสง และความหนาไม่น้อยกว่า $0.5 \mu\text{m}$ ของฟิล์มที่ต้องการประทับลาย ซึ่งมีความหนามากกว่าวิธีการเคลือบด้วยแรงหมุนเหวี่ยง

บทที่ 4

เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนต้นแบบด้วยวิธีการประทับลาย

4.1 บทนำ

จากข้อมูลการศึกษาลักษณะของลวดลายฟิล์ม BSG หรือศึกษาลวดลายของช่องเปิดไดโอดีเล็กทริก ทำให้เรารู้ถึงข้อจำกัดการผลิต ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรม และเพื่อเข้าการผลิตเซลล์ชนิดใหม่ให้สอดคล้องกับกระบวนการผลิตเดิมที่มีอยู่ อีกทั้งได้กล่าวถึงการวัดค่าความหนาและสมบัติการหักเหแสง รวมถึงการวัดค่า life time ของพาหะในโครงสร้างการเปิดช่องไดโอดีเล็กทริกด้านหลังด้วยการประทับลาย เพื่อนำผลไปวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีคุณภาพ

เมื่อได้เงื่อนไขช่องเปิดที่เหมาะสมแล้ว งานวิจัยในบทนี้จะได้ทดสอบการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนต้นแบบโครงสร้าง Local back surface field (LBSF) ที่ประกอบด้วยชั้นไดโอดีเล็กทริกแบบ Local back passivation เพื่อเป็นแนวทางการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนในวิธีการที่ใช้เทคนิคการประทับลายให้เกิดบางบริเวณของ p^{++} ที่ด้านหลังเซลล์ และทดสอบวัดประสิทธิภาพเซลล์ รวมถึงได้ทำการเปรียบเทียบผลผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์ชนิดใหม่ต้นทุนต่ำในเชิงเศรษฐศาสตร์ เปรียบเทียบกับเซลล์ที่ผลิตเชิงพาณิชย์ เพื่อหาแนวทางการผลิตเชิงพาณิชย์ต่อไป

4.2 กระบวนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกซิลิคอนเชิงพาณิชย์

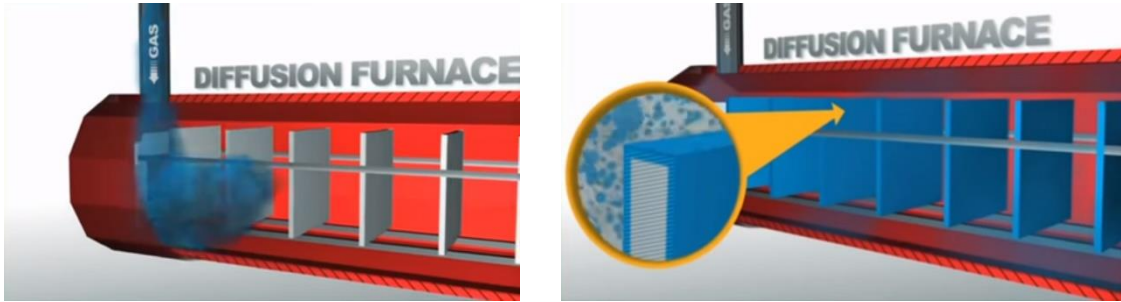
การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกซิลิคอนมีขั้นตอนการผลิตหลัก ๆ ดังนี้

1. กระบวนการสร้างผิวขรุขระ (Texturing process) ให้กับแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยสารละลายเคมี แสดงในรูปที่ 4.1 เพื่อลดการสะท้อนแสงกลับที่ผิวได้ถึง 20%



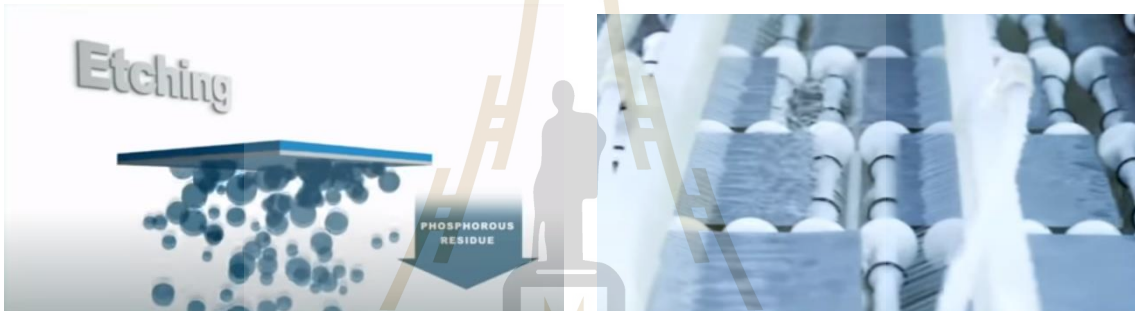
รูปที่ 4.1 การสกัดผิวผลึกซิลิคอนด้วยสารละลายเคมี และผิวขรุขระกับการลดลงของแสงสะท้อน

2. กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิสูง (Diffusion process) เพื่อสร้างชั้น n-emitter ด้านบนแผ่นผลึกซิลิคอน จะได้รูปแบบรอยต่อ p/n แสดงในรูปที่ 4.2



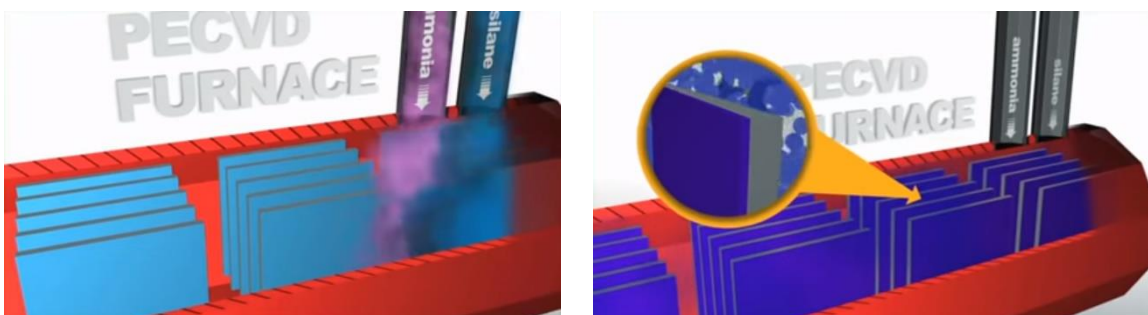
รูปที่ 4.2 การแพร่สารเจือในเตาอุณหภูมิสูง

3. กระบวนการกำจัดบริเวณที่ฟอสฟอรัสแพร่ในบริเวณขอบแผ่นที่ไม่ต้องการ (Edge isolation) และบริเวณที่ฟอสฟอรัสแพร่ตกค้างที่เรียกว่าชั้น Phosphorus silicate glass (PSG) ด้วยแผ่นให้ผิวด้านข้างสัมผัสกับสารละลายเคมี แสดงในรูปที่ 4.3



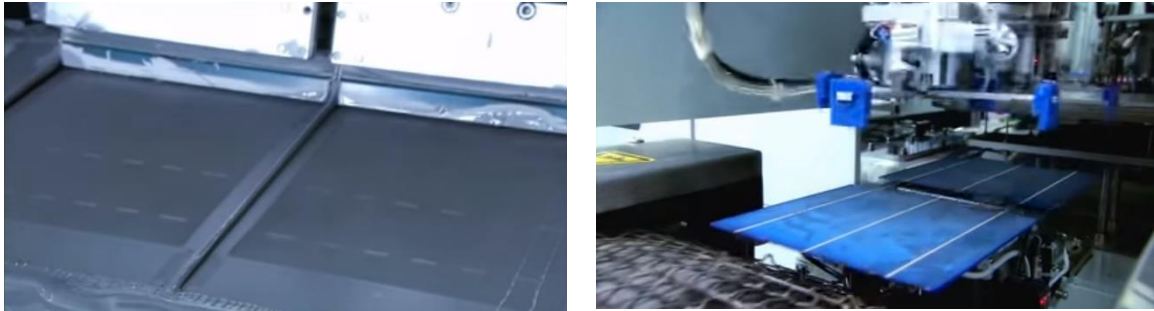
รูปที่ 4.3 การสกัดผิวที่ขอบแผ่นเพื่อกำจัดบริเวณที่ฟอสฟอรัสแพร่ซึม

4. กระบวนการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนแสง (Anti-reflective coating) ด้วยชั้น SiN_x จากระบบ PECVD (Pressure enhanced chemical vapor deposition) บนชั้น n-emitter เพื่อเพิ่มการดูดกลืนแสงให้ดีขึ้น และลดจุดบกพร่องที่ผิวสัมผัสของ n-emitter



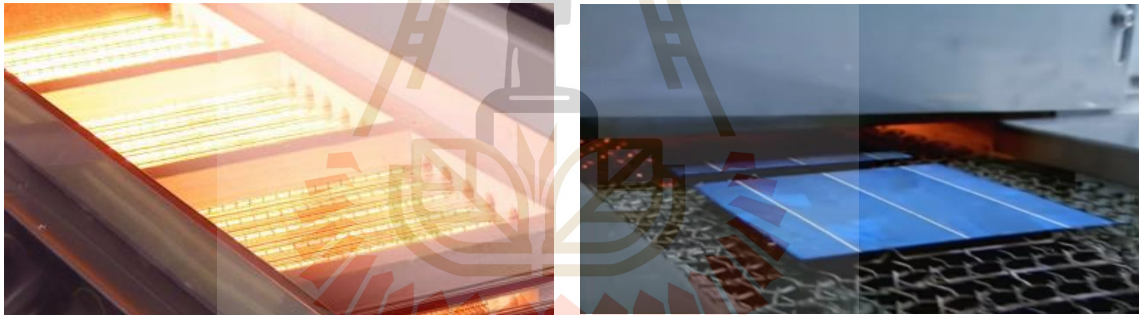
รูปที่ 4.4 การสร้างชั้น SiN_x ในระบบเตา PECVD

5. กระบวนการพิมพ์ลายขั้วไฟฟ้า (Screen printing process) ด้านหน้าและด้านหลังด้วยโลหะ สำหรับขั้วลบ และขั้วบวก แสดงในรูปที่ 4.5



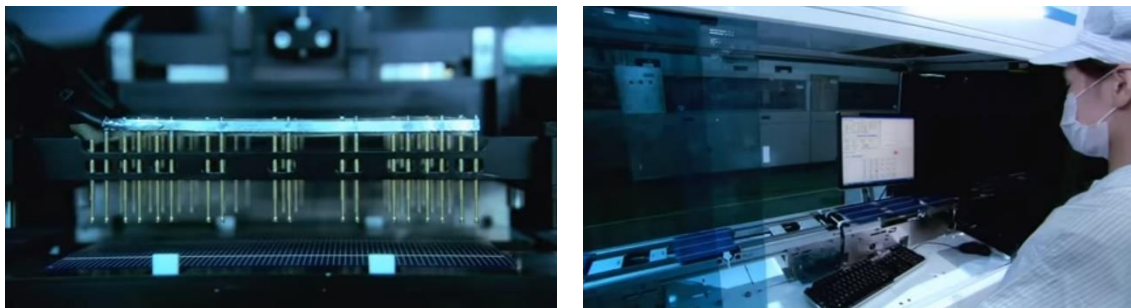
รูปที่ 4.5 การพิมพ์ลายขั้วไฟฟ้า

6. กระบวนการ Fast firing ขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน เกิดโลหะแพร่ซึม เพื่อให้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดี แสดงในรูปที่ 4.6



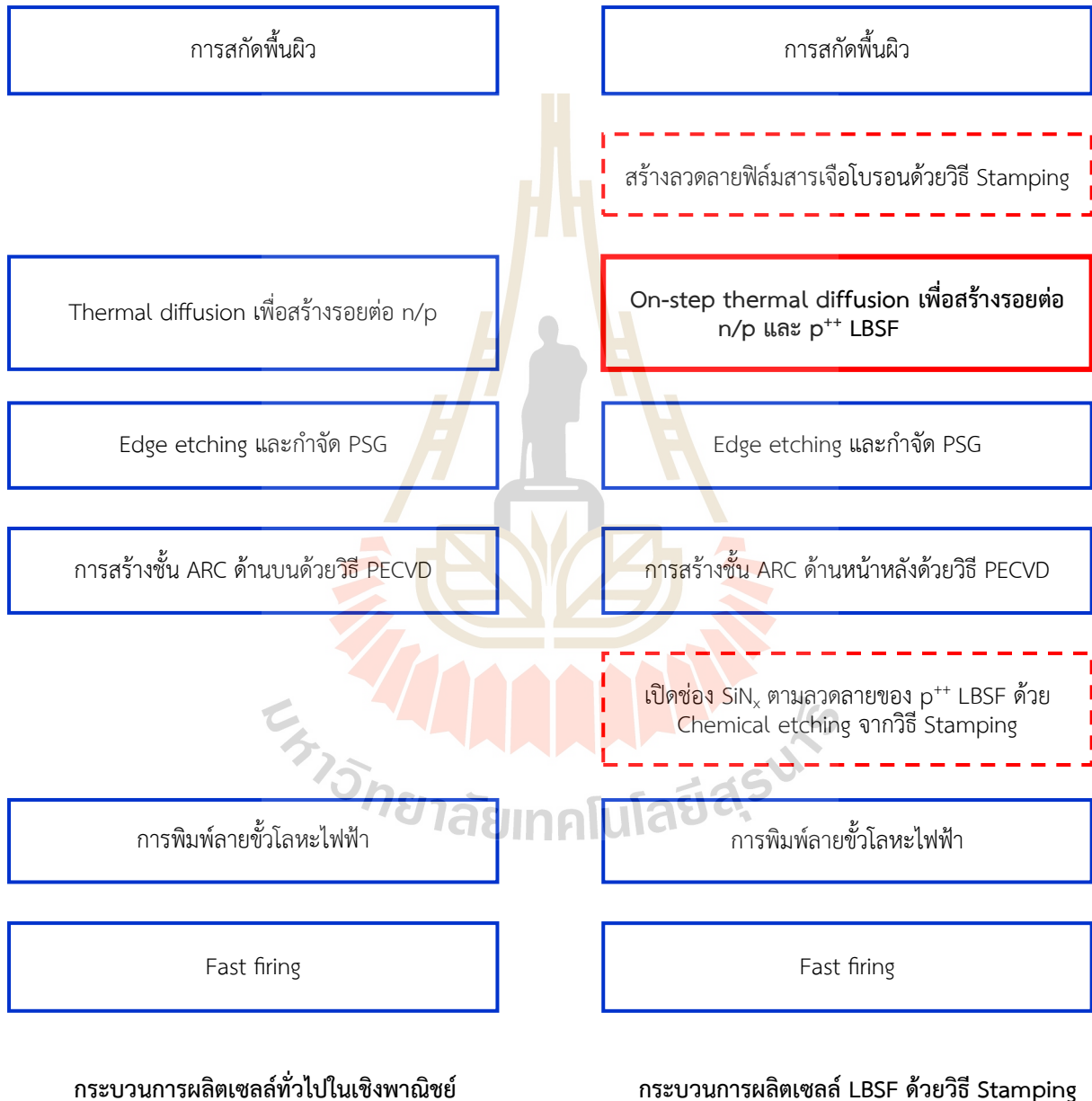
รูปที่ 4.6 กระบวนการ Fast firing ให้กับโลหะขั้วไฟฟ้า

7. กระบวนการวัด ทดสอบทุกเซลล์ และคัดเลือกจัดตามพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กระบวนการทดสอบและคัดเลือกเซลล์ตามค่าประสิทธิภาพ

รูปที่ 4.8 แสดงเปรียบเทียบกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ต้นทุนต่ำด้วยวิธีประทับลาย (Stamping) กับกระบวนการผลิตเซลล์เชิงพาณิชย์ พบว่ามีการเพิ่มกระบวนการผลิตของการสร้างลวดลายฟิล์มสารเจือโบรอนด้วยวิธี Stamping และการเปิดช่อง SiN_x ตามลวดลายของ p^{++} LBSF ด้วย Chemical etching จากวิธี Stamping ขณะที่กระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อนใช้วิธีการผลิตเดิมแต่อาจปรับเงื่อนไขของอุณหภูมิและความดันในเตาให้เกิดความเหมาะสมเพื่อให้เกิดการแพร่ของฟอสฟอรัสที่ด้านบนพร้อมกับการแพร่ของโบรอนที่ด้านหลังตามลวดลายที่สร้างขึ้น



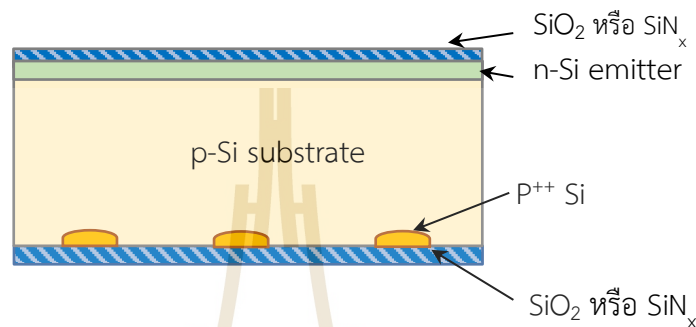
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ต้นทุนต่ำด้วยวิธีประทับลาย (Stamping) กับกระบวนการผลิตเซลล์เชิงพาณิชย์

4.3 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนต้นแบบ LBSF ด้วยวิธีการประทับลาย

4.3.1 การผลิตเซลล์ที่มีบริเวณ p^{++} Si ในแบบลวดลายเส้น และลายจุด ด้วยวิธีการประทับลาย

โครงสร้างของเซลล์ในรูปแบบที่ 4.9 มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. แผ่นผลึกโพลีซิลิคอนชนิด p-type ขนาด $3 \times 3 \text{ cm}^2$ มีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะระหว่าง 1-3 โอห์มเซนติเมตร ความหนา $200 \mu\text{m}$ นำมากำจัดชั้นออกไซด์ (Native oxide) ด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) เข้มข้น 5% เป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นทำความสะอาดพื้นผิวด้วยวิธี RCA



รูปที่ 4.9 ภาพตัดขวางของโครงสร้างเซลล์ที่มีบริเวณ p^{++} Si ในแบบลวดลายเส้น

2. สร้างบริเวณ p^{++} Si ด้านหลังเซลล์ด้วยวิธีประทับลายสารละลายประกอบโบรอนที่มีเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอนในสารเจือเป็น 0.15% ที่ด้านหลังของแผ่นฐานซิลิคอน โดยมีพื้นที่ลายประทับลวดลายเส้นขนาด $250 \mu\text{m}$ ในเงื่อนไขค่า Aperture ratio เท่ากับ 100% (ไม่มีช่องเปิด) 50% 20% 15% 10% และ 5% ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จากนั้นผ่านกระบวนการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ $1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่มีอัตราการไหลเท่ากับ 100 sccm ด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง ภายหลังจากการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิสูงจะเกิดขึ้นแก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate glass) จากปฏิกิริยาระหว่างโบรอนและแผ่นฐาน Si ขึ้น ซึ่งสามารถล้างด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) เข้มข้น 10% เป็นเวลา 5 นาที

3. สร้างชั้น n-Si ด้วยวิธีการเคลือบสารละลายประกอบฟอสฟอรัสที่มีเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัสประมาณ 0.43% ที่ด้านหน้าของแผ่นฐานซิลิคอน ด้วยการหมุนเหวี่ยง (Spin coating) ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ จากนั้นทำการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 60 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่มีอัตราการไหลเท่ากับ 100 sccm ด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง การแพร่สารเจือที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดขึ้นแก้วฟอสโฟซิลิเกต (Phosphosilicate glass) ซึ่งสามารถล้างด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) เข้มข้น 5% เป็นเวลา 5 นาที

4. สร้างชั้นไดอิเล็กทริกทั้งด้านบนและด้านหลังเซลล์ เพื่อป้องกันผลของการรวมตัวใหม่ที่ผิว (Surface recombination) ของพาหะที่บริเวณผิวซิลิคอน ดังนั้นจึงสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ด้วยวิธี Dry oxidation ที่อุณหภูมิ $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 120 นาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ที่มีอัตราการ

ไหลเท่ากับ 400 sccm ด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง ส่วนการสร้างชั้นซิลิกอนไนไตรด์ (SiN_x) ได้ใช้เทคนิค PECVD ที่อุณหภูมิ 450°C ที่ความดัน 1500 mTorr ในปฏิกิริยาของก๊าซไฮเลน (SiH_4) และแอมโมเนีย (NH_3) นิยามของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ในเงื่อนไขต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 นิยามของเซลล์แสงอาทิตย์ทดสอบในโครงสร้างเงื่อนไขต่าง ๆ

Sample names	PV structures
1. NP_SiO ₂	รอยต่อ SiO ₂ /n-Si/p-Si substrate/SiO ₂
2. NP(P ⁺ _Full100%)_SiO ₂	รอยต่อ SiO ₂ / n-Si/p-Si substrate /p ⁺⁺ ทั่วแผ่น/SiO ₂
3. NP(P ⁺ _LineA μ m B%)_SiO ₂	รอยต่อ SiO ₂ / n-Si/p-Si substrate /p ⁺⁺ ลายเส้นกว้าง A μ m ที่ Aperture ratio B%/ SiO ₂
4. NP_SiN _x	รอยต่อ SiN _x /n-Si/p-Si substrate/SiN _x
5. NP(P ⁺ _Full 100%)_SiN _x	รอยต่อ SiN _x / n-Si/p-Si substrate /p ⁺⁺ ทั่วแผ่น/SiN _x
6. NP(P ⁺ _LineA μ m B%)_SiN _x	รอยต่อ SiN _x / n-Si/p-Si substrate /p ⁺⁺ ลายเส้นกว้าง A μ m ที่ Aperture ratio B%/ SiN _x
7. NP(P ⁺ _DotA μ m B%)_SiN _x	รอยต่อ SiN _x / n-Si/p-Si substrate /p ⁺⁺ ลายจุดกว้าง A μ m ที่ Aperture ratio B%/ SiN _x

4.3.2 การวัดคุณสมบัติทางแสงและวัดค่า life-time

โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิกอนประสิทธิภาพสูงจะประกอบด้วยชั้นไดโอดีเล็กทริกบางทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ดังนั้นในบทนี้จึงศึกษาวัดความหนาและค่าดัชนีหักเหแสงของชั้นฟิล์มบาง SiO₂ และ SiN_x ด้วยเทคนิค Ellipsometry รุ่น SE 400advanced จากบริษัท โซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โครงสร้างของชิ้นงานแสดงในรูปที่ 4.9

การวัดค่าช่วงชีวิตพาหะใช้เครื่อง Photoconductance lifetime tester ยี่ห้อ Sinton instrument รุ่น WCT-120 แสดงภาพถ่ายในรูปที่ 4.11 โดยใช้เทคนิค Quasi-steady-state photoconductance (QSSPC) ที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อย (Minority carrier density) เท่ากับ $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ค่าช่วงชีวิตพาหะของเซลล์ที่สูงนั้นสามารถแสดงถึงความน่าจะเป็นสูงในการรวบรวมพาหะที่ขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูงด้วยเช่นกัน

ค่า Lifetime สุทธิของเนื้อวัสดุ (τ_{Bulk}) ประกอบด้วย Lifetime ชนิดต่าง ๆ กันตามลักษณะที่แตกต่างกันของกระบวนการรวมตัวใหม่ทั้ง 3 ชนิด ดังนั้น τ_{Bulk} สามารถแสดงในสมการที่ (4.1)

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

- โดยที่ τ_{Band} คือ Lifetime ของพาหะข้างน้อยที่ก่อนเกิด Band-band recombination
 τ_{SHR} คือlifetime ของพาหะข้างน้อยที่ก่อนเกิด Recombination through traps
 τ_{Auger} คือlifetime ของพาหะข้างน้อยที่ก่อนเกิด Auger recombination

Auger lifetime อยู่ในฟังก์ชันความหนาแน่นของพาหะแสดงได้ในสมการที่ (4.2) ซึ่ง Lifetime จากกระบวนการ Auger จะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่นในกรณีที่ระดับความเข้มข้นของสารเจือสูงขึ้นแสดงในรูปที่ 2.8 [จากหนังสือ Solar Cells, M.A. Green,1992]

$$\tau_{\text{Auger}} = \frac{1}{CN_A^2} \quad (4.2)$$

- โดยที่ C คือค่าประสิทธิของ Auger สำหรับวัสดุซิลิคอนให้ค่าเท่ากับ $1.66 \times 10^{-30} \text{cm}^6/\text{s}$



รูปที่ 4.10 Ellipsometer รุ่น SE 400advanced สำหรับวัดความหนาและค่าดัชนีหักเหแสงของชั้นฟิล์มบางไดโอดีเล็กทริก



รูปที่ 4.11 เครื่องวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะ Sinton รุ่น WCT-120 จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) (<http://www.sintoninstruments.com>)

4.3.3 ผลการวัดค่าดัชนีหักเหแสงและความหนาของฟิล์มไดอิเล็กทริกบนเซลล์

การวัดความหนาและค่าดัชนีหักเหแสงของชั้นฟิล์มทั้งหมด 5 ครั้งและนำมาเฉลี่ย พบว่าค่าความหนาและค่าดัชนีหักเหแสงของฟิล์มที่เกิดขึ้นด้านหน้า และด้านหลังเซลล์มีค่าใกล้เคียงกัน มีความหนาเฉลี่ยของ SiO_2 มีค่าประมาณ 74 nm และมีค่าดัชนีหักเหแสงประมาณ 1.66 ส่วนชั้นฟิล์ม SiN_x มีความหนาเฉลี่ยประมาณ 97 nm และมีค่าดัชนีหักเหแสงประมาณ 2.10 โครงสร้างเซลล์ที่วัด life-time ได้ทำประสิทธิภาพของ BSG ด้วยเครื่องประสิทธิภาพกึ่งอัตโนมัติ กำหนดลดขนาด 250 μm ในเงื่อนไข Aperture ratio ค่าต่าง ๆ ผลการวัดค่าต่าง ๆ ทั้งฟิล์มด้านหน้าและด้านหลังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาและค่าดัชนีหักเหแสงของชั้นฟิล์มบางไดอิเล็กทริก

Samples	Front side		Rear side	
	Thickness (nm)	Refractive index	Thickness (nm)	Refractive index
NP_SiO ₂	76.97	1.69	73.97	1.68
NP(P ⁺ _Full100%)_SiO ₂	72.58	1.68	72.55	1.66
N/P(P ⁺ _Line3000 μm 50%)_SiO ₂	77.41	1.64	72.03	1.66
NP(P ⁺ _Line250 μm 20%)_SiO ₂	80.02	1.64	78.12	1.61
NP(P ⁺ _Line250 μm 15%)_SiO ₂	78.33	1.65	77.30	1.63
NP(P ⁺ _Line250 μm 10%)_SiO ₂	75.15	1.66	73.41	1.67
NP(P ⁺ _Line250 μm 5%)_SiO ₂	65.54	1.74	72.13	1.66
NP_SiN _x	82.36	2.12	98.36	2.08
NP(P ⁺ _Full 100%)_SiN _x	106.54	2.01	101.99	2.18
NP(P ⁺ _Line3000 μm 50%)_SiN _x	100.97	2.04	96.70	2.20
NP(P ⁺ _Line250 μm 20%)_SiN _x	89.85	2.09	94.29	2.13
NP(P ⁺ _Line250 μm 15%)_SiN _x	96.43	2.06	99.45	2.15
NP(P ⁺ _Line250 μm 10%)_SiN _x	88.33	2.08	96.89	2.12
NP(P ⁺ _Line250 μm 5%)_SiN _x	101.59	2.05	94.96	2.13

4.3.4 ผลการวัดค่า life-timeของฟิล์มไดอิเล็กทริกบนเซลล์

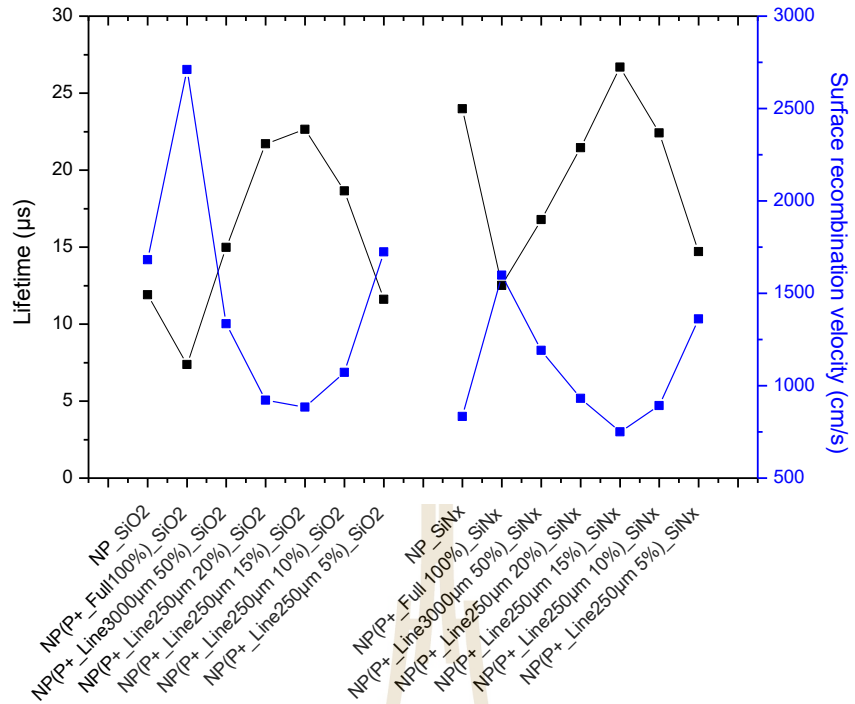
ผลที่วัดได้แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.3 โดยที่ J_0 คือค่ากระแสมืด และ V_{OC} คือค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรที่ได้จากโปรแกรมการจำลองผล เนื่องจากเซลล์ที่นำไปวัดนั้นไม่มีขั้วไฟฟ้าโลหะทั้งด้านบนและ

ด้านหลังเซลล์ และเมื่อวัดค่า Life time ได้เราสามารถนำไปคำนวณหาค่าความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะได้ในโครงสร้างชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริก 2 ด้านบนรอยต่อ n/p ที่ไม่มีบริเวณ p^{++} พบว่าฟิล์ม SiN_x ให้ค่า Life time สูงกว่า SiO_2 ประมาณ 2 เท่า เมื่อเซลล์มีบริเวณ p^{++} ทั่วแผ่น ผลของค่า Life time น้อยที่สุดเป็นผลมาจากการรวมตัวใหม่ของพาหะในแบบ Auger recombination ที่มีบริเวณการแพร่สารเจือสูงจึงเกิดอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะที่สูงขึ้น ทำให้ค่า Life time ที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าทุกกลุ่ม

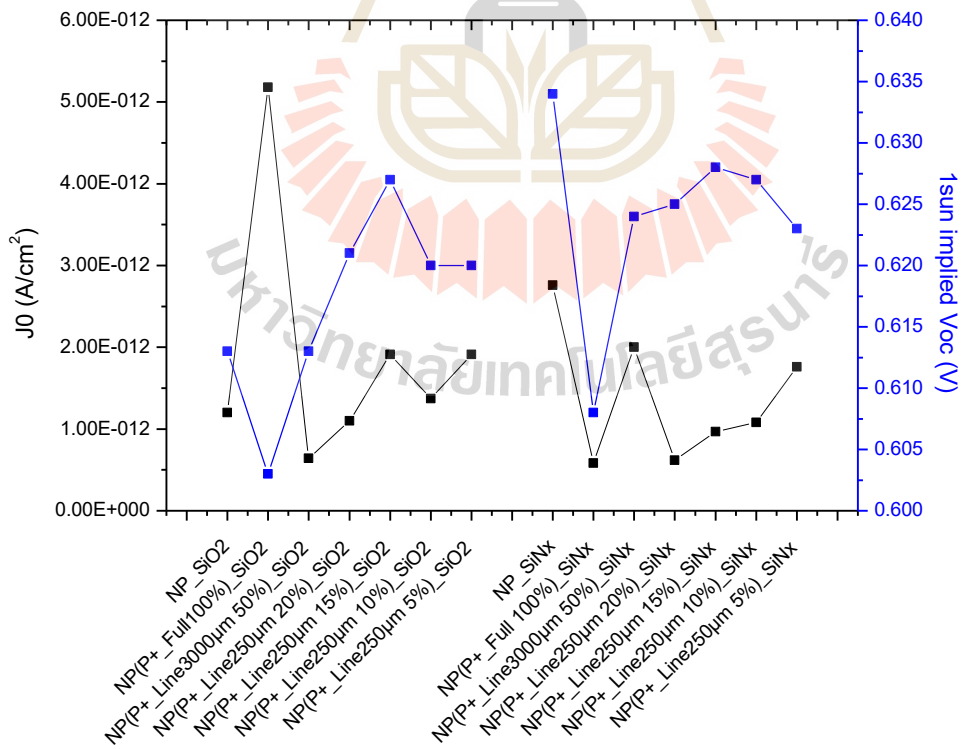
ตารางที่ 4.3 ค่าช่วงชีวิตของพาหะ และค่าอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะ ค่ากระแสไฟฟ้ามืด และแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร

Samples	Lifetime (μs)	Surface recombination velocity (cm/s)	J_0 (A/cm^2)	1sun implied V_{oc} (V)
NP_ SiO_2	11.90	1681	1.2E-12	0.613
NP(P^+ _Full100%)_ SiO_2	7.38	2710	5.2E-12	0.603
NP(P^+ _Line3000 μm 50%)_ SiO_2	14.99	1334	6.4E-13	0.613
NP(P^+ _Line250 μm 20%)_ SiO_2	21.71	921	1.1E-12	0.621
NP(P^+ _Line250 μm 15%)_ SiO_2	22.64	883	1.9E-12	0.627
NP(P^+ _Line250 μm 10%)_ SiO_2	18.65	1072	1.4E-12	0.62
NP(P^+ _Line250 μm 5%)_ SiO_2	11.60	1724	1.9E-12	0.62
NP_ SiN_x	23.98	834	2.8E-12	0.634
NP(P^+ _Full 100%)_ SiN_x	12.51	1599	5.8E-13	0.608
NP(P^+ _Line3000 μm 50%)_ SiN_x	16.78	1192	2E-12	0.624
NP(P^+ _Line250 μm 20%)_ SiN_x	21.46	932	6.2E-13	0.625
NP(P^+_Line250μm 15%)_SiN_x	26.69	749	9.7E-13	0.628
NP(P^+ _Line250 μm 10%)_ SiN_x	22.42	892	1.1E-12	0.627
NP(P^+ _Line250 μm 5%)_ SiN_x	14.70	1361	1.8E-12	0.623

กลุ่มเซลล์ที่มีลวดลายเส้นของ p^{++} ทั้ง SiO_2 และ SiN_x ที่ค่า Aperture ratio ต่าง ๆ กันนั้นพบผลของค่า Life time ที่วัดได้เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากผลของการมีชั้นฉนวนเป็นชั้นพาสซีเวชัน (Passivation) ลดผลจุดบกพร่อง (Defects) และค่า Life time สูงสุดที่เซลล์ในเงื่อนไขลวดลายเส้นของ



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ของค่าช่วงชีวิตของพาหะ และอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะ ของเซลล์ในเงื่อนไขช่องเปิดขนาดต่าง ๆ



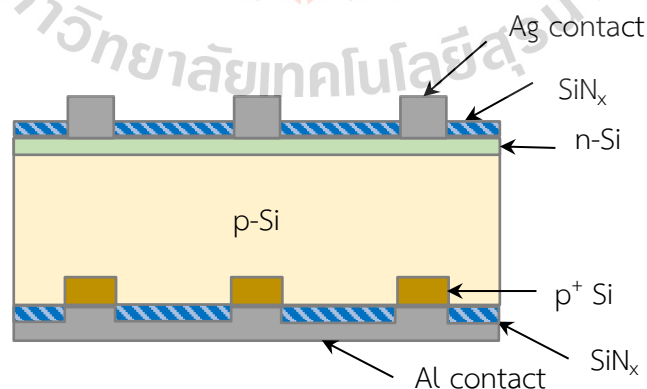
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของค่ากระแสมืด และแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรที่ได้จากการวัด Life time

p^{++} ขนาด $250\mu\text{m}$ ที่มีค่า Aperture ratio 15% สำหรับชิ้นงาน $\text{NP}(P^+ \text{ Line } 250\mu\text{m } 15\%)_{\text{SiN}_x}$ ให้ค่า $26.69 \mu\text{s}$ และสำหรับชิ้นงาน $\text{NP}(P^+ \text{ Line } 250\mu\text{m } 15\%)_{\text{SiO}_2}$ ให้ค่า $22.64 \mu\text{s}$ จากผลการวัด Life time เมื่อนำไปคำนวณหาค่าอัตราความเร็วของการรวมตัวใหม่ของพาหะนั้นมีค่าน้อยที่สุด ค่าทั้งสองสามารถสรุปผลความสัมพันธ์ได้ในกราฟรูปที่ 4.12 จากผลแสดงให้เห็นถึงค่า Life time ที่มีค่าสูงมีความสัมพันธ์กับค่ากระแสมีดที่มีค่าน้อยด้วย แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมีดและแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรในรูปที่ 4.13

เมื่อเทียบผลการวิจัยครั้งนี้ที่ศึกษาการแพร่สารเจือที่ลวดลายของ BSG ในเงื่อนไขค่า Aperture ratio เหมาะสมที่สุดที่ค่าประมาณ 15% นั้นมีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยครั้งก่อนที่คณะวิจัยได้ศึกษาการเปิดช่องชั้น SiO_2 ด้วยวิธี inkjet printing และอาศัยการแพร่ของอะตอม Al จากขั้วไฟฟ้าด้านหลังแพร่ซึมที่อุณหภูมิ Eutectic ระหว่าง Al-Si กระทั่งเกิดเป็นอัลลอยของอะลูมิเนียมออกไซด์ และ p^{++} ในช่องเปิดดังกล่าว ซึ่งค่าประสิทธิภาพเซลล์เพิ่มขึ้นจากเซลล์โครงสร้างในอุตสาหกรรม ($\Delta\eta$) ประมาณ 2% ที่มีค่า Aperture ratio ประมาณ 15% ดังนั้นจึงสามารถยืนยันว่าการสร้างลวดลายของบริเวณ p^{++} ที่ด้านหลังเซลล์ด้วยวิธีต้นทุนต่ำ สามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อนำเข้าสู่การผลิตในอุตสาหกรรมได้

4.4 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนต้นแบบด้วยการประทับลาย

ในงานวิจัยนี้ได้นำเงื่อนไข Aperture ratio เหมาะสมที่สุดที่ค่าประมาณ 15% ร่วมกับชั้นไดอิเล็กทริกชนิด SiN_x มาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนต้นแบบด้วยการประทับลาย ซึ่งมีการแพร่สารเจือโบรอนความเข้มข้นสูง ($p^{++} \text{ Si}$) บางบริเวณด้านหลังเซลล์ และทำการเปิดช่องชั้นออกไซด์เพื่อให้เกิดโครงสร้าง Passivated emitter and rear locally diffused cell (PERL) หรือ Local back passivation หรือ Local back surface field (LBSF) ที่ด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 โครงสร้างเซลล์แบบ Local back surface field (LBSF) ที่ทำการศึกษา

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนต้นแบบด้วยวิธีการประทับลายมีขั้นตอนดังนี้

1. แผ่นผลึกโพลีซิลิคอนชนิด p-type ขนาด $3 \times 3 \text{ cm}^2$ มีความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะระหว่าง 1-3 โอห์มเซนติเมตร ความหนา $200 \mu\text{m}$ นำมากำจัดชั้นออกไซด์ (Native oxide) ด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) เข้มข้น 5% เป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นทำความสะอาดพื้นผิวด้วยวิธี RCA

2. สร้างบริเวณ p^{++} Si ด้านหลังเซลล์ด้วยวิธีประทับลายสารละลายประกอบโบรอนที่มีเปอร์เซ็นต์อะตอมของโบรอนในสารเจือเป็น 0.15% ที่ด้านหลังของแผ่นฐานซิลิกอน โดยมีพื้นที่ลายประทับลวดลายเส้นขนาด $250 \mu\text{m}$ ในเงื่อนไขค่า Aperture ratio เท่ากับ 100% (ไม่มีช่องเปิด) 50% 20% 15% 10% และ 5% ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 200°C จากนั้นผ่านกระบวนการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ 1150°C เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่มีอัตราการไหลเท่ากับ 100 sccm ด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง ภายหลังจากการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิสูงจะเกิดขึ้นแก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate glass) จากปฏิกิริยาระหว่างโบรอนและแผ่นฐาน Si ขึ้น ซึ่งสามารถล้างด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) เข้มข้น 10% เป็นเวลา 5 นาที

3. สร้างชั้น n-Si ด้วยวิธีการเคลือบสารละลายประกอบฟอสฟอรัสที่มีเปอร์เซ็นต์อะตอมของฟอสฟอรัสประมาณ 0.43% ที่ด้านหน้าของแผ่นฐานซิลิกอน ด้วยการหมุนเหวี่ยง (Spin coating) ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 200°C จากนั้นทำการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 60 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่มีอัตราการไหลเท่ากับ 100 sccm ด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง การแพร่สารเจือที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดชั้นแก้วฟอสโฟซิลิเกต (Phosphosilicate glass) ซึ่งสามารถล้างด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) เข้มข้น 5% เป็นเวลา 5 นาที

4. สร้างชั้น SiN_x ทั้งด้านบนและด้านหลังเซลล์ เพื่อป้องกันผลของการรวมตัวใหม่ที่ผิว (Surface recombination) ของพาหะที่บริเวณผิวซิลิกอน ด้วยเทคนิค PECVD ที่อุณหภูมิ 450°C ที่ความดัน 1500 mTorr ในปฏิกิริยาของก๊าซไซเลน (SiH_4) และแอมโมเนีย (NH_3) ความหนาฟิล์มเฉลี่ยประมาณ 97 nm



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 4.15 ลวดลายการเปิดช่องชั้นฟิล์ม SiN_x ด้านหลังเซลล์ด้วยวิธีการประทับลายที่มี Aperture ratio ประมาณ 15% และขนาดลายเส้นเปิดเท่ากับ (ก) $100 \mu\text{m}$ (ข) $250 \mu\text{m}$ และ (ค) $500 \mu\text{m}$

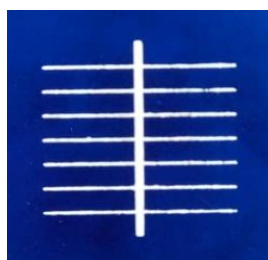
5. เปิดช่องชั้น SiN_x ที่ด้านหลัง เพื่อให้ขั้วโลหะไฟฟ้าสามารถเชื่อมต่อกับบริเวณ p^+ ด้วยวิธีการประคบลายด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) เข้มข้น 25% เป็นเวลา 1 นาที ให้ตรงตำแหน่งลวดลายของบริเวณ p^{++} ที่ได้จากการแพร่สารละลายโบรอนในขั้นตอนที่ 2 ภาพถ่ายตัวอย่างของช่องเปิด SiN_x ด้วยเทคนิคการประคบลายแสดงในรูปที่ 4.15

6. สร้างขั้วไฟฟ้าให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าด้านบนลวดลายก้างปลาจากการพิมพ์ลายของ Silver paste ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 200°C จากนั้นพิมพ์ลายขั้วโลหะไฟฟ้าด้านล่างทั่วบริเวณด้วย Aluminum paste ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 200°C และผ่านกระบวนการ Fast firing ที่ห้องโซน 1 2 3 และ 4 ที่อุณหภูมิประมาณ 300°C 500°C 890°C และ 100°C โดยห้องโซน 1-3 เช็ไฟในแต่ละห้องนาน 10 วินาที ซึ่งเป็นระบบความร้อนด้วยหลอด IR มีระบบสายพานลำเลียงชิ้นงานผ่านเข้าห้องความร้อนทั้งหมด 3 โซน ออกแบบขึ้นใช้เองในห้องปฏิบัติการ พิกัดอุณหภูมิสูงสุดที่ 890°C แสดงภาพถ่ายของเครื่อง Fast firing ที่สร้างขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ F5105 ในรูปที่ 4.16

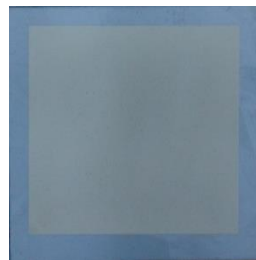


รูปที่ 4.16 เครื่อง Fast firing ที่สร้างขึ้นเองในห้องปฏิบัติการ F5105

7. เซลล์ต้นแบบหลังจากผ่านกระบวนการ Fast firing แล้วขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านจะมีสีขาวขึ้น แสดงภาพของเซลล์ด้านบน และด้านหลังในรูปที่ 4.17



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.17 (ก) ภาพถ่ายด้านบนของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบ และ (ข) ด้านหลังเซลล์

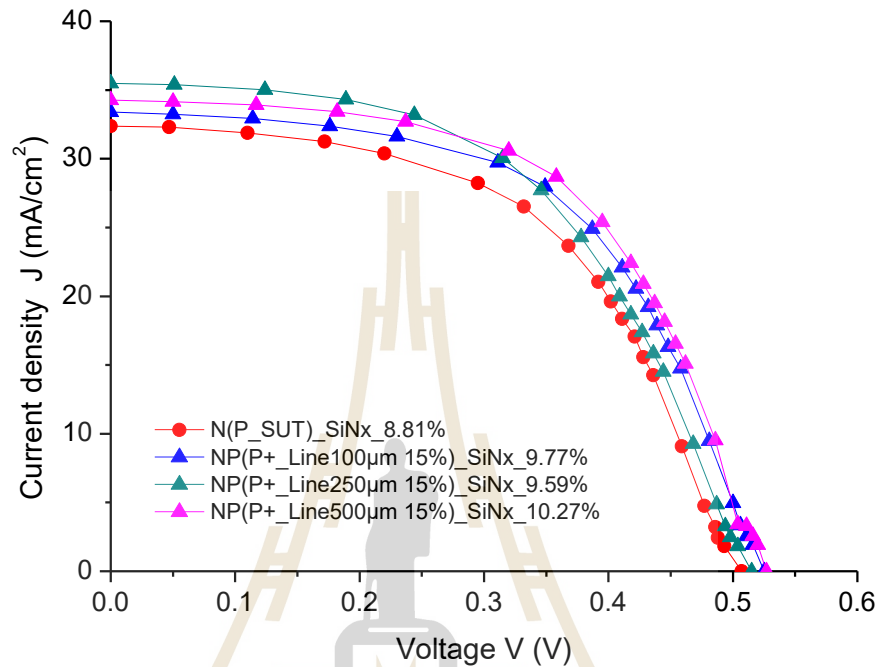
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวัดค่าทางไฟฟ้า และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์ต้นแบบที่มีเงื่อนไขการสร้างบริเวณ LBSF ในขนาดช่องเปิดต่าง ๆ และเงื่อนไขของค่าเปอร์เซ็นต์ Aperture ratio 5-100% การศึกษานี้ได้ทำการสร้างเซลล์อ้างอิงที่มีโครงสร้างรอยต่อ Ag/n/p/Al ผ่าน Fast firing ที่พิกัดอุณหภูมิกวอดภายใต้ 1 sun ความเข้มแสงประมาณ 100mA/cm²

ตารางที่ 4.4 ค่าทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF

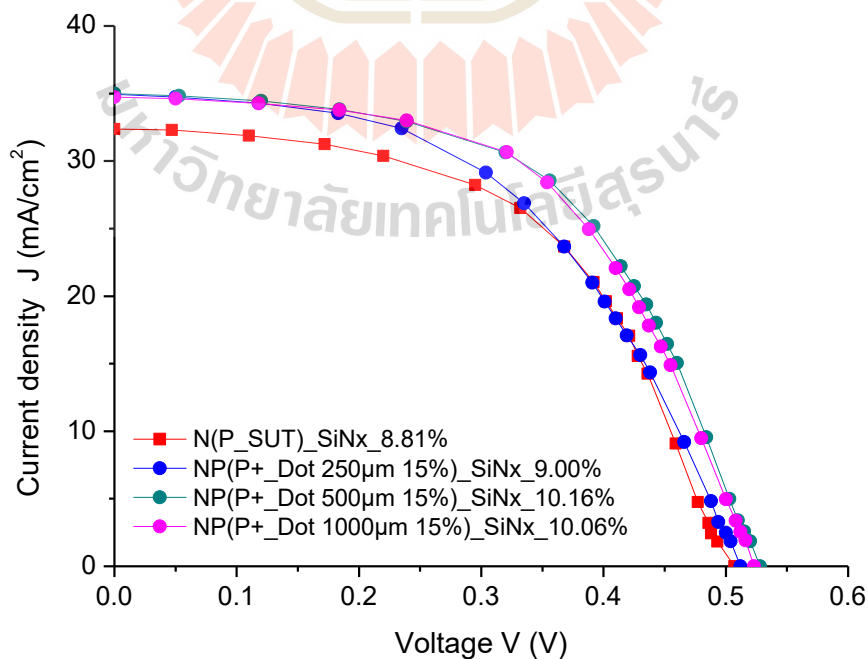
Samples	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA)	FF	η (%)	$\Delta\eta$ (%)
NP_SiN _x (Reference cell)	0.507	32.36	0.537	8.81	0
NP(P ⁺ _ Full 100%)_SiN _x	0.505	29.74	0.555	8.33	-0.48
NP(P ⁺ _ Line3000 μ m 50%)_SiN _x	0.496	26.19	0.526	6.83	-1.98
NP(P ⁺ _ Line250 μ m 20%)_SiN _x	0.512	28.85	0.549	8.10	-0.71
NP(P ⁺ _ Line250 μ m 15%)_SiN _x	0.520	31.95	0.555	9.22	0.41
NP(P ⁺ _ Line250 μ m 10%)_SiN _x	0.506	28.96	0.550	8.06	-0.75
NP(P ⁺ _ Line250 μ m 5%)_SiN _x	0.503	28.4	0.574	8.19	-0.62
NP(P ⁺ _ Line100 μ m 15%)_SiN _x	0.525	33.39	0.557	9.77	0.96
NP(P ⁺ _ Line250 μ m 15%)_SiN _x	0.515	35.49	0.525	9.59	0.78
NP(P ⁺ _ Line500 μ m 15%)_SiN _x	0.527	34.26	0.569	10.27	1.46
NP(P ⁺ _ Dot250 μ m 15%)_SiN _x	0.512	34.95	0.503	9.00	0.19
NP(P ⁺ _ Dot500 μ m 15%)_SiN _x	0.528	34.98	0.550	10.16	1.35
NP(P ⁺ _ Dot1000 μ m 15%)_SiN _x	0.523	34.74	0.554	10.06	1.25

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเซลล์อ้างอิงที่มีชั้น SiN_x ทั้งสองด้าน พบว่าจากผลการวัดพบว่าเซลล์ชนิดใหม่ LBSF ในเงื่อนไขเปิดช่องรูแบบวงกลม และแบบลายเส้นในเงื่อนไขทุกขนาดนั้นให้ค่าประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มขึ้น โดยเซลล์ที่กำหนดช่องเปิด SiN_x บนบริเวณ p⁺⁺ ขนาด 250 μ m ในเงื่อนไข Aperture ratio ค่า 5-100% พบว่าเซลล์ที่มีค่า Aperture ratio ที่ 15% ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าเซลล์เงื่อนไข Aperture ratio อื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่า Life time มากกว่าเงื่อนไขอื่น และค่าอัตรา

ความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะมีค่าน้อยสุดที่เงื่อนไขการเปิดช่อง SiN_x มี Aperture ratio 15% แสดงในตารางที่ 4.4 และเมื่อกำหนดค่า Aperture ratio ที่ 15% ในเงื่อนไขช่องเปิดชั้น SiN_x รูปแบบวงกลมให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.19-1.35% และเงื่อนไขช่องเปิดลายเส้นให้ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น $\Delta\% \eta$ มีค่าสูงกว่าเซลล์อ้างอิงประมาณ 1.46% แสดงกราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ในเงื่อนไข Aperture ratio 15% ในรูปที่ 4.18 และ 4.19



รูปที่ 4.18 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ LBSF ในลายเส้นเปิดช่อง SiN_x



รูปที่ 4.19 กราฟ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ LBSF ในลายจุดเปิดช่อง SiN_x

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าโครงสร้าง LBSF ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตด้วยวิธี Stamp สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานได้ อย่างไรก็ตามเซลล์ที่ผลิตขึ้นในห้องปฏิบัติการทุกเงื่อนไขมีค่า FF ต่ำกว่าเซลล์ประสิทธิภาพสูงที่ผลิตในมาตรฐานอุตสาหกรรม เนื่องจากอุปกรณ์การผลิตอยู่ในระดับห้องปฏิบัติการที่ประกอบด้วย

1. ระบบ Fast firing ในเชิงพาณิชย์ให้ค่า Fill Factor (FF) สูงถึง 0.8 ซึ่งค่า FF มีผลอย่างมากต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์ ค่า FF ต่ำบ่งบอกถึงผลกระทบของค่าความต้านทานอนุกรม R_s ในเซลล์มีค่าสูงจากระบบ Fast firing ในห้องปฏิบัติการมีอุณหภูมิไม่สูงเพียงพอ ดังนั้นในระบบ Fast firing ที่สร้างขึ้นจำเป็นต้อง Upscale พิกัดของอุณหภูมิห้องโซน 4 ให้สูงกว่า 890°C เพื่อให้รอยเชื่อมสัมผัสระหว่างโลหะกับ Si ให้มีคุณภาพมากขึ้น จากการศึกษาของ Wang และคณะ (Nanoscale Research Letters (2016) 11, 453) กว้างถึงผลของ FF ที่สูงกว่า 0.8 สามารถส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงเกินกว่า 20% ได้ แม้ว่าค่า $V_{oc} < 580\text{ mV}$ ก็ตาม ดังนั้นอุณหภูมิของ Fast firing สำหรับชีวไฟฟ้าจึงเป็นจุดสำคัญมากที่สุดอย่างหนึ่งในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์คุณภาพสูง

2. ระบบการพิมพ์ลวดลายโลหะ ซึ่งการผลิตในห้องปฏิบัติการใช้การพิมพ์ลายด้วยมือ ขนาด Mesh ขนาดใหญ่กว่าที่ใช้ในอุตสาหกรรม ดังนั้นขนาดของเส้นขั้วกริดไฟฟ้าด้านบนมีค่าใหญ่กว่า และความหนาของชีวไฟฟ้าที่ได้หนากว่า ส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานภายในแบบอนุกรมสูงกว่า

4.5 การวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วย และความคุ้มค่า

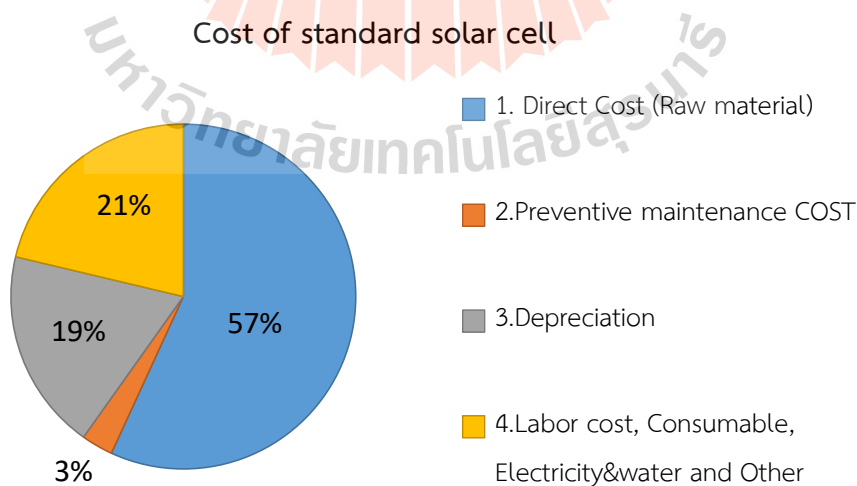
ต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์มาจากส่วนหลัก ๆ ที่ประกอบด้วยค่าเครื่องจักร ค่าบำรุงเครื่องจักร ค่าเสื่อมราคา ค่าวัตถุดิบ ค่าจ้างพนักงาน ค่าวัสดุสิ้นเปลือง ค่าสาธารณูปโภคที่เกี่ยวข้อง ค่าจัดเก็บและการบรรจุ แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.5

ในงานศึกษานี้ได้นำข้อมูลต้นทุนการผลิตจากบริษัทโซลาร์ตรอน จำกัด (มหาชน) มาเป็นข้อมูลเปรียบเทียบกับการผลิตเซลล์ LBSF ด้วยวิธีต้นทุนต่ำจากการประทับลาย เพื่อคาดการณ์ค่าปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ต่อหนึ่งแผ่นเซลล์มาตรฐาน (W/pc.) ซึ่งเซลล์ 1 แผ่นมีขนาด 243.36 cm^2 การวิเคราะห์ต้นทุนได้พิจารณาความสามารถในการผลิตเซลล์ของเครื่องจักรได้ทั้งหมด 10 ล้านเซลล์

รูปที่ 4.20 และ 4.21 แสดงสัดส่วนของต้นทุนวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าแผ่นเซลล์ผลึกซิลิคอนมีสัดส่วนสูงสุดประมาณ 57% ของต้นทุนการผลิตเซลล์ทั้งหมด หรือพิจารณาเป็นราคาประมาณ 10.04 cent/Watt และมูลค่าการซ่อมบำรุงเครื่องจักรมีสัดส่วนน้อยที่สุดประมาณ 3% หรือประมาณ 0.53 cent/Watt ข้อมูลทั้งหมดได้จากบริษัทโซลาร์ตรอนจำกัด (มหาชน)

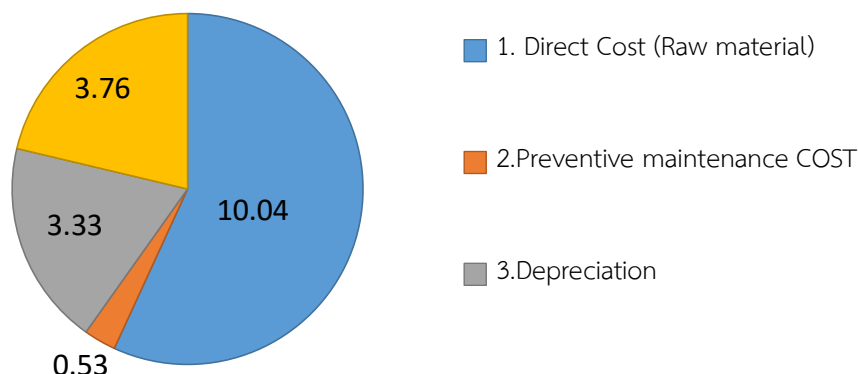
ตารางที่ 4.5 ส่วนประกอบของต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์

ชนิดของต้นทุน	ลักษณะ	วัสดุ
1. Direct Cost (Raw material)	Wafer	c-Si wafers
	Chemical	HF, HNO ₃ , Texture Additive, HCl and KOH
	Gas	Liquid Nitrogen, SiH ₄ , POCl ₃ , O ₂ and NH ₃
	Metal Paste	Silver Paste for Front Contact
		Silver Paste for Rear Contact
		Aluminium Paste for Rear side
	Screen and squeegee	Screen for Ag front contact
		Screen for Ag rear contact
		Screen for Al rear contact
		Squeegee Rubber
2. Preventive maintenance COST (ค่าบำรุงรักษาเครื่องจักร)	Standard machine	ค่าซ่อมบำรุง เช่น สายพาน, มอเตอร์, หลอดไฟ, สายไฟ, ท่อแก๊ส, ท่อสารเคมี และ ชิ้นส่วนเสื่อมสภาพ อื่นๆ
3. Depreciation (ค่าเสื่อมสภาพเครื่องจักรและอาคารสถานที่)	Standard machine	ค่าเสื่อมสภาพ = (ราคาต้นทุน-ราคาซาก)/อายุการใช้งาน
4. Labor cost, Consumable, Electricity & water and Other	ค่าแรง และสาธารณูปโภค	ค่าจ้างพนักงาน วัสดุสิ้นเปลือง ค่าน้ำ ค่าไฟ ค่าแพคเกจ



รูปที่ 4.20 สัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของประเภทต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนในเชิงพาณิชย์

Cost of standard solar cell (cents/watt)



รูปที่ 4.21 ประเภทต้นทุนราคา (cent/watt) การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนในเชิงพาณิชย์

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกโพลีซิลิคอนโครงสร้างมาตรฐานอุตสาหกรรมในประเทศไทย กับการคาดการณ์ต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกโพลีซิลิคอนสำหรับงานวิจัยนี้มีโครงสร้าง LBSF ที่เปิดช่อง Localized p⁺⁺ ด้วยเทคนิคการประทับลาย โดยได้นำข้อมูลประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Power conversion efficiency; PCE) ของเซลล์โครงสร้าง LBSF ที่ใช้เทคนิค Laser doping ได้ให้ค่า PCE ประมาณ 20% [31] จากงานของคณะวิจัย D. Lin

ผลการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตพบว่า กระบวนการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างเซลล์แบบ LBSF ส่งผลต่อต้นทุนราคาของ 1 เซลล์ที่มากขึ้นจากราคาประมาณ 26.34 บาท เป็น 27.66 บาท หรือ สูงขึ้นประมาณ 5.01% อย่างไรก็ตามเซลล์โครงสร้าง LBSF ที่ผลิตด้วยเทคนิคการประทับลายคาดการณ์ว่าเมื่อผลิตในขนาดอุตสาหกรรมจะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า 20% ทำให้ราคาต้นทุนต่อวัตต์ลดลงมากกว่า 3.43% จากราคาต้นทุน 17.66 cent/watt ลดลงเป็น 17.06 cent/watt ดังนั้นเซลล์โครงสร้าง LBSF ด้วยวิธีประทับลายซึ่งสามารถผลิตร่วมกับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมได้นั้น มีต้นทุนการผลิตต่อวัตต์ลดลงได้ จึงแสดงให้เห็นว่าผลการวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนโครงสร้าง LBSF เข้าสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ และด้านทางเศรษฐศาสตร์ได้แสดงถึงความคุ้มค่าต่อการลงทุน ขณะที่โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบ PERC ที่ให้ PCE ประมาณ 21.7% มีต้นทุนของเซลล์เท่ากับโครงสร้าง LBSF ด้วยวิธี Laser doping ประมาณ 17 cent/Watt แสดงราคาต้นทุนของการผลิตเซลล์โครงสร้างต่าง ๆ ในตลาดโลกในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกโพลีซิลิคอนโครงสร้างมาตรฐานอุตสาหกรรมในประเทศไทย กับการคาดการณ์ต้นทุนการผลิตเซลล์ในงานวิจัย

COST classification	Cell (Pcs.) = 10,000,000.00 pcs / 1 year			
	<ul style="list-style-type: none"> • เซลล์ในอุตสาหกรรม %PCE = 18% ให้ 4.52 watt/cell หรือ 45,209,835.00 watt /1 year • เซลล์ PERL %PCE = 20% ให้ 4.91 watt/cell หรือ 49,141,125.00 watt /1 year 			
Types	COST Amount (THB)	COST per pcs (THB/pcs.)	COST per Watt (THB/watt)	COST per watt (cents/watt)
1. Direct Cost (Raw material)				
Wafer	66,000,000.00	6.60	1.34	4.07
Chemical	4,976,040.74	1.50	0.30	0.92
Gas	29,382,375.28	2.94	0.60	1.81
Metal Paste	34,720,164.66	3.47	0.71	2.14
Screen and Squeegee	4,684,683.44	0.47	0.10	0.29
Standard Cell Cost Sum #1	149,763,264.13	14.98	3.31	10.04
Additional chemical for PERL	2,941,457.49	0.29	0.06	0.18
Additional gas for PERL	10,207,834.33	1.02	0.21	0.63
Flash foam for PERL	23,598.55	0.002	0.0005	0.001
PERL Cost Sum #1	162,936,154.50	16.29	3.32	10.05
2. Preventive maintenance COST				
Standard machine	7,832,704.62	0.78	0.16	0.48
Standard Cell Cost Sum #2	7,837,704.62	0.78	0.16	0.48
Additional stamp machine	5,000.00	0.001	0.0001	0.0003
PERL Cost Sum #2	7,837,704.62	0.78	0.16	0.48
3. Depreciation				
Standard machine	49,733,573.99	4.97	1.01	3.07
Standard Cell Cost Sum #3	49,733,573.99	4.97	1.01	3.07
Additional stamp machine	20,000.00	0.0020	0.0004	0.001
PERL Cost Sum #3	49,753,573.99	4.98	1.01	3.07
4. Labor cost, Consumable, Electricity & water and Others				
	56,072,564.13	5.61	1.14	3.46
Total cost for Standard Cell	263,402,105.86	26.34	5.83	17.66
Total cost for PERL Cell	276,599,997.23	27.66	5.63	17.06
Total Watt for standard Cell = 4.52 Watt/piece and Total Cost = 17.66 cent/Watt (PCE = 18%)				
Total Watt for PERL Cell = 4.91 Watt/piece and Total Cost = 17.06 cent/Watt (PCE = 20%)				

*หมายเหตุ ใช้อัตราแลกเปลี่ยน 1 US = 33 บาท

ตารางที่ 4.7 สรุปต้นทุนการผลิตแผ่นเซลล์ในโครงสร้างต่าง ๆ ของตลาดโลก ข้อมูลจาก <http://pvinsights.com/>

Solar PV Cell Weekly Spot Price					
Item	High	Low	Average	AvgChg	AvgChg %
Multi Cell Price Per Watt	0.135	0.090	0.104	- 0	- 0%
Non China Poly Cell Per Watt	0.140	0.090	0.104	- 0	- 0%
Poly PERC Cell Per Watt	0.135	0.105	0.112	- 0	- 0%
Non China Poly PERC Cell Per Watt	0.135	0.115	0.123	- 0	- 0%
Mono PERC Cell Per Watt	0.170	0.145	0.151	- 0	- 0%
Non China Mono PERC Cell Per Watt	0.170	0.145	0.150	- 0	- 0%
High Eff Mono PERC Cell Per Watt	0.170	0.150	0.157	- 0	- 0%
156 mm Multi Solar Cell	0.630	0.400	0.477	- 0	- 0%
156 mm Mono Solar Cell	0.870	0.530	0.610	- 0	- 0%
China Poly Cell Per Watt	Visit here for more detail Cell price information				
Non (TW or CN) Poly Cell Per Watt	Visit here for more detail Cell price information				
Unit: USD	more	Last Update: 2018-12-19			
High Efficiency Mono PERC Cell: The Prices are mainly represented to solar cells for 21.7% efficiency with less than 2% of CTM efficiency lost.					

4.6 สรุป

ในบทนี้ได้ศึกษาเงื่อนไขการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบโครงสร้าง LBSF ด้วยการใช้เครื่อง Flash foam stamp ในเงื่อนไขลวดลายแบบเส้น และแบบจุดที่ Aperture ratio 5-100% การประทับครั้งแรกได้ประทับลายของโบรอนซึ่งเป็นแหล่งสารเจือสำหรับการสร้างบริเวณ p^{++} ด้านหลังเซลล์ และขั้นตอนการประทับลายของกรดไฮโดรฟลูออริก สำหรับสกัดเปิดช่องให้กับชั้นไดอิเล็กทริกที่บริเวณเดียวกันกับ p^{++} ซึ่งขนาดลวดลายดังกล่าวมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมาก โดยเซลล์ที่มีขนาดลายเส้น 500 μm ที่ Aperture ratio 15% ให้ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 1.46% เมื่อเทียบกับเซลล์ที่ไม่เปิดช่อง ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ด้วยวิธีประทับลาย สามารถนำไปผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ขั้นตอนการผลิตเซลล์ไม่ซับซ้อนสอดคล้องกับการผลิตเดิมที่มีอยู่ คาดการณ์ว่าสามารถให้ราคาต้นทุนต่อวัตต์ลดลงมากกว่า 3.43% จากราคาต้นทุน 17.66 cent/watt ของเซลล์มาตรฐานลดลงเป็น 17.06 cent/watt เมื่อพิจารณาค่า PCE เท่ากับ 20%

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

5.1.1 การออกแบบและสร้างเครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

ได้ประสบความสำเร็จในการสร้างเครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติต้นแบบสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีต้นทุนต่ำกว่าเทคนิคที่ใช้เลเซอร์เพื่อเปิดช่องไดโอดเล็กทริก ขั้นตอนของการประทับลายไม่มีความซับซ้อน สามารถประทับลวดลายฟิล์ม BSG จากสารละลายโบรอนได้โดยตรง และเครื่องประทับลายต้นแบบนี้ยังสามารถใช้สกัดฟิล์มไดโอดเล็กทริกเป็นบริเวณหรือลวดลายตามต้องการได้โดยตรง ไม่ซับซ้อนเหมือนกับวิธี Photolithography ซึ่งโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ LBSF ต้องการลวดลายในขนาดหลักร้อยไมครอน ดังนั้นวิธีการประทับลายจึงมีความเหมาะสมมาก เครื่องสามารถปรับระดับหัวประทับบนชิ้นงานได้หลายระดับ ขึ้นกับขนาดของลวดลาย และสารละลายที่ถ่ายทอดลวดลายลงบนชิ้นงาน ชุดหัวประทับลายสามารถสวมประกอบร่วมกับแผ่น Flash foam และสามารถเปลี่ยนขนาดพื้นที่ใหญ่ได้

5.1.2 การถ่ายทอดลวดลายด้วย Foam stamp

ได้ประสบความสำเร็จการทดสอบสร้างลวดลายด้วยการใช้ Foam stamp และสามารถนำไปประยุกต์ได้หลายประเภท เช่นประทับลวดลายของสารละลายสารเจือเช่นโบรอน หรือสามารถนำไปประทับลายเพื่อสกัดฟิล์มไดโอดเล็กทริกในบริเวณที่ต้องการได้โดยตรง หรือสามารถประทับสารไวแสงเพื่อเป็นหน้ากากป้องกันการสกัดผิวชิ้นงานได้โดยตรง ในงานประยุกต์ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Selective Emitter สามารถผลิตเป็นบริเวณ n^{++} region หรือ p^{++} ได้ในเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF วิธีการประทับลายจึงเป็นวิธีทางเลือกต้นทุนต่ำสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับอุตสาหกรรมได้ ขนาดลวดลายที่ผลิตได้ไม่ต่ำกว่า $100\ \mu\text{m}$ ลวดลายที่ผลิตได้มีความแม่นยำ มีความคลาดเคลื่อนจากแบบไม่เกิน 2.5%

5.1.3 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนต้นแบบด้วยวิธีการประทับลาย

ได้ประสบความสำเร็จในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบโครงสร้าง LBSF ด้วยการใช้เครื่อง Flash foam stamp ในเงื่อนไขลวดลายแบบเส้น และแบบจุดที่ Aperture ratio 5-100% การประทับครั้งแรกได้ประทับลายของโบรอนซึ่งเป็นแหล่งสารเจือสำหรับการสร้างบริเวณ p^{++} ด้านหลังเซลล์ และขั้นตอนการประทับลายของกรดไฮโดรฟลูออริก สำหรับสกัดเปิดช่องให้กับชั้นไดโอดเล็กทริกที่บริเวณเดียวกันกับ p^{++} ซึ่งขนาดลวดลายดังกล่าวมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมาก โดย

เซลล์ที่มีขนาดลายเส้น 500 μm ที่ Aperture ratio 15% ให้ค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 1.46% เมื่อเทียบกับเซลล์ที่ไม่เปิดช่อง ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ด้วยวิธีประทับลาย สามารถนำไปผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ ขั้นตอนการผลิตเซลล์ไม่ซับซ้อนสอดคล้องกับการผลิตเดิมที่มีอยู่

5.1.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนโครงสร้าง LBSF ต้นแบบด้วยวิธีการประทับลาย

กระบวนการเพิ่มขึ้นของโครงสร้างเซลล์แบบ LBSF ด้วยวิธีการประทับลายส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของต้นทุนจากราคาประมาณ 26.34 บาท/cell เป็น 27.66 บาท/cell หรือ สูงขึ้นประมาณ 5.01% อย่างไรก็ตามคาดการณ์ว่าเมื่อผลิตในมาตรฐานอุตสาหกรรมจะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า 20% ทำให้ราคาต้นทุนต่อวัตต์ลดลงมากกว่า 3.43% โดยมีราคาต้นทุนเซลล์ประสิทธิภาพสูงทั่วไปอยู่ที่ 17.66 cent/watt จะลดลงเป็น 17.06 cent/watt ดังนั้นเซลล์โครงสร้าง LBSF ด้วยวิธีประทับลายซึ่งสามารถผลิตร่วมกับกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมได้นั้นสามารถให้ต้นทุนการผลิตต่อวัตต์ลดลงได้ จึงแสดงให้เห็นว่าผลการวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนโครงสร้าง LBSF เข้าสู่การผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ และด้านทางเศรษฐศาสตร์ได้แสดงถึงความคุ้มค่าต่อการลงทุน

5.2 ข้อเสนอแนะ

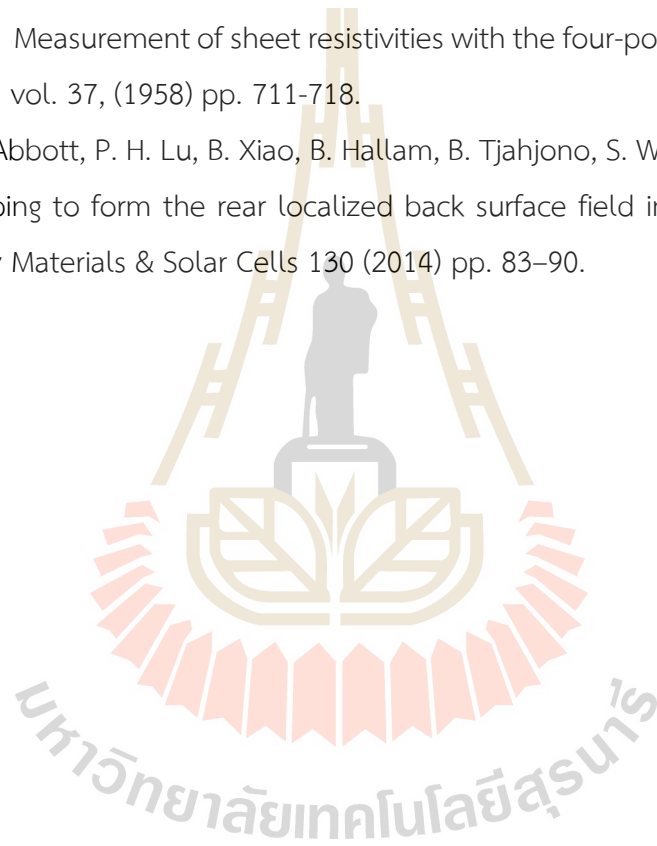
จากการทดสอบผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF พบว่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์สูงกว่าเซลล์ที่มีชั้น SiN_x เคลือบด้านหลังทั่วแผ่น ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของ V_{oc} จากชั้นสนามไฟฟ้าด้านหลัง การเพิ่มขึ้นของ J_{sc} จากการลดผลกระทบของค่าอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะ อย่างไรก็ตามค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสุทธิของเซลล์ยังมีความเกี่ยวข้องกับค่าฟิลแฟคเตอร์ ซึ่งค่า FF ของกลุ่มเซลล์ทดสอบยังมีค่าต่ำกว่า 0.7 เนื่องจากคุณภาพของขั้วไฟฟ้าจาก Fast firing ที่ 890°C ยังเป็นเงื่อนไขที่ไม่เหมาะสม แม้ว่าค่า V_{oc} และ J_{sc} จะมีค่าสูงก็ตาม ดังนั้นในงานวิจัยนี้สามารถศึกษาต่อยอดและพัฒนา ค่า FF ให้สูงกว่า 0.7 ได้ด้วยการใช้อุณหภูมิ Firing ที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์ ให้มีค่าสูงกว่า 890°C ซึ่งจะส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ให้ประสิทธิภาพสูงกว่า 20% ได้

บรรณานุกรม

- [1] J. Mandelkorn, and J.H. Lamneck, "A New Electric Field in Silicon Solar Cells", *J. Appl. Phys.*, **44**, (1973) pp.4785
- [2] R. Hazel, and K. Jaeger, "Low Temperature Surface Passivation of Silicon Solar Cells", *J. El. Chem. Soc.* **136**, (1989) pp. 518
- [3] A.W. Blakers, A.Wang, A.M. Milne, J. Zhao, and M.A. Green, "22.8% efficient Silicon Solar Cells", *Appl. Phys. Lett.* **55**, (1989) pp.1363
- [4] J. Zhao, A. Wang, and M.A. Green, "24% Efficient PERL Structure Silicon Solar Cells", *21st IEEE Photovoltaic Special Conference*, (1990) pp.333
- [5] A. Metz, and R. Hezel, "High-quality passivated rear contact structure for silicon solar cells based on simple mechanical abrasion", *28th IEEE Photovoltaic Special Conference*, (2000) pp.172
- [6] J-H Guo, BS. Tjahjono, JE. Cotter, "19.2% Efficiency N-Type Laser Grooved Silicon Solar Cells", *31st IEEE Photovoltaic Special Conference*, (2005) pp.983
- [7] D. De Ceuster, P. Cousins, D. Rose, D. Vicente, P. Tipones, W. Mulligan, "Low Cost, High Volume Production of >22% Efficiency Silicon Solar Cells", *Proc.22nd EU-PVSEC*, (2007) pp.816
- [8] P. Engelhart, N-P Harder, R. Grischke, A. Merkle, R. Meyer, R. Brendel, "Laser Structuring for Back Junction Silicon Solar Cells" *Progress. in Photovoltaic: Research and Application*, **15**, (2006) pp.237
- [9] D. Huljic, T. Zerres, A. Mohr, Kv. Maydell, K. Petter, JE Müller, H. Feist, N-P Harder, P. Engelhart, T. Brendemühl, R. Grischke, R Meyer, R. Brendel, F. Granek, A. Grohe, M. Hermle, O. Schultz, SW. Glunz, "Development of a 21% Back-Contact Monocrystalline Silicon Solar Cell for Large Scale Production" *21st EU-PVSEC* (2006)
- [10] F. Granek, M. Hermle, D. M. Huljic, O. S. Wittmann, and S. w. Glunz, "Enhanced Lateral Current Transport via the Front N⁺ Diffused Layer of N-Type High-Efficiency Back-Junction Back-Contact Silicon Solar Cells" *Proc. in Photovoltaic: Research and Application*, **17**, (2006) pp.47
- [11] H. Somberg, "Ink jet printing for metallization on very thin solar cells" *21st IEEE Photovoltaic Special Conference*, (1990) pp.666

- [12] F.C. Krebs, Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **93** (2009), pp. 394
- [13] A. J. Lennon, R. Y. Utama, M.A.T. Lenio, A.W.Y. Ho-Baillie, N. B. Kuepper and S. R. Wenham, Forming openings to semiconductor layers of silicon solar cells by inkjet printing, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **92**, (2008) pp. 1140.
- [14] N.-P Harder, A. B. Sproul, T. Brammer, and A. G. Aberle, Effects of Sheet Resistance and Contact Shading on the Characterization of Solar Cells by Open-Circuit Voltage Measurement, *J. Appl. Phys.*, **94**, (2003) 2473.
- [15] S. Y Hwang, et .al., “ Fabrication of roll imprint stamp for continuous UV roll imprinting process”, *Microelectronic Engineering* Volume 86, Issues 4–6, (2009) 642–645
- [16] K. S Han, et .al., “Enhanced transmittance of glass plates for solar cells using nano-imprint lithography”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 94, Issue 3, (2510) 583–587
- [17] S. Landis, et al. , Silicon solar cells efficiency improvement with Nano Imprint Lithography technology, *Microelectronic Engineering*, Volume 111, (2013) 224–228
- [18] M.A. Green (2001), *Crystalline silicon solar cells*, London: Imperial College Press.
- [19] S. Gall, et.al., Boron laser doping through high quality Al₂O₃ passivation layer for localized B-BSF PERL solar cells, *Energy Procedia*, vol. 38, (2013) pp. 270-277
- [20] Z. Wang, Han, et.al., Advanced PERC and PERL production cells with 20.3% record efficiency for standard commercial p-type silicon wafers, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 20, (2012) pp. 260–268.
- [21] Y. Eisenberg, et. al., Effective Surface Recombination of p+ Layers Doped Using Ion Implantation or Surface Deposited B Sources, *Energy Procedia*, vol. 92, (2016) pp. 16-23.
- [22] H. Yong, et.al., A facile and low-cost micro fabrication material: flash foam, *Scientific Reports*, (2015) vol. 5:13522
- [23] G. L. Vick, et.al., Solid Solubility and Diffusion Coefficients of Boron in Silicon, *J. Electrochem. Soc.: SOLID STATE SCIENCE*, vol. 116, (1969) pp.1142-1144.
- [24] U. Jäger, et.al., Local boron doping for p-type PERL silicon solar cells fabricated by laser processing of doped silicon nanoparticle paste, paper presented in the 29th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands.
- [25] A. Kränzl, et.al., Bifacial solar cells on multicrystalline silicon with boron BSF and open rear contact, paper presented in the 4th IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, (2006) Hawaii, United States of America.

- [26] D.P. Armel, et.al., Sol-gel deposited phosphorus and boron doped thin silica films for diffused n⁺p and n⁺pp⁺ structures, *Physica Status Solidi*, vol. 11, Issue 11-12, (2014) pp. 1654–1656.
- [27] D.S. Kim, et.al., Silicon solar cells with boron back surface field formed by using boric acid, paper presented in the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, (2007). Milan, Italy.
- [28] T. Katsu, (2002). Space solar cell, Google Patents.
- [29] G. Singh, et.al., Fabrication of c-Si solar cells using boric acid as a spin-on dopant for back surface field, *RSC Advances*, vol. 4, (2013) pp. 4225–4229.
- [30] F.M. Smits, Measurement of sheet resistivities with the four-point probe, *Bell System Technical Journal*, vol. 37, (1958) pp. 711-718.
- [31] D. Lin, M. Abbott, P. H. Lu, B. Xiao, B. Hallam, B. Tjahjono, S. Wenham, Incorporation of deep laser doping to form the rear localized back surface field in high efficiency solar cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 130 (2014) pp. 83–90.



สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 0 4422 4582 0856613088
โทรสาร 0 4422 4601



thipwan@g.sut.ac.th

ผศ.ดร.ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์

Assistant Professor Dr. Thipwan Fangsuwannarak

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญาเอก

2551 Ph.D. (Photovoltaic Engineering) Centre of Excellence for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, University of New South Wales, Australia

ระดับปริญญาโท

2540 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (Electrical Engineering, Semiconductor Devices Research Laboratory, SDRL) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ

ระดับปริญญาตรี

2536 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับ 2 (B.Eng (2nd Honor in Electronic Engineering) มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล จ. นครราชสีมา

ประวัติการทำงาน

- 2540-ปัจจุบัน อาจารย์ประจำ และนักวิจัย วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี จ.นครราชสีมา
- 2557-ปัจจุบัน ผู้ทรงคุณวุฒิ ให้ข้อคิดเห็นและประเมินโครงการทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของ อาจารย์รุ่นใหม่ และทุนพัฒนานักวิจัย (รุ่นกลาง) ของฝ่ายวิชาการ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
- 2555 ที่ปรึกษา R&D group, Innovative Harvesting Energy, China
- 2554 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินข้อเสนอโครงการวิจัย ให้แก่วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล HDD สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2552-2554 วิทยากรผู้เชี่ยวชาญฝึกอบรมการผลิตและวิเคราะห์ฟิล์มบาง อุตสาหกรรมฮาร์ดิสไดฟ์ ให้แก่ บริษัทซีเกต บริษัทเวสเทินท์ดิจิตอล บริษัทฮิตาชิฮาร์ดิสไดฟ์
- 2553 ออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อการเรียนรู้ และจัดบรรยาย อบรมภาคสนาม ให้แก่ชุมชน อ. ครบุรี จ. นครราชสีมา
- 2548-2550 นักวิจัยในกลุ่มโครงการ Global Climate and Energy Project (GCEP) แหล่งทุนจาก Stanford University, USA
- 2539-2540 นักวิจัยห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Devices Research Laboratory, SDRL) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
- 2536-2537 อาจารย์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ บางเขน กรุงเทพฯ

สาขาวิชาการที่มีความเชี่ยวชาญ

- การผลิตวัสดุผลึกนาโนสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่จาก nc-Si ink และ ZnO:Bi film การวิเคราะห์วัสดุสารกึ่งตัวนำชั้นสูง และวัสดุเก็บเกี่ยวพลังงาน
- การผลิตเซลล์อาทิตย์และพัฒนาประสิทธิภาพด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ
- ออกแบบระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ในแบบระบบอิสระและระบบที่เชื่อมต่อบริเวณสายส่ง
- ออกแบบระบบไฮบริดพลังงานทดแทนจากระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ และระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริก

ผลงานและรางวัล

1. ยื่นจดสิทธิบัตร Patent (25 ก.ค. 2558) การประดิษฐ์ “แผ่นพื้นอัจฉริยะสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแรงเฉื่อยเชิงกล” เลขที่คำขอ 1601002468
2. ยื่นจดสิทธิบัตร Patent (16 ธ.ค. 2558) การประดิษฐ์ “เซลล์นำไฟฟ้าพลังแสงด้วยผลึกนาโนทรงกลมซิงค์ ออกไซด์เจือสารบิสมัท และวิธีการผลิต” เลขที่คำขอ 1501007762
3. ลิขสิทธิ์ ลักษณะงานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ “โปรแกรมที่กำหนดให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมกระแสไฟฟ้ากริดเอซีของวงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์เฟสเดียวที่เชื่อมต่อกับกริด” เลขที่327427 (2558)
4. อนุสิทธิบัตรการประดิษฐ์ (3 ก.พ.2555) “การใช้วัสดุเทลลอนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โดยไม่ใช้สารละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์” เลขที่อนุสิทธิบัตร 6976
5. บทความยอดเยี่ยม Energy Materials paper award for 7th Conference on Energy Network of Thailand, 2011 “การสร้างชั้นพาสซีเวชันด้านหลังสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีการทะลุของอะลูมิเนียม และการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างชั้น”
6. Research Group Scholarship: Global Climate and Energy Project (GCEP) 2005-2007, Stanford University, USA
7. Ph.D. Scholarship สำนักงานนโยบายพลังงานแห่งชาติ ประเทศไทย ในหัวข้อวิทยานิพนธ์เกี่ยวกับ Third-generation of Silicon Solar cells ศึกษาที่ Centre of Excellence for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, UNSW, Australia

ภาระงานสอนและที่ปรึกษางานวิทยานิพนธ์

สอนในระดับปริญญาตรี ปริญญาโท และปริญญาเอก ในรายวิชาดังนี้

อิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม วิศวกรรมไฟฟ้า สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เซลล์แสงอาทิตย์ประยุกต์ เซลล์แสงอาทิตย์และระบบ เทคโนโลยีพลังงานรวม วงจรรวมดิจิทัล และวัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า

ที่ปรึกษางานวิทยานิพนธ์

ฟิล์มบาง ZnO:Bi สำหรับป้องกันการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

หมึกฟอสฟอรัสสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงแบบ Selective Emitter Cell

เครื่องฉีดสารสำหรับสร้างชั้นพาสซีเวชันให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีต้นทุนต่ำ

การบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

1. งานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือบิสมัทด้วยการเติมสารลดแรงตึงผิวเพื่อประยุกต์ใช้งานทางเซลล์แสงอาทิตย์และออปโตอิเล็กทรอนิกส์
สถานภาพ ผู้ร่วมวิจัย (40%)
แหล่งทุน วช. 2558 เสร็จสมบูรณ์
2. งานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงค่าความนำไฟฟ้าและช่องว่างอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงของผลึกนาโนซิลิคอนควอนตัมดอทสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน วช. 2556 เสร็จสมบูรณ์
3. งานวิจัยเรื่อง การสร้างผิวซิลิคอนขรุขระรูปทรงพีระมิดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการใช้หน้ากากกริดในสารละลายเคมีที่ไม่ใช่ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน วช. 2555 เสร็จสมบูรณ์
4. งานวิจัยเรื่อง เทคนิคต้นทุนต่ำด้วยการฉีดสารละลายเพื่อสร้างชั้นรอยต่อพาสซีเวชันคุณภาพสูงที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 2 ปี
แหล่งทุน วช. 2554-2555 เสร็จสมบูรณ์
2. งานวิจัยเรื่อง การเตรียมผลึกนาโนซิลิคอนและการประยุกต์ใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 2 ปี
แหล่งทุน วช. 2553-2554 เสร็จสมบูรณ์
3. งานวิจัยเรื่อง การศึกษาคุณภาพของผิวพาสซีเวชันด้านหลัง ต้นทุนต่ำ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน สกว. 2552 เสร็จสมบูรณ์
4. งานวิจัยเรื่อง การลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าเซลล์ด้วย ANISOTROPIC TEXTURE ETCHING เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน วช. 2552 เสร็จสมบูรณ์
5. งานวิจัยเรื่อง Global Climate and Energy Project (GCEP) 2005-2007, Stanford University, USA
สถานภาพ ผู้ร่วมวิจัย
แหล่งทุน Stanford University, USA
6. งานวิจัยเรื่อง การศึกษาเครื่องยนต์ฟลูอิดไดน์และการประยุกต์ใช้งาน : ออกแบบทรานสดิวเซอร์ในภาค tuning line
สถานภาพ หัวหน้าโครงการ ใช้ระยะเวลา 1 ปี (2545)
แหล่งทุน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เสร็จสมบูรณ์
7. งานวิจัยเรื่อง การสร้างชั้นรอยต่อพาสซีเวชันคุณภาพสูงของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำจากการประทับลาย
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน วช. 2558

8. งานวิจัยเรื่อง การสังเคราะห์หมึกผสมผลึกนาโนซิลิคอนสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่และต้นทุนต่ำ
 สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 2 ปี
 แหล่งทุน วช. 2557

งานวิจัยที่กำลังทำ

1. งานวิจัยเรื่อง เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหมึกซิลิคอนควอนตัมต่อทจากการใช้แผ่นเซลล์ที่เสื่อมสภาพเสียหายมาผลิตใหม่
 สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัย ระยะเวลา 1 ปี
 แหล่งทุน กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน งบประมาณปี 2561
2. งานวิจัยเรื่อง วัสดุอัจฉริยะ (smart materials) สำหรับพลังงานทดแทนในอนาคต
 สถานภาพ ผู้ร่วมวิจัย ระยะเวลา 1 ปี
 แหล่งทุน วช. 2561

ผลงานเผยแพร่

1. Supanut Laohawiroj, Apirak Mangkornkaew, Atthaphon Maneedaeng, **Thipwan Fangsuwannarak**, “Silicon composite ink for advanced photovoltaic generation prepared by low-cost technique” Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology, Volume 13 No.2 (2018)
2. กมลชนก เมฆหมอก วรากร ลឹมหศิริ และ ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ “การสร้างชั้น Local Back Surface Field (LBSF) ที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนโดยวิธีการประทับลายด้วย Flash foam” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 13-15 มิถุนายน 2561 จ.ระยอง หน้า 791-794
3. พีรฤดี รัตนวิชัย ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ รุ่งเรือง พัฒนากุล และ ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ “การศึกษาสมบัติทางจุลโครงสร้างและทางแสงของฟิล์มบางผลึกนาโนซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยบิสมัทสำหรับการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟสไกต์” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 13-15 มิถุนายน 2561 จ.ระยอง หน้า 879-885
4. ศุภณัฐ เลหาวิโรจน์ พีรฤดี รัตนวิชัย รุ่งเรือง พัฒนากุล และ ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ “การสังเคราะห์ฟิล์มบางซิลิคอนต่อทในเมตริกซ์ของซิงค์ออกไซด์ได้บิสมัทจากหมึกคอมโพสิตซิลิคอน และคุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดวัสดุชั้นสูง” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 13-15 มิถุนายน 2561 จ.ระยอง หน้า 899-905
5. กมลชนก เมฆหมอก ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ และ ญัฐพล ช่วงสุวนิช “ผลของการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนแสงแบบ Gradient-Index ที่มีผลต่อสมบัติทางแสงและไฟฟ้าของการผลิตแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์สีด้า” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 31 พฤษภาคม-2 มิถุนายน 2560 จ. เชียงใหม่ หน้า 458-463
6. S. Chanrawangyot, S.T. Rattanachan, A. Watcharenwong, **T. Fangsuwannarak**, Antibacterial activity of ZnO nanoparticles coated on ceramic tiles prepared by sol-gel method, Journal

- of Metals, Materials and Minerals, Volume 27, Issue 2, p. 1-5 (2017)
7. A. Mangkornkaew and **T. Fangsuwannarak**, Characterization of patterns of Localized Doping Using Stamping technique for Selective n-Emitter Solar Cell Structure, Materials Science and Engineering 241, 012042 (2017)
 8. Karoon Fangsuwannarak, Ponrawee Wanriko, **Thipwan Fangsuwannarak**, “Effect of Biopolymer Additive on the Fuel Properties of Palm Biodiesel and on Engine Performance Analysis and Exhaust Emission” Energy Procedia, Volume 100, p. 227-236 (2016)
 9. อภิรักษ์ มังกรแก้ว ชิตพงษ์ เกตุถนอม อี๊ซึช เลหาวิโรจน์ และ **ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์** “การสร้างชั้นอิมิตเตอร์และชั้นไดโอดีทริกสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีการพิมพ์ลาย” การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย 18-20 มิถุนายน 2559 จ. พิษณุโลก หน้า 458-463
 10. W. Kempet, B. Marungsri, R. Yimnirun, W. Klysubun, **T. Fangsuwannarak**, S.T. Rattanachan, N. Pisitpipathsin, M. Promsawat, and S. Pojprapa, “Polarization Switching of PZT under Electrical Field via in-situ Synchrotron X-ray Absorption Spectroscopy” Ferroelectrics, 492: p.35-42 (2016)
 11. อภิรักษ์ มังกรแก้ว และ **ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์** “การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลคทีฟอิมิตเตอร์ด้วยเทคนิคพิมพ์ลาย” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38 (EECON38) 18-20 พฤศจิกายน 2558 จ.พระนครศรีอยุธยา
 12. **T. Fangsuwannarak** “IPA Free Texturization Process for Monocrystalline Silicon Solar Cells by PTFE Mask”, The Asian Conference on Sustainability, Energy and the Environment 2015, Kobe Japan, Proceeding p.363-369, 11-14 June (2015)
 13. **T. Fangsuwannarak**, A. Mankornkaew, N. Phiwpha and S. Sopitpan, “Preparation of Different Phosphorus Concentration for N⁺ Selective Emitter Solar cell by Spin on doping”, Grand Renewable Energy 2014, Tokyo Big Sight, Tokyo Japan, Proceeding P-PV-3-2, 27 July - 1 August (2014)
 14. S. T. Rattanachan, J. Kaewphoka and **T. Fangsuwannarak**, “Annealing Atmosphere of Bismuth Doped Zinc Oxide Thin Films Prepared by CTAB-Assisted Sol-gel Method”, Grand Renewable Energy 2014, Tokyo Big Sight, Tokyo Japan, Proceeding P-PV-3-2, 27 July - 1 August (2014)
 15. J. Kaewphoka, **T. Fangsuwannarak** and S.T. Rattanachan, “Synthesis of surfactant-assisted nanostructured Bi doped Zinc oxide for photo-sensing application”, Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2014 11th International Conference ID paper 1396, 15-17 May (2014)
 16. N. Phiwpha, **T. Fangsuwannarak** and S. Sopitpan, “Locally contacted rear surface passivated solar cells by inkjet printing”, Proc. of SPIE Vol. 9234 92341B-1 (2014)
 17. N. Phiwpha and **T. Fangsuwannarak**, “Surface Passivation of Point-Contacted Solar Cells by Inkjet Printing” Integrated Ferroelectrics, 149: pp.102-106, (2013)
 18. S.T. Rattanachan, P. Krongarrom and **T. Fangsuwannarak**, “Influence of annealing temperature on characteristics of bismuth doped zinc oxide films” American Journal of Applied Sciences Volume 10, Issue 11, 1 October 2013, Pages 1427-1438 (2013)

19. **T. Fangsuwannarak** and K. Kunchana, “Optical Properties of Nano-crystalline Silicon Films Prepared by Using Sol-Gel Spin Coating Process” The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics, No. 43: pp.106-110 (2013)
20. **T. Fangsuwannarak**, K. Amonsurintawong and S. Sopitpan, “Aluminum-induced crystallization of p⁺silicon pinholes for the formation of rear passivation contact in solar cell” Key Engineering Materials Vol. 547 (2013) pp. 31-40 (2013) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.547.31
21. **T. Fangsuwannarak**, K. Khunchana and S.T. Rattanachan “Optical Band Gaps and Electrical Conductance of Si nanocrystals in SiO₂ Matrix for Optoelectronic Applications” Key Engineering Materials Vol. 545 (2013) pp 134-140 (2013) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.545.134
22. **T. Fangsuwannarak**, P. Krongarrom, J. kaewphoka and S. T. Rattanachan, “Bismuth doped ZnO films as anti-reflection coatings for solar cells” Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 978-1-4799-0545-4/13 ©2013 IEEE
23. K. Kunchana and **T. Fangsuwannarak**, “Thin Film preparation of silicon nanocrystals embedded in silicon oxide by sol-gel method” Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 978-1-4673-2025-2/12/ ©2012 IEEE
24. Phanuwat Krongarrom, Sirirat T Rattanachan, **Thipwan Fangsuwannarak**, “ZnO Doped with Bismuth in Case of In-Phase Behavior for Solar Cell Application” Engineering Journal, Vol 16, No 3 p. 59-70 (2012)
25. **T. Fangsuwannarak**, P. Krongarrom, and S. T. Rattanachan, “Synthesis and characterizations of bismuth doped zinc oxide via sol-gel technique for solar cells applications” 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 5-9 Sep. (2011)
26. P. Krongarrom, S.T. Rattanachan and **T. Fangsuwannarak**, "Structural and optical characterizations of n-type doped ZnO by sol-gel method for photovoltaic", Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2011 8th International Conference on, On page(s): 50 - 53, Volume: Issue: , 17-19 May (2011)
27. **ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์** กิตติศักดิ์ อมรสุรินทวงศ์ และ สุวัฒน์ โสภิตพันธ์ “การสร้างชั้นพาสซีเวชันด้านหลังสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีการทะลุของอะลูมิเนียม และการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างชั้นอะลูมิเนียมกับชั้นอะมอร์ฟัสซิลิคอน” การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 จ.ภูเก็ต 5 - 7 พฤษภาคม 2554 CEN12-562 (*บทความยอดเยี่ยมประเภทวัสดุพลังงาน*)
28. กิตติศักดิ์ อมรสุรินทวงศ์ และ **ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์** “ผลของการสะท้อนแสงของผิวเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีลวดลายพีระมิด” การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6, 5 - 7 พฤษภาคม 2553 ENETT6-1193
29. **T. Fangsuwannarak** and K. Amonsurintawong, “Texturisation of monocrystalline Si wafer by wet chemical etchants without surfactant additive through PTFE masks”, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition and 5th World Photovoltaics

- Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, 6-10 Sep. (2010)
30. **T. Fangsuwannarak** and G. Scardera, "Effect of Annealing Temperature on Dark Current Density of Silicon nanocrystals embedded in a Nitride Matrix for Photovoltaic Application," Proc. the 5th International Conference in Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology, On page(s): 797 - 800, Volume: Issue: , 14-17 May (2008)
 31. **T. Fangsuwannarak**, E.C. Cho, G. Conibeer, Y. Huang, T. Trupke and M.A. Green, "Analysis of The Effect of Silicon Quantum Dot Density on The Photoluminescence Spectra of Silicon Dot/Silicon Dioxide Superlattices," *Proc. 21th European Photovoltaic Solar Energy Conf. Dresden, Germany*, (2006)
 32. **T. Fangsuwannarak**, E. Pink, Y. Huang, G. Scardera, G. Conibeer, M. A. Green, "Effects of Silicon Nanocrystallite Density on The Raman-Scattering Spectra of Silicon Quantum Dot Superlattices," *Proc. SPIE 6415-07* (2006)
 33. G. Conibeer, M. A. Green, R. Corkish, Y. Cho, E-C. Cho, C-W Jiang, **T. Fangsuwannarak**, E. Pink, Y. Huang, T. Puzzer, "Silicon Nanostructures for Third Generation Photovoltaic Solar Cells," *Thin Solid Film*, **511-512**, 654 (2006).
 34. M. A. Green, E-C. Cho, Y. Cho, Y. Huang, E. Pink, T. Trupke, A. Lin, **T. Fangsuwannarak**, T. Puzzer, G. Conibeer, and R. Corkish, "All-Silicon Tandem Cells Based on "Artificial" Semiconductor Synthesised Using Silicon Quantum Dots in Dielectric Matrix," *The 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Dresden* (2006)
 35. Scardera, T. Puzzer, D. McGrouther, E. Pink, **T. Fangsuwannarak**, G. Conibeer, and M. A. Green, "Investigating Large Area Fabrication of Silicon Quantum dots in a Nitride Matrix for Photovoltaic Applications," *IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii*, **122** (2006)
 36. **T. Fangsuwannarak**, E. Pink, Y. Huang, Y. H. Cho, G. Conibeer, T. Puzzer, and M. A. Green, "Conductivity of Self-Organized Silicon Quantum Dots Embedded in Silicon Dioxide," *Proc. SPIE 6037*, 60370T (2005)
 37. M. A. Green, E-C. Cho, Y. Cho, Y. Huang, E. Pink, T. Trupke, A. Lin, **T. Fangsuwannarak**, T. Puzzer, G. Conibeer, and R. Corkish, "Artificial Semiconductor Synthesised Using Si Quantum Dots in a Dielectric Matrix," *The 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Barcelona* (2005)
 38. D. Kruangam, **T. Sujaridchai**, K. Chirakawikul, B. Ratwises and S. Panyakeow, "Novel amorphous silicon alloy optoelectronic integrated circuits," *Journal of Non-Crystalline Solids* **227-330**, 1146-1150 (1998)
 39. K. Chirakawikul, **T. Sujaridchai**, B. Ratwises, D. Kruangam, S. Panyakeow, W. Boonkosum, T. Sugino and J. Shirafuji, "Preparation of p-type polycrystalline diamond films and their applications to hole injection layers in amorphous SiC:H thin film light emitting diodes," *Journal of Non-Crystalline Solids*, **227-230**, 1156-1159 (1998)
 40. W. Boonkosum, D. Kruangam, B. Ratwises, **T. Sujaridchai**, S. Panyakeow, S. Fujikake and H.

Sakai, "Amorphous SiO:H thin film visible light emitting diode," Journal of Non-Crystalline Solids, **198-200**,1226-1229 (1998)

41. D. Kruangam, B. Ratwiset, **T. Sujaridchai**, S. Panyakeow, and W. Boonkosum, "Novel Application of Amorphous Silicon Flexible Solar Cells As Battery Charger for Personal Mobile Telephone," Technical Digest of the International PVSEC-9, Japan (1996)
42. D. Kruangam, **T. Sujaridchai**, K. Chirakawikul, B. Ratwiset and S. Panyakeow, "Application of Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition to the Fabrication of Si Alloy Optoelectronic Devices," Proceeding of 8th ASIAN Conference on Electrical Discharge ACED, Siam Inter-Continental, Bangkok (1996)
43. D. Kruangam, **T. Sujaridchai**, K. Chirakawikul, B. Ratwiset and S. Panyakeow, "Basic Properties of Amorphous Silicon Alloys for Optoelectronic IC Applications," Proceeding of Regional Symposium on Material Science, Fundamental and Applications on Semiconductor and Superconductors, Philippines (1996)
44. W. Boonkosum, D. Kruangam, B. Ratwiset, **T. Sujaridchai** and S. Panyakeow, "Visible Amorphous SiO:H Thin Film Light Emitting Diod," International Conference Amorphous Semiconductors Science&Technology (ICAS) (1995)
45. D. Kruangam, W. Boonkosum, B. Ratwiset, **T. Sujaridchai** and S. Panyakeow, "Fabrication of Amorphous Silicon Alloy Optical Devices for New Types of Thin Film Optoelectronic Integrated Circuits," Australia Microelectronic Conference (MICRO), Adelaide, Australia (1995)
46. W. Boonkosum, **T. Sujaridchai**, D. Kruangam, B. Ratwiset and S. Panyakeow, "Novel Matrix and Multi-Layer Amorphous Thin Film LED Flat Panel Display," Spring Meeting of Materials Research Society (MRS), Symposium V-Flat Panel Display San Francisco, USA, (1995)