

การศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากการสร้างลดตาย
ชั้นพาสซีเวชันด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

**STUDY OF SOLAR CELL EFFICIENCY FROM
PASSIVATION LAYERS BY INKJET PRINTER**

Natthaphong Phiwpha



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2013**

การศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากการสร้างลวดลายชั้นพาสซีเวชัน
ด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



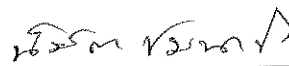
(รศ. ดร.กิติติ อรรถกิจมงคล)

ประธานกรรมการ



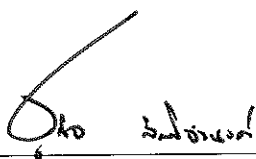
(ผศ. ดร.พิชญ์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)




(อ. ดร.นิमित ชมนาวัง)

กรรมการ



(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิ๋จางงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณัฐพงศ์ ผิวผา : การศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากการสร้างลวดลายชั้นพาสซีเวชันด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด (STUDY OF SOLAR CELL EFFICIENCY FROM PASSIVATION LAYERS BY INKJET PRINTER) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพย์วราธรณ พิงสุวรรณรักษ์, 138 หน้า.

การสร้างลวดลายขนาดเล็กของชั้นไดอิเล็กทริกบาง ๆ จากวัสดุซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) หรือซิลิคอนไนไตร (Si_3N_4) ที่อยู่ระหว่างแผ่นซิลิคอนฐานรองและชั้นไฟฟ้าโลหะด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในบริเวณดังกล่าว เราเรียกว่าชั้นไดอิเล็กทริกนี้ว่าชั้นพาสซีเวชัน ส่งผลให้เกิดอัตราการรวมตัวของพาหะลดลง เนื่องจากความเร็วในการรวมตัวของพาหะลดลงและอายุของพาหะเพิ่มขึ้น ผลเหล่านี้มีส่วนช่วยให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้น แต่เนื่องจากข้อจำกัดด้านกระบวนการในการสร้างลวดลายที่ซับซ้อนจากเทคนิคโฟโตลิโทกราฟี (photolithography) จึงไม่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์ งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาเครื่องพิมพ์แบบฉีดให้สามารถสร้างลวดลาย SiO_2 ขนาดเล็ก บนวัสดุแผ่นฐานซิลิคอนเพื่อเป็นชั้นพาสซีเวชันที่ผิวด้านหลังให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ เทคนิคการฉีดตัวทำละลายสารไวแสงโดยตรงช่วยลดความซับซ้อนของกระบวนการสร้างลวดลายขนาดเล็กได้และพร้อมพัฒนาสู่อุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ต่อไป

ในส่วนแรกของงานวิจัยได้พัฒนาเครื่องพิมพ์แบบฉีดให้สามารถพิมพ์ลวดลายในแนวนอนลงบนแผ่นฐานเรียบแข็งได้ตามที่ออกแบบไว้จากคอมพิวเตอร์ และได้ศึกษาการสร้างชั้นเอ็นซิลิคอน (n-Si) บนแผ่นฐานซิลิคอนชนิดพี (p-Si) ด้วยวิธี spin on dopant (SOD) เพื่อให้เกิดรอยต่อพี-เอ็นขึ้น และได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มไดอิเล็กทริก SiO_2 จากการใช้สารละลาย TEOS และเคลือบบนแผ่นฐาน p-Si ด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (spin coating) จากนั้นได้ศึกษาการเปิดช่องเส้นตรงของฟิล์มสารไวแสง (photoresist) ชนิดบวกที่เคลือบบนฟิล์ม SiO_2 ด้วยการฉีดสารทำละลายด้วยสารอะซิโตน (acetone) เมื่อได้ช่องเปิดขนาดเล็กของฟิล์มสารไวแสงซึ่งมีชั้น SiO_2 อยู่ด้านล่างแล้ว จากนั้นทำการสกัดฟิล์ม SiO_2 ด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออริก (HF) เข้มข้น 5% นาน 25 วินาที และล้างฟิล์มสารไวแสงทั้งหมดออก ดังนั้นฟิล์มบาง SiO_2 ที่ได้มีลักษณะเป็นลวดลายช่องเปิดเป็นร่องขนาดความกว้างแคบที่สุดเฉลี่ยประมาณ 150 μm และได้ศึกษาระยะห่างของลวดลายเส้นตรงต่าง ๆ กันเช่น 190 μm 350 μm และ 780 μm อีกทั้งได้ศึกษาความหนาของชั้น SiO_2 ที่หนาด่างกันเช่น 100 nm และ 150 nm ต่อมาได้สร้างชั้นอะลูมิเนียม (Al) บนลวดลายช่องเปิด SiO_2 สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลังให้กับเซลล์แสงอาทิตย์และผ่านกระบวนการอบความร้อนภายใต้อุณหภูมิ 577°C นาน 30 นาที เพื่อให้เกิดการแพร่ซึมของอะตอม Al ลงไปในแผ่นฐาน p-Si เป็นบริเวณร่องของ $\text{p}^+\text{-Si}$ เกิดเป็นสนามไฟฟ้าที่ผิวรอยต่อด้านหลังขึ้น (back surface field, BSF)

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาผลของการผลิตชั้นพาสซีเวชันของช่องเปิด SiO₂ ดังกล่าวทางโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนกำลังขยายสูง(field emission scanning electron microscope, FESEM) จากผลพบว่าบริเวณที่เกิดการผสมระหว่าง Al-Si ที่เกิดจากการแพร่ซึมของ Al ลงไปในคล็อกแผ่นฐาน p-Si มีความกว้างเฉลี่ย 101 μm และมีความลึกประมาณ 20 μm ที่บริเวณช่องเปิด SiO₂ อีกทั้งได้มีการศึกษาผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะด้วยเทคนิค quasi-steady-state photoconductance (QSSPC) ตัวอย่างเซลล์ที่มีชั้นพาสซีเวชัน SiO₂ ลวดลายเส้นตรงขนาดความกว้างเฉลี่ยเท่ากับ 150 μm ระยะห่างเท่ากับ 780 μm และขนาดความกว้างของ p⁺-Si เฉลี่ยเท่ากับ 101 μm นั้นมีค่าช่วงชีวิตของพาหะที่สูงที่สุดเท่ากับ 98.18 μs จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวไปคำนวณในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ PC1D ผลที่ได้พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีลวดลายชั้นพาสซีเวชันด้วยการสร้างลวดลายแบบฉุดให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเท่ากับ 14.64% ซึ่งสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่มีโครงสร้างชั้นพาสซีเวชันอยู่ 1.66%

NATTHAPHONG PHIWPHA : STUDY OF SOLAR CELL EFFICIENCY

FROM PASSIVATION LAYERS BY INKJET PRINTER. THESIS

ADVISOR : ASSOC. PROF. THIPWAN FANGSUWANNARAK, Ph.D.,

138 PP.

INKJET PRINTER/SILICON DIOXIDE/SURFACE PASSIVATION/SOLAR CELL

The small patterns of dielectric thin layers from silicon dioxide (SiO_2) or silicon nitride (Si_3N_4) to be performed between silicon substrate and metal back contacts of p-n junction silicon solar cells can create the built-in potential. This electrical behavior of the dielectric layer is called as “passivation layer” to result in a decrease of the carrier recombination rate due to the decreased carrier recombination velocity and the increased carrier life-time. These results can enhance the efficiency of energy conversion of solar cells. However, a complex procedure based on photolithography is the main limitation to be not commercially available in solar cell industry. In this work, a typical inject printer was adapted and developed for creating small SiO_2 patterns on Si substrates in order to produce the back surface passivation layer in solar cells. To inject directly the solvent of photoresist, this low-cost technique can reduce the complex procedure for fabrication of the patterned passivation layers and can be developed into the further commercial processes.


In the first section of this research, a developed inject printer was used to print the desired patterns on a flat base designed by computer drawing program. Furthermore, the study on fabrication of n-Si diffusion layer on p-Si substrate was investigated with using spin on dopant (SOD) technique in order to perform p/n Si junction. In addition, the synthesis of SiO_2 dielectric material by using the TEOS

solution base was studied and the SiO₂ films on p/n-Si samples were formed at the back of solar cells by a spin coating technique. In order to achieve the SiO₂ groove pattern, firstly, the printer injected acetone solvent on the photoresist which was coated on the SiO₂ films. Secondly, the opened SiO₂ grooves were removed by chemical etching from hydrofluoric acid (5% HF) within 25 seconds. Finally, the all photoresist was removed by its solvent. The narrowest groove width is about 150 μm with varying groove gaps at 190, 350, and 780 μm. The SiO₂ film thickness was obtained at 100 and 150 nm for the functional thin dielectric. Aluminum (Al) for back contacts was screened on the opened SiO₂ layer and then annealed at 577 °C for 30 minutes. Al atoms were diffused into the localized p-Si surface under the thermal annealing to form localized p⁺ Si grooves as same as back surface filed (BSF).

In this thesis, the experimental results of opened SiO₂ passivation layers were verified by a field emission scanning electron microscope (FESEM). It was found that the localized compound Al-Si region with the width size and the depth of 101 μm and 20 μm, respectively results from Al diffusion into p-Si substrate within the opened SiO₂ region. Moreover, life-time measurement of the generated carriers in the samples was studied by using a quasi-steady-state photoconductance (QSSPC) technique. The solar cell containing patterned SiO₂ passivation with the groove width, gap, and localized p⁺ width of 150 μm, 780 μm, and 101 μm, respectively provides the optimum life-time of 98.18 μm. PC1D simulation was used for calculations the energy conversion efficiency of solar cells. It was noticed that the solar cell containing the patterned SiO₂ passivation obtained the efficiency at 14.64% which was higher than the solar cell without any SiO₂ passivation by 1.66%.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature 

Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประเภท บัณฑิตศึกษา ประจำปี 2555 กลุ่มเรื่องการบริหารจัดการพลังงานและสร้างพลังงานทดแทนรหัส โครงการ ภค./2555-พท.20 ชื่อโครงการ การศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากการสร้าง ลวดลายชั้นพาสซีเวชันด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด และวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและ ช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินงานวิจัย รวมถึงหน่วยงานต่างๆ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ คำปรึกษา แนะนำ แนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการดำเนินงานวิจัย รวมถึงช่วย ตรวจสอบและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จสมบูรณ์ รวมทั้งเป็น กำลังใจในการดำเนินงานวิจัย และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลายๆ ด้านให้กับผู้วิจัย ตลอดมา

ดร.สุวัฒน์ โสภิตพันธ์ ผู้อำนวยการฝ่ายวิศวกรรมศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ คุณ นิธิ อรรถิ นักวิจัยประจำศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ดร.อนูรัตน์ วิเศษฐ์สรอรรด นักวิจัย ประจำห้องปฏิบัติการนาโนอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องกลจุลภาค ดร.ทวิวัฒน์ กระจ่างสังข์ นักวิจัย ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และ คอมพิวเตอร์แห่งชาติ ดร.รุ่งเรือง พัฒนากุล นักวิจัยประจำศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสง ซินโครตรอนแห่งชาติ ที่ให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ คุณอัญชุลี รักด่านกลาง พนักงานธุรการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวก ให้ความรู้ชี้แนะปัญหาต่าง ๆ ในการ ดำเนินงานให้ข้าพเจ้า

ท้ายนี้ขอขอบพระคุณพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ขอ กราบขอบพระคุณ คุณพ่อฤทธิชัย คุณแม่สำฤทธิ ผิวผา ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูให้การสนับสนุนด้าน การศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด รวมถึงคอยเป็นกำลังใจในยามที่ผู้วิจัยท้อ ทำให้มีความเข้มแข็งจน ประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมาและตลอดไป

ณัฐพงศ์ ผิวผา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฒ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.3.1 ทฤษฎีแถบพลังงาน.....	10
2.3.2 หลักการของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบรอยต่อพี-เอ็น.....	11
2.3.3 ช่วงเวลาชีวิตของพาหะ(Life time).....	20
2.3.4 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์จากอดีตถึงปัจจุบัน.....	26
2.3.5 การเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	31
2.4 สรุป.....	35
3 การศึกษาปรับปรุงเครื่องพิมพ์แบบฉีดสำหรับสร้างลวดลายชั้นพาสซีเวชัน.....	37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1	บทนำ.....	37
3.2	หลักการของเครื่องพิมพ์แบบฉีด	37
3.2.1	หลักการของเครื่องพิมพ์แบบฉีดชนิดทำงานต่อเนื่อง.....	37
3.2.2	หลักการของเครื่องพิมพ์แบบฉีดชนิดหยดตามคำสั่ง.....	38
3.3	การสร้างลวดลายช่องเปิดชั้นพาสซีวชั้นด้วยเทคนิคการใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีด	39
3.4	การออกแบบและปรับปรุงเครื่องพิมพ์แบบฉีดเพื่อใช้กับแผ่นฐานซิลิคอน	41
3.4.1	ส่วนประกอบทั้งหมดของเครื่องพิมพ์แบบฉีดที่นำมาใช้.....	41
3.4.2	ส่วนที่ออกแบบเพิ่มเติม.....	45
3.5	การสร้างลวดลายด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด	48
3.6	ผลที่ได้จากการสร้างลวดลายช่องเปิดด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด.....	48
3.6.1	การออกแบบลวดลายใช้ทดสอบกับเครื่องพิมพ์ที่ดัดแปลงขึ้น และวิเคราะห์ลวดลายช่องเปิดด้วยกล้องจุลทรรศน์	48
3.7	สรุป	54
4	ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อพี-เอ็น ที่มีลวดลายชั้นพาสซีวชั้น ด้วยเทคนิคการเตรียมด้วย Sol-gel.....	59
4.1	บทนำ.....	59
4.2	การสร้างรอยต่อพี-เอ็น ด้วยเทคนิค Spin-On Doping (SOD)	59
4.2.1	การเตรียมสารละลายตั้งต้นเพื่อเป็นฟิล์ม PSG แหล่งสารเจือฟอสฟอรัส ..	59
4.2.2	ขั้นตอนการผลิตฟิล์ม PSG เพื่อเป็นแหล่งสารเจือ สำหรับสร้างรอยต่อพี-เอ็น.....	62
4.2.3	การแพร่สารเจือด้วยความร้อนจากแหล่งสารเจือของฟิล์ม PSG.....	63
4.2.4	การวิเคราะห์ค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของรอยต่อชั้นเอ็น ที่ได้จากการแพร่.....	65
4.3	การคำนวณหาความหนาของชั้นเอ็น (x_n).....	72
4.4	การสร้างชั้นไดอิเล็กทริกซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยเทคนิค โซล-เจล	73
4.4.1	การเตรียมสารละลายตั้งต้นสำหรับสร้างฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์	73
4.5	การสร้างชั้นพาสซีวชั้นของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด.....	75

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5.1	การสร้างช่องเปิดสวดลายเส้นตรงบนชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์	75
4.5.2	ผลที่ได้จากการเปิดช่องสวดลายเส้นตรง บนชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์	77
4.6	การสร้างชั้นซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูง ด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนเฟส ระหว่างซิลิคอนกับอะลูมิเนียม	80
4.6.1	ขั้นตอนการสร้างชั้นซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูงในช่องเปิด ด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างซิลิคอนกับอะลูมิเนียม	81
4.6.2	การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างของพื้นที่ซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูง ในช่องเปิดซิลิคอนไดออกไซด์.....	82
4.6.3	การวิเคราะห์ค่าช่วงเวลาชีวิตของพาหะ(Carrier lifetime)	83
4.7	การวิเคราะห์การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จากพารามิเตอร์ที่ได้ จากการทดลองด้วยแบบจำลอง PC1D.....	91
4.8	สรุป	96
5	บทสรุปงานวิจัย และข้อเสนอแนะ	98
5.1	สรุปงานวิจัย	98
5.2	ข้อเสนอแนะ	99
	รายการอ้างอิง	101
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. การคำนวณความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลายตั้งต้น	104
	ภาคผนวก ข. การคำนวณความลึกของอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส	113
	ภาคผนวก ค. การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้สร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์.....	119
	ภาคผนวก ง. ผลการวัดค่าช่วงชีวิตพาหะที่ได้จากเครื่อง WCT-120 Sinton.....	123
	ภาคผนวก จ. สารไวแสง(Photoresist) และสารละลายอะซีโตน ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้.....	128
	ภาคผนวก ฉ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	132
	ประวัติผู้เขียน	138

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.2 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพาสซีเวชันด้านหลัง	29
2.3 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบต่าง ๆ ที่นำชั้นพาสซีเวชันที่ผิวด้านหลัง (LBSF) มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน	33
4.1 เงื่อนไขการ diffusion ที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H ₃ PO ₄ เท่ากับ 4:1 5:1 และ 6:1 ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 800°C – 1,000°C	64
4.2 เงื่อนไขการ diffusion ที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H ₃ PO ₄ เท่ากับ 4:1 อุณหภูมิ 1,000°C ในระยะเวลาระหว่าง 20-90 นาที.....	64
4.3 ผลการวัดความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้นเอ็นตามเงื่อนไขการแพร่สารเจือที่อัตราความเข้มข้นTEOS:H ₃ PO ₄ เท่ากับ 4:1 ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 800°C – 1,000°C เป็นเวลา 60 นาที	68
4.4 ผลการวัดความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้นเอ็นตามเงื่อนไขการแพร่สารเจือที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H ₃ PO ₄ เท่ากับ 5:1 ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 800°C – 1,000°C เป็นเวลา 60 นาที	69
4.5 ผลการวัดความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้นเอ็นตามเงื่อนไขการแพร่สารเจือที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H ₃ PO ₄ เท่ากับ 6:1 ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 800°C – 1,000°C เป็นเวลา 60 นาที	69
4.6 ผลการวัดความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้นเอ็นเงื่อนไขเวลาในการแพร่สารเจือที่ต่างกัน โดยที่ อัตราความเข้มข้น TEOS:H ₃ PO ₄ เท่ากับ 4:1 ภายใต้อุณหภูมิ 1,000°C	70
4.7 ความหนาแน่นอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสที่อัตราความเข้มข้นของ TEOS:H ₃ PO ₄ ต่าง ๆ	72
4.8 ผลการคำนวณความหนาของชั้นเอ็นตามเงื่อนไขการแพร่สารเจือที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H ₃ PO ₄ เท่ากับ 4:1 5:1 และ 6:1 ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 800°C – 1,000°C เป็นเวลา 60 นาที	72

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 ผลการคำนวณความหนาของชั้นเอ็นตามเงื่อนไขเวลาในการแพร่สารเจือที่ต่างกัน โดยใช้อัตราความเข้มข้น TEOS:H ₃ PO ₄ เท่ากับ 4:1 ภายใต้อุณหภูมิ 1,000°C	73
4.10 เงื่อนไขการทดลองและผลของความหนาจากการวัดด้วยกล้อง optical profiler.....	75
4.11 อัตราส่วนของพื้นที่ช่องเปิดและพื้นที่ส่วนที่ไม่เปิดของบนตัวอย่างขนาด 1 cm ²	77
4.12 เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อพี-เอ็นในเงื่อนไขที่มีความหนาและระยะห่างของช่องเปิด ที่ต่างกันเปรียบเทียบ โครงสร้างที่ไม่มีการเปิดช่องชั้นพาสซีเวชัน	86
4.13 ค่าช่วงชีวิตและอัตราความเร็วของการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิวของชั้นงาน ในเงื่อนไข โครงสร้างพาสซีเวชันที่แตกต่างกัน	89
4.14 พารามิเตอร์ที่สำคัญของแบบจำลอง PC1D เพื่อนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพ การแปลงพลังงานในเซลล์แสงอาทิตย์.....	92
4.15 ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 100 cm ² โครงสร้างต่าง ๆ จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง PC1D.....	94



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุ (a) ฉนวน (b) สารกึ่งตัวนำ และ (c) ตัวนำ.....11
2.2	ไดอะแกรมแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อพี-เอ็นในสภาวะมืด..... 13
2.3	ไดอะแกรมแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นที่อยู่ในสภาวะได้รับแสงตกกระทบที่ผิว..... 15
2.4	กราฟฟังก์ชันการกักเก็บของประจุตัวพาในสภาวะได้รับแสงตกกระทบที่ผิว.....17
2.5	(ก) ภาพจำลองเซลล์อาทิตย์ขณะมีแสงตกกระทบ..... 18
2.5	(ข) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ขณะมีแสงตกกระทบ..... 18
2.5	(ค) กราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันไฟฟ้าขณะมีแสงตกกระทบ..... 18
2.6	วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงพารามิเตอร์ตัวต้านทาน.....20
2.7	กลไกการรวมตัวกลับของพาหะในรูปแบบต่าง ๆ.....21
2.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นการเติมสารเจือกับเวลาช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อย...24
2.9	โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อพี-เอ็นที่มีสนามไฟฟ้าที่ผิวด้านหลัง..... 25
2.10	เซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้พัฒนาขึ้นมาในปี ค.ศ. 1960..... 26
2.11	เซลล์แสงอาทิตย์ที่เรียกว่า “violet”.....26
2.12	เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเพิ่มรูปทรงพีระมิดที่ผิวด้านรับแสงของเซลล์..... 27
2.13	เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERC..... 28
2.14	เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERL..... 29
2.15	เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างอลูมิเนียม-สนามไฟฟ้าด้านหลัง (AI-BSF)..... 30
2.16	โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพาสซีเวชันที่ผิวด้านหลัง (LBSF).....31
2.17	ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ระยะห่าง (Aperture ratio) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์..... 35
3.1	การทำงานของพิมพ์ชนิดหัวฉีดแบบทำงานต่อเนื่อง..... 38
3.2	การทำงานของพิมพ์แบบหยดตามคำสั่งระบบการฉีดเชิงความร้อน..... 39
3.3	การทำงานของพิมพ์ระบบการฉีดชนิดเปียโซอิเล็กทริก.....39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.4	แผนภาพเปรียบเทียบกระบวนการสร้างลวดลายด้วยเทคนิคโฟโตลิโทกราฟี กับเทคนิคการกัดด้วยเครื่องพิมพ์.....	40
3.5	โครงยึดและเลื่อนหัวหมึกพิมพ์.....	42
3.6	แผนผังจรรยาบรรณการทำงานทุกส่วนของเครื่องพิมพ์แบบฉีด.....	42
3.7	ตลับหมึกพิมพ์.....	43
3.8	ชุดกลไกการเริ่มทำงาน.....	44
3.9	แกนขับเคลื่อนชุดกลไกเริ่มทำงาน.....	44
3.10	ชุดขับเคลื่อนก่อนการพิมพ์.....	45
3.11	ฐานรองอุปกรณ์.....	46
3.12	ฐานรองชิ้นงาน.....	46
3.13	รางเลื่อนฐานรองชิ้นงาน.....	47
3.14	การออกแบบตัดแปลงเครื่องพิมพ์แบบฉีดในงานวิจัยนี้.....	47
3.15	เครื่องพิมพ์แบบฉีดที่ตัดแปลงสำเร็จแล้ว.....	48
3.16	กระบวนการทำความสะอาดด้วยหลักการ RCA.....	49
3.17	กระบวนการสร้างลวดลายช่องเปิดด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด.....	50
3.18	การออกแบบลวดลายเส้นตรงสำหรับทดสอบกับเครื่องพิมพ์แบบฉีด.....	51
3.19	ผลการกัดอะซีโตนบนแผ่นฐานที่ผ่านการเตรียมโดยการฉีดซ้ำ 1 ครั้ง.....	51
3.20	ผลการกัดอะซีโตนบนแผ่นฐานที่ผ่านการเตรียมโดยการฉีดซ้ำ 2 ครั้ง.....	52
3.21	ผลการกัดอะซีโตนบนแผ่นฐานที่ผ่านการเตรียมโดยการฉีดซ้ำ 3 ครั้ง.....	52
3.22	ผลการกัดอะซีโตนบนแผ่นฐานที่ผ่านการเตรียมโดยการฉีดซ้ำ 4 ครั้ง.....	53
3.23	ผลการกัดอะซีโตนบนแผ่นฐานที่ผ่านการเตรียมโดยการฉีดซ้ำ 5 ครั้ง.....	53
3.24	ผลการกัดอะซีโตนบนแผ่นฐานที่ผ่านการเตรียมโดยการฉีดซ้ำ 6 ครั้ง.....	54
3.25	ผลการกัดอะซีโตนบนแผ่นฐานที่ผ่านการเตรียมโดยการฉีดซ้ำ 8 ครั้ง.....	54
3.26	ผลการกัดอะซีโตนบนแผ่นฐานที่ผ่านการเตรียมโดยการฉีดซ้ำ 10 ครั้ง.....	55
3.27	(ก) แบบลวดลายช่องเปิดเปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ ระยะห่างของช่องเปิด $500 \mu\text{m}$ สำหรับทดสอบกับเครื่องพิมพ์แบบฉีด.....	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.27 (ข) ผลการสร้างลวดลายช่องเปิดด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีดสีเหลี่ยมจัตุรัสขนาด $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ ระยะห่างของช่องเปิด $500 \mu\text{m}$	56
3.28 (ก) แบบลวดลายช่องเปิดเปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ ระยะห่างของช่องเปิด $500 \mu\text{m}$ สำหรับทดสอบกับเครื่องพิมพ์แบบฉีด	57
3.28 (ข) ผลการสร้างลวดลายช่องเปิดด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีดสีเหลี่ยมจัตุรัสขนาด $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ ระยะห่างของช่องเปิด $500 \mu\text{m}$	57
3.29 (ก) แบบลวดลายช่องเปิดเปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ระยะห่างของช่องเปิด $1,000 \mu\text{m}$ สำหรับทดสอบกับเครื่องพิมพ์แบบฉีด	57
3.29 (ข) ผลการสร้างลวดลายช่องเปิดด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีดสีเหลี่ยมจัตุรัสขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ระยะห่างของช่องเปิด $1,000 \mu\text{m}$	57
3.30 ความสัมพันธ์ของขนาดของช่องเปิดต่อการนิตสารละลายอะซีโตนซ้ำ	58
3.31 (ก) ผลการการเปิดช่องชั้นสารไวแสงสารด้วยการนิตสารละลายอะซีโตน จากการวัดด้วยกล้อง optical profile	59
3.31 (ข) ข้อมูลตำแหน่งภาพของเส้นแนวตั้งจากการวัดด้วยกล้อง optical profile	59
4.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลาย SOD สำหรับเป็นสารตั้งต้น เพื่อผลิตฟิล์ม PSG	61
4.2 (ก) การตวงสารละลาย TEOS:H ₂ O:C ₂ H ₅ O	62
4.2 (ข) กวนผสมที่อุณหภูมิ 70°C	62
4.2 (ค) หยด H ₃ PO ₄ ลงไปตามปริมาณที่กำหนด	62
4.2 (ง) กวนผสมที่อุณหภูมิห้อง นาน 60 นาที	62
4.3 (ก) นำชิ้นงานเข้าไปในแท่นสปินเนอร์	63
4.3 (ข) หยดสารละลายที่เตรียมและเริ่มการทำงานเครื่องสปินเนอร์	63
4.3 (ค) เครื่องสปินเนอร์ในขณะที่กำลังเคลือบสารละลายบนชิ้นงาน	63
4.3 (ง) เตาอบใช้ไล่ความชื้น (prebaking) ที่อุณหภูมิ 200°C นาน 15 นาที	63
4.4 (ก) นำชิ้นงานเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูงที่มีบรรยากาศไนโตรเจน	65
4.4 (ข) เป่าแห้งชิ้นงานด้วยไนโตรเจนบริสุทธิ์	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5	ภาพจำลองการวัดความต้านทานแบบสี่หัวเข็ม (4-point probe)66
4.6	ภาพตัดขวาง โครงสร้างของชั้นสารกึ่งตัวนำ ชั้นบางๆ ที่อยู่บนแผ่นผลึกฐานรอง67
4.7	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานแบบสี่หัวเข็ม (4-point probe)68
4.8	ผลการวัดความต้านทานแผ่นของชั้นเอ็นที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H ₃ PO ₄ เท่ากับ 4:1 5:1 และ 6:1 ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 800°C – 1,000°C71
4.9	ผลการวัดความต้านทานแผ่นของชั้นเอ็นที่เวลาในการแพร่สารเจือต่างกัน71
4.10	แผนภาพขั้นตอนการเตรียมสารละลาย SiO ₂ Solution74
4.11	ผลการวัดความหนาฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยกล้อง optical profiler75
4.12	แบบเส้นตรงที่ใช้ในงานวิจัยนี้76
4.13	กระบวนการสร้างลวดลายชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นชั้นพาสซีเวชัน77
4.14	(ก) ผลการเปิดช่องจากการออกแบบลวดลายเส้นตรงขนาด 100 μm ระยะห่าง 200 μm ก่อนสกัดฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ออก78
4.14	(ข) ผลการเปิดช่องจากการออกแบบลวดลายเส้นตรงขนาด 100 μm ระยะห่าง 200 μm หลังสกัดฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์และกำจัดสารไวแสงออก78
4.15	(ก) ผลการเปิดช่องจากการออกแบบลวดลายเส้นตรงขนาด 100 μm ระยะห่าง 500 μm ก่อนสกัดฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ออก78
4.15	(ข) ผลการเปิดช่องจากการออกแบบลวดลายเส้นตรงขนาด 100 μm ระยะห่าง 500 μm หลังสกัดฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์และกำจัดสารไวแสงออก78
4.16	(ก) ผลการเปิดช่องจากการออกแบบลวดลายเส้นตรงขนาด 100 μm ระยะห่าง 1,000 μm ก่อนสกัดฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ออก79
4.16	(ข) ผลการเปิดช่องจากการออกแบบลวดลายเส้นตรงขนาด 100 μm ระยะห่าง 1,000 μm หลังสกัดฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์และกำจัดสารไวแสงออก79
4.17	แผนภาพเฟสไออะแกรมของ Al-Si81
4.18	การสร้างชั้นซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูงด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนเฟส ระหว่างซิลิคอนกับอะลูมิเนียม82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ภาพตัดขวางจาก FE-SEM ของชั้นฟิล์ม Al/SiO ₂ /Si ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิ การแอนนีส 577°C นาน 30 นาที.....	83
4.20 แผนผังของระบบการทำงานอย่างง่ายของเครื่อง Photoconductance Lifetime Tester รุ่น WCT-120	84
4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพาหะส่วนเกินกับอัตราความเร็ว ในการรวมตัวใหม่ของพาหะ โครงสร้างแบบต่าง ๆ	90
4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพาหะส่วนเกินกับอัตราความเร็ว ในการรวมตัวใหม่ของพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น ในเงื่อนไขที่มีชั้นพาสซีเวชันกับระยะห่างช่องเปิดค่าต่าง ๆ.....	91
4.23 หน้าต่างการทำงานของ โปรแกรมแบบจำลอง PC1D	93
4.24 หน้าต่างผลที่ได้การทำงานของ โปรแกรมแบบจำลอง PC1D ของตัวอย่าง S ₃	94
4.25 คุณลักษณะ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลอง PC1D เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ทำชั้นพาสซีเวชัน S ₆ กับชิ้นงาน โครงสร้าง S ₁ S ₂ และ S ₃	95
4.26 ผลของการเปิดช่องไดโอดเล็กทริกสำหรับชั้นพาสซีเวชันด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ ตัวอย่าง S ₄ S ₅ S ₆ S ₇ S ₈ และ S ₉ ที่มีต่อค่า I _{sc} และ V _{oc}	96
5.1 ภาพขยายของหัวพิมพ์แบบฉีดด้วยกล้องจุลทรรศน์	101

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่
D_n	=	ค่าคงที่การแพร่ของอิเล็กตรอน
D_p	=	ค่าคงที่การแพร่ของโฮล
e	=	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
E_C	=	แถบพลังงานความนำ
E_V	=	แถบพลังงานวาเลนซ์
E_F	=	แถบพลังงานเฟอร์มิ
E_{Fn}	=	แถบพลังงานเฟอร์มิของอิเล็กตรอน
E_{Fp}	=	แถบพลังงานเฟอร์มิของโฮล
E_g	=	ช่องว่างพลังงาน
E_i	=	ช่องว่างพลังงานของสารบริสุทธิ์
FF	=	ฟิลแฟกเตอร์
F_m	=	ระดับพลังงานเฟอร์มิ
F_{ph}	=	ความหนาแน่นฟลักโฟตอน
h	=	ความหนาแน่นของโฮล
G	=	อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล
I	=	กระแสไฟฟ้า
I_0	=	กระแสไฟฟ้า
I_{sc}	=	กระแสลัดวงจร
J	=	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
J_0	=	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
J_n, J_h	=	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
$J_{n,Diff}, J_{p,Diff}$	=	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
$J_{n,Drift}, J_{p,Drift}$	=	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
J_{sc}	=	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจร
L_e, L_h	=	ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน (โฮล)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

MIS	=	โลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ
N	=	ดัชนีการหักเหแสง
N_i	=	ความหนาแน่นของพาหะบริสุทธิ์
N_A	=	อะตอมสารเจือผู้ให้
N_D	=	อะตอมสารเจือผู้รับ
P	=	ความเข้มข้นของโฮล
p-n junction	=	รอยต่อพี-เอ็น
q	=	ประจุไฟฟ้า
R	=	ความต้านทานไฟฟ้า
R_s	=	ความต้านทานอนุกรม
R_{sh}	=	ความต้านทานขนาน
S	=	การรวมตัวของพาหะ
SiO_2	=	การรวมตัวของพาหะ
S_{eff}	=	การรวมตัวของพาหะที่ผิวด้านหลัง
t	=	เวลา
T	=	อุณหภูมิ
V	=	แรงดันไฟฟ้า
V_{oc}	=	แรงดันเปิดวงจร
\mathcal{E}	=	สนามไฟฟ้า
\mathcal{E}_{max}	=	สนามไฟฟ้าสูงสุด
η	=	ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน
Al	=	อลูมิเนียม
AM 1.5	=	Air mass 1.5
BSF	=	สนามไฟฟ้าด้านหลังที่ผิว
DI water	=	น้ำกลั่นบริสุทธิ์
FE-SEM	=	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน
HCl	=	กรดไฮโดรคลอริก
HF	=	กรดไฮโดรฟลูออริก

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

H ₂ O ₂	=	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
IPA	=	ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์
NH ₄	=	แอมโมเนีย
N ₂	=	ก๊าซไนโตรเจน
O ₂	=	ก๊าซออกซิเจน
P ⁺ -Si	=	ซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูง
PERC	=	Passivated emitter and rear cell
PERL	=	Passivated emitter rear locally diffused
PERT	=	Passivated emitter rear totally-diffused
PESC	=	Passivated emitter solar cell
PR	=	สารไวแสง
PV	=	โฟโตโวลต์เทอิก
RCA	=	Radio Corporation of America



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในช่วง 2 ศตวรรษที่ผ่านมาเศรษฐกิจของโลกเจริญก้าวหน้า มนุษย์มีการใช้พลังงานเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่กลับมีเชื้อเพลิงอย่างจำกัดโดยมีแหล่งพลังงานหลักคือ น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งพลังงานเหล่านี้มาจากซากฟอสซิลที่เกิดการทับถมโดยใช้เวลานานกว่าจะเกิดเป็นฟอสซิล แต่เชื้อเพลิงชนิดนี้มีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงอย่างรวดเร็ว อีกทั้งพลังงานเหล่านี้ยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมได้ เนื่องจากกระบวนการสันดาปของเชื้อเพลิงเหล่านี้จะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเหตุให้เกิดภาวะโลกร้อนที่เรียกว่า ภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) พลังงานทางเลือกเช่น พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดปราศจากมลพิษ จึงควรนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดเพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากน้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ดังนั้นจึงมีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับพลังงานทดแทนกันมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่จะให้ความสนใจในวัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอน เนื่องจากเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีมากบนพื้นโลกและมีราคาถูกสามารถผลิตได้จากแร่ควอตซ์หรือทราย ผ่านขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ตลอดจนการทำให้เป็นผลึก ในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ได้พัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยแบ่งตามลักษณะ รุ่นการผลิต (Generation) ได้ 3 รุ่น คือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกจัดเป็นรุ่นแรก (first generation) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนอสัญฐานจัดเป็นรุ่นที่สอง (second generation) และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางนาโนซิลิคอนจัดเป็นรุ่นที่สาม (third generation) ในรุ่นที่สามนี้ยังมีการวิจัยในห้องปฏิบัติการอยู่ (Green, 2000)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้สร้างขึ้นมาเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดยแชปปีน ฟลูเลอร์ และเพียสัน แห่งบริษัทเบลล์เทเลโฟน (Bell Telephone) โดยทั้ง 3 ท่านนี้ได้ค้นพบเทคโนโลยีการสร้างรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction) ของสารกึ่งตัวนำแบบใหม่จากการแพร่สารเจือเข้าไปในผลึกของซิลิคอน จนได้เซลล์แสงอาทิตย์ชิ้นแรกของโลก ซึ่งมี

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเพียง 6% นับจากนั้นมาได้มีการพัฒนาโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบต่าง ๆ ขึ้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงขึ้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันได้มุ่งเน้นและให้ความสำคัญกับการศึกษาปัญหาข้อจำกัดของเซลล์แสงอาทิตย์ รวมถึงเทคนิคและวิธีการที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีกระบวนการผลิตในเชิงพาณิชย์ได้ เทคนิคลดการสูญเสียเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่เซลล์มีหลักการ 2 ส่วนใหญ่คือ

1) การสร้างชั้นพาสซีเวชันที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ (Surface passivation) โดยการเติมสารเจือชนิดเข้มข้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำกับซิลิโคน เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าที่ผิวสัมผัส เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ผิวดังกล่าวจะช่วยให้อิเล็กตรอนอิสระบางส่วนที่เคยสูญเสียจากการรวมตัวที่ผิวสัมผัสข้ามรอยต่อพี-เอ็น และเก็บสะสมพาหะที่ซิลิโคนให้เซลล์แสงอาทิตย์มีปริมาณกระแสลัดวงจรที่สูงขึ้น อีกทั้งยังมีส่วนช่วยให้แรงดันเปิดวงจรสูงขึ้น จึงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โครงสร้างของชั้นพาสซีเวชันที่มีการศึกษาในปัจจุบันมีการเลือกบริเวณให้เกิดพาสซีเวชัน (Selective passivation area) ซึ่งใช้เทคนิคการเปิดช่องด้วยวิธีโฟโตลิโทกราฟี

2) การฝังรอยสัมผัสซิลิโคน (buried contact) ด้านบนเพื่อเพิ่มพื้นที่รอยสัมผัสระหว่างเซลล์กับซิลิโคนและลดขนาดเส้นซิลิโคนด้านบนทำให้พื้นที่รับแสงมากขึ้นผลคือลดการสูญเสียที่เกิดจากเงาของเส้นกริดกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างนี้มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงกว่าเซลล์ที่สร้างกริดด้วยเทคนิคการสกรีน

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาวิจัยการใช้งานเครื่องพิมพ์แบบฉีดในการเปิดช่องชั้นสารกึ่งตัวนำและกระบวนการสร้างลวดลายของชั้นสารกึ่งตัวนำ เพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างลวดลายชั้นพาสซีเวชันของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีเป้าหมายเพื่อเป็นเทคนิคทางเลือกที่มีต้นทุนต่ำ กระบวนการไม่ซับซ้อนเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคโฟโตลิโทกราฟี

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของลวดลายที่ได้จากการประยุกต์ใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีด
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติการเปิดช่องของชั้นไดอิเล็กทริกในโครงสร้างพาสซีเวชันด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน
3. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการเปิดช่องชั้นไดอิเล็กทริกในโครงสร้างพาสซีเวชันด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. สร้างลวดลายชั้นไดออกไซด์ทริกด้วยวิธีการกัดภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม
2. สร้างชั้นพาสซีเวชันให้มีคุณสมบัติที่ดีของเซลล์แสงอาทิตย์และสร้างขั้วโลหะ
3. สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพาสซีเวชันด้วยวิธีการกัด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้องค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ และแนวทางการพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์
2. ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน ด้วยเทคนิคที่ประยุกต์ใช้เครื่องพิมพ์ชนิดจิจิต เพื่อเป็นแนวทางนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ในอุตสาหกรรมการผลิต
3. บทความวิจัย เผยแพร่ระดับชาติ หรือนานาชาติ

1.5 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 5 บท ได้แก่

บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ ขอบเขตงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงการปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างและหลักการของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น การสร้างชั้นพาสซีเวชันและหลักการเกิดสนามไฟฟ้าภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ช่วงเวลาชีวิตของพาหะที่ผลิตได้จากแสงและความเร็วการรวมตัวที่ผิวของพาหะเหล่านั้น อีกทั้งยังได้กล่าวถึงแนวความคิดนำเครื่องพิมพ์แบบจิจิตมาประยุกต์ใช้ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์และเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 3 กล่าวถึงการนำเครื่องพิมพ์แบบจิจิตมาประยุกต์ใช้ในงานทางอิเล็กทรอนิกส์และเซลล์แสงอาทิตย์ การออกแบบโครงสร้างของเครื่องพิมพ์แบบจิจิตเพื่อประยุกต์ใช้ในการเปิดช่องชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ กระบวนการสร้างลวดด้วยเครื่องพิมพ์แบบจิจิต

บทที่ 4 กล่าวถึงสร้างรอยต่อพี-เอ็นด้วยเทคนิคการเตรียมสารเจือแบบของเหลวแล้วเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงบนแผ่นฐานซิลิคอนด้วยเครื่องเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (spin coating) การวิเคราะห์ทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นที่สร้างขึ้น การสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นลวดลายชั้นพาสซีเวชันด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคการเตรียมด้วย Sol-gel การสร้างชั้นซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูง ด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างซิลิคอนกับอะลูมิเนียม การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างชั้นซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูง การวิเคราะห์ค่าช่วงชีวิตพาหะด้วยเครื่องวัดการ

เล่มของการนำแสง และการวิเคราะห์การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จากพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองด้วยแบบจำลอง PC1D

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ การเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์และเทคนิคที่มีต้นทุนต่ำ ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาการสร้างชั้นพาสซีเวชันที่มีชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) อยู่ระหว่างแผ่นฐานซิลิคอนกับโลหะอะลูมิเนียมและทำการเปิดช่องชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บาง ๆ นี้ เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าที่ผิวช่องเปิดดังกล่าว โดยใช้เทคนิคการกัดตัวทำละลายด้วยเครื่องมือแบบกัดลงบนฟิล์มบางสารไวแสง (Photoresist) ทำให้เกิดช่องเปิดตามขนาดที่ต้องการด้วยเครื่องมือแบบกัด ในงานวิจัยนี้ได้ทำการคัดแปลงเครื่องมือให้เหมาะสมกับแผ่นฐานซิลิคอน โดยมีจุดประสงค์เพื่อสร้างช่องเปิดขนาดเล็กโดยไม่อาศัยเทคโนโลยีการสร้างลวดลายด้วยแสง (photolithography) บนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนให้ได้ลวดลายตามต้องการ เพื่อเป็นการลดต้นทุนและการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ได้ อีกทั้งการศึกษานี้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญเพื่อนำไปสู่การพัฒนาให้ได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงขึ้น ดังนั้นในลำดับแรกจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องดำเนินการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย แนวคิดที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากนักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่สะสมรายงานและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อันได้แก่ฐานข้อมูลจาก IEEE Applied Physics Letters และ Science Direct เป็นต้น การสำรวจสืบค้นงานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางที่สำคัญสำหรับการประยุกต์ และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากเรื่องการสร้างชั้นพาสซีเวชันของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนและการใช้งานเครื่องมือแบบกัดในการเปิดช่องชั้นสารกึ่งตัวนำและกระบวนการสร้างลวดลายของชั้นสารกึ่งตัวนำ เพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างชั้นพาสซีเวชันของเซลล์แสงอาทิตย์ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันสามารถสรุปย่อเป็นตารางได้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งสามารถจัดลำดับการเรียบเรียงผลงานที่มีผู้ได้ดำเนินการก่อนไปสู่งานที่ใหม่กว่าได้ดังนี้

ในปี ค.ศ. 1988 ได้มีการสร้างเครื่องพิมพ์ลวดลายโลหะด้านรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (grid pattern) ประยุกต์ใช้หัวพิมพ์ Siemens Pt80j จำนวน 12 หัวฉีดแต่ละหัวฉีดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตรระบบเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric) และควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ โดยการฉีดสารละลาย Metallo-organic decomposition (MOD) (Teng & Wu, 1989)

ต่อมาในปี ค.ศ. 1998 ได้มีการประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงชนิดออร์แกนิก (organic) โดยใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีด (inkjet printer) ฉีดสารละลายพอลิเมอร์ (doped polymer) ในรูปแบบลายอักษรที่ต้องการ (Hebner, Wu, Marcy, Lu, & Sturm, 1998)

ในปี ค.ศ. 2002 ได้มีการนำระบบการฉีดเพื่อสร้างลวดลายบนผิวฟิล์มแบบต่างๆ โดยวัตถุประสงค์เพื่อเป็นโลหะนำไฟฟ้าของฟิล์มดังกล่าว (Teranishi, Fujiwara, Watanabe, & Yoshimura, 2002)

ในปี ค.ศ. 2007 ได้มีการใช้เทคนิคการสร้างชั้นงานระดับไมครอนสำหรับงานทางด้านชีววิทยาระดับโมเลกุลและตามแบบขนาดเล็กโดยใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีดใช้สารละลายฟอสโฟลิพิดสร้างฟิล์มด้วยการฉีดโดยฉีดสารที่ระยะแยกซัด $50\ \mu\text{m}$ ลงบนแผ่นฐานและฉีดสาร Alkanethiolate ลงบนแผ่นฐานซีดีเคลือบทองและกัดลวดลายด้วยสารเคมี จะได้เซนเซอร์ทางเคมีที่สร้างด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด (Cho, Parameswaran, & Yu, 2007) และมีการใช้เทคนิคการสร้างโครงสร้าง via-hole บนแผ่นฐานที่เคลือบด้วยฉนวนโดยใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีดเป็นวิธีที่ค้นพบสำหรับการประยุกต์ใช้กับจอแสดงผลแบบเรียบแบน (flat-panel display) ซึ่งโครงสร้างจะเป็นไดโอดเปล่งแสงแบบพอลิเมอร์เรียงต่อกันโดยใช้เครื่องพิมพ์ฉีดสารละลายลงบนแผ่นฐาน ผลที่ได้อยู่ในขั้นที่ตีซึ่งนำมาทดแทนเทคนิคโฟโตลิโทกราฟีได้ (Xia & Friend, 2007)

ในปี ค.ศ. 2008 ได้ทำการเปิดช่องชั้นสารกึ่งตัวนำโดยใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีดลงบนแผ่นฐานซิลิคอนที่เคลือบสารไวแสงที่เป็นพอลิเมอร์สร้างช่องเปิด ด้วยการฉีดสารทำละลายสารไวแสงอะซิโตนลงบนสารไวแสงโฟโตลิซิส จะเกิดลวดลายบนชั้นสารไวแสงใช้สารเคมีสกัดลวดลายในชั้นไดอิเล็กทริก จากนั้นนำมาสร้างรอยต่อโลหะของเซลล์แสงอาทิตย์ (Lennon et al., 2008) และได้มีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบออร์แกนิกโดยใช้เทคนิคการใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีดซึ่งสร้างขึ้นมาจากการประกอบมาใช้กับกระจกนำไฟฟ้า (ITO) ใช้การฉีดสารเจือผู้รับ (Acceptor atom) ที่ใช้ได้มาจากการผสมกันระหว่างกรด C61-butyric กับ 3-ethylthiophene ester และสารเจือผู้ให้ (Donor atom) ใช้ poly(3-octylthiophene-2,5-diy) ซึ่งใช้สารเจือผู้ให้และสารเจือผู้รับด้วยอัตราส่วน 1:1 และ 2:1 โดยน้ำหนักสารที่ใช้นี้นำมาพิมพ์ลงบนกระจกนำไฟฟ้าซึ่งใช้เป็นแผ่นฐาน จากนั้นนำไปวัดคุณสมบัติของกระแสและแรงดันทางไฟฟ้าในสภาวะมืดและภายใต้แสงที่ความเข้ม $75\ \text{W/m}^2$ เพื่อพิจารณาหาค่าเหมาะสมต่อคุณสมบัติการเรียงกระแส (rectifier) ในสภาวะมืด เทคนิค

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นี้ประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของสารเจือผู้ให้และสารเจือผู้รับที่ใช่ (Shafiee, Salleh, & Yahaya, 2008)

ในปี ค.ศ. 2009 ได้มีการเปิดช่องชั้นสารกึ่งตัวนำโดยใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีดบนชั้นฟิล์ม SiO_2 และ SiN_x ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กทริก ทำการออกแบบสร้างหลุมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40-50 μm และร่องที่เป็นเส้นตรงขนาดกว้าง 50-60 μm ความลึกของการกัดอยู่ที่ 300 nm สำหรับซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และ 75 nm สำหรับซิลิคอนไนไตรด์ (SiN_x) ทำให้เกิดลวดลายของชั้นไดอิเล็กทริกและสร้างรอยต่อโลหะเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน (Lennon, Ho-Baillie, & Wenham, 2009) และมีการสร้างไอซีด้วยการประยุกต์ใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีดกับสารละลายเงิน (silver) โดยใช้แผ่นฐานที่เคลือบพอลิเมอร์ซึ่งจะใช้กับอุณหภูมิสูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับไดโอด เซลล์แสงอาทิตย์จอแสดงผลแบบเรียบ (flat panel display) และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ซึ่งช่วยให้ง่ายต่อการใช้งานและลดต้นทุนการผลิตได้ (Wang, Wu, Yang, Li, & Noh, 2009)

ในปี ค.ศ. 2010 ได้มีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงโดยใช้สาร poly(3-hexylthiophene,P3HT) และ (3-methoxycarbonyl)-propyl-1-phenyl-(66),c61(PCBM) ด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีดทุกกระบวนการในการสร้างชั้นฟิล์มของเซลล์แสงอาทิตย์ (Eom et al., 2010) และใช้โครงสร้างจากตัวทำละลายโดยใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีด สร้างลวดลายสารทำละลายบนเซลล์แสงอาทิตย์แบบพอลิเมอร์ 3-hexylthiophene และ 1-(3-methoxycarbonyl)-propyl-1-phenyl-(66),c61(PCBM) โดยที่หัวพิมพ์แบบฉีดใช้เทคนิคการทำให้จุดเดือดสูงแล้วดันสารออกมา นำมาใช้กับสารจำพวกเบนซีน (Chlorobenzene ,Trichlorobenzene) ซึ่งเป็นสารทำละลายในกระบวนการสร้างชั้นต่าง ๆ (Lange et al., 2010)

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1989	(Teng & Wu, 1989)	สร้างเครื่องพิมพ์แบบฉีด จำนวน 12 หัวฉีด แต่ละหัวฉีดมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 mm ควบคุมด้วยระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ ใช้ฉีดสารละลายชนิดผสมออร์แกนิก (metallo-organic) เพื่อเป็นขั้วโลหะให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์
1998	(Hebner et al., 1998)	ประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงชนิดออร์แกนิก โดยใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีด สร้างลวดลายด้วยที่เติมสารเจือในรูปแบบลายอักษรที่ต้องการ

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2002	(Teranishi et al., 2002)	ใช้สาร PbS(lead sulfide) และ CdS(cadmium sulfide) บนแผ่นฐาน Organic ใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีด สร้างลวดลายโดยตรง เทคนิคการสร้างด้วยการหยดหมึกโดยตรงบนแผ่นฐานนี้ใช้งานที่อุณหภูมิห้องได้โดยใช้เทคนิคไม่มีรอยต่อโลหะ (noncontact) ในการสร้างหอคลายโดยตรงผ่านอากาศลงสู่แผ่นฐาน ทั้งสองวิธีการสามารถสร้างแบบฟิล์มที่เป็นวัสดุแข็งได้ ตลอดจนการสร้างฟิล์มที่อุณหภูมิห้อง และการปรับปรุงด้วยความร้อนผลที่ได้คือลวดลายแบบฟิล์มที่มีความกว้างอยู่ที่ 100 μm และยังสามารถใช้ร่วมกับแผ่นฐานที่เป็นผลึก
2007	(Cho et al., 2007)	ใช้เทคนิคการสร้างชิ้นงานขนาดเล็กระดับไมครอนสำหรับงานทางด้านชีววิทยาระดับโมเลกุลและตามแบบขนาดเล็ก โดยใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีด ซึ่งมีการสร้างฟอสโฟลิฟิฟิล์มโดยการฉีดสารที่ระเหยแยกใช้เทคนิคการสร้างชิ้นงานระดับไมครอนสำหรับงานทางด้านชีววิทยาระดับโมเลกุลและตามแบบขนาดเล็ก โดยการฉีดสารที่มีระยะแยกชัดเจน 50 μm ลงบนแผ่นฐานและฉีดสาร Alkanethiolate ลงบนแผ่นฐานซิติทอกและสกัดลวดลายด้วยสารเคมีได้
2007	(Xia & Friend, 2007)	ใช้เทคนิคการสร้างโครงสร้าง via-hole บนแผ่นฐานที่เคลือบด้วยฉนวน โดยใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีด (Inkjet printing) เป็นวิธีที่ค้นพบสำหรับการประยุกต์ใช้กับจอแสดงผลแบบเรียบ (flat-panel display) โดยที่โครงสร้างจะเป็นไดโอดเปล่งแสงแบบพอลิเมอร์เรียงต่อกันโดยใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีดพิมพ์ลวดลายลงบนแผ่นฐาน ผลที่ได้อยู่ในขั้นที่ดี ซึ่งนำมาทดแทนเทคนิคโฟโตลิโทกราฟีได้
2008	(Shafiee et al., 2008)	สร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบออร์แกนิกโดยใช้เทคนิคเครื่องพิมพ์แบบฉีด (Inkjet printing) ซึ่งสร้างขึ้นจากการประกอบกันของกระจกไอทีโอ อยู่ด้านล่างและอะลูมิเนียม

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
		<p>อยู่ด้านบนสารเจือผู้รับที่ใช้ได้มาจากการผสมกันระหว่างกรด C61-butyric กับ 3-ethylthiophene ester และสารไดเนอร์ใช้ poly(3-octylthiophene-2,5-diyl) ซึ่งใช้สารเจือผู้ให้และสารเจือผู้รับด้วยอัตราส่วน 1:1 และ 2:1 โดยน้ำหนักสารที่ใช้ก็นำมาพิมพ์ลงบนกระจกไอทีโอ ซึ่งใช้เป็นแผ่นฐาน จากนั้นนำไปวัดคุณสมบัติของกระแสและแรงดันทางไฟฟ้าในสภาวะมืดและภายใต้แสงที่ความเข้ม 75 W/m^2 เทคนิคการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นี้ประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของชั้นสารเจือผู้ให้และสารเจือผู้รับที่ใช้</p>
2009	(Lennon et al., 2009)	<p>การเปิดช่องชั้นสารกึ่งตัวนำโดยใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีดสร้างลวดลายบน SiO_2 และ SiN_x ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริกทำการออกแบบสร้างหลุมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40-50 μm และร่องที่เป็นเส้นตรงขนาดกว้าง 50-60 μm ความลึกของการกัดอยู่ที่ 300 nm สำหรับ SiO_2 และ 75 nm สำหรับ SiN_x ทำให้เกิดลวดลายของชั้นไดอิเล็กตริกและสร้างรอยต่อโลหะเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน</p>
2009	(Wang et al., 2009)	<p>สร้างไอซีด้วยการประยุกต์ใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีด (Inkjet printer) กับสารละลายเงิน (silver) โดยใช้แผ่นฐานที่เคลือบพอลิเมอร์ซึ่งจะใช้กับอุณหภูมิสูง ๆ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับ ไดโอด เซลล์แสงอาทิตย์ จอแสดงผลแฟลตพาแนล (flat panel display) และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ซึ่งช่วยให้ง่ายต่อการใช้งานและลดต้นทุนการผลิตได้</p>
2010	(Eom et al., 2010)	<p>เซลล์แสงอาทิตย์แบบพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงโดยใช้ poly(3-hexylthiophene, P3HT) สร้างขึ้นโดยเครื่องพิมพ์แบบฉีดทุกกระบวนการในการสร้างชั้นฟิล์มของเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพ 3.71%</p>

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2010	(Lange et al., 2010)	สร้างทอเคลย์และชั้นฟิล์มด้วยสูตรโครงสร้างตัวทำละลายของสาร poly(3-hexylthiophene,P3HT) โดยใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีดกับสารดังกล่าวบนแผ่นฐานสำหรับสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบพอลิเมอร์ด้วยสาร โดยที่หัวพิมพ์ฉีดสารให้จุดเดือดสูงแล้วดันสารออกมาใช้กับสารกลุ่มวงแหวนเบนซีน (chlorobenzene, trichlorobenzene) ซึ่งเป็นสารทำละลายใน P3HT

จะเห็นได้ว่าการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้มีการนำเครื่องพิมพ์แบบฉีด (Inkjet printer) มาใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลายและการประยุกต์ใช้กับการสร้างฟิล์มบางของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอดเปล่งแสงแบบพอลิเมอร์ เป็นต้น แต่ยังไม่มีการนำมาประยุกต์ใช้ในการเปิดช่องชั้นไดอิเล็กทริกเพื่อเป็นชั้นพาสซีเวชันด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างไรก็ตาม วรรณกรรมและงานวิจัยที่ได้สรุปผ่านมานั้น สามารถช่วยให้ผู้ศึกษาสามารถเข้าใจและพัฒนาระบบฉีด เพื่อมุ่งไปสู่การใช้งานในกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

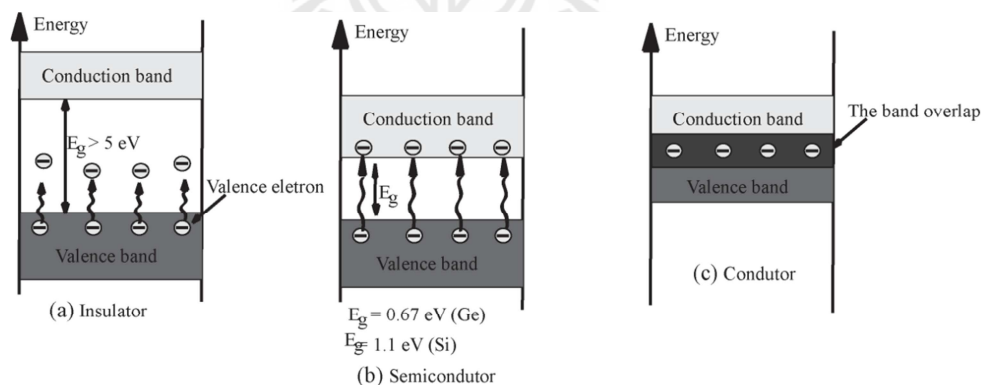
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทางไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ ของรอยต่อสารกึ่งตัวนำ รวมถึงยังได้อธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์

2.3.1 ทฤษฎีแถบพลังงาน

ทฤษฎีแถบพลังงานได้นำมาเพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์การเกิดกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในลำดับแรกจะกล่าวถึงแถบพลังงานในวัสดุต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งแถบพลังงานเป็น 2 ชนิดคือแถบวาเลนซ์ (E_v) และแถบความนำ (E_c) ในแถบวาเลนซ์จะมีระดับพลังงานต่างๆ อยู่มากมายแต่ระดับจะมีอิเล็กตรอนประจำอยู่โดยไม่มีระดับพลังงานว่างอยู่เลยจึงไม่เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนขึ้น ส่วนแถบความนำจะมีระดับพลังงานที่ว่างอยู่มากมายอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบความนำจึงสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ระยะห่างระหว่างแถบความนำและแถบวา

เลนซ์ จะเรียกว่า ช่องว่างพลังงาน (E_g) ซึ่งค่าช่องว่างพลังงานของวัสดุแต่ละชนิดจะบ่งบอกถึงสมบัติการดูดกลืนพลังงานภายในวัสดุนั้น

ในรูปที่ 2.1(a) แสดงแถบพลังงานของฉนวนในแถบความนำจะมีระดับพลังงานที่ว่างเท่านั้นทั้งที่ยังมีช่องว่างพลังงานที่กว้างมาก อิเล็กตรอนที่จะทำให้เกิดสภาพความนำจะต้องมีพลังงานมากพอที่จะข้ามจากแถบวาเลนซ์มายังแถบความนำได้ ด้วยเหตุนี้ฉนวนจึงมีสภาพนำไฟฟ้าต่ำมาก ในวัสดุสารกึ่งตัวนำจะมีช่องว่างพลังงานไม่กว้างมาก ขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำจึงสามารถเกิดสภาพความนำขึ้นได้ถ้าได้รับพลังงานจากภายนอก เช่น พลังงานความร้อนหรือพลังงานแสงที่มีค่าสูงกว่าค่าช่องว่างพลังงานมากกระตุ้นให้อิเล็กตรอนข้ามช่องว่างพลังงานนี้ได้แสดงได้ดังรูปที่ 2.1(b) ส่วนในแถบความนำของวัสดุโลหะตัวนำมีทั้งระดับพลังงานที่ว่างและระดับพลังงานที่มีอิเล็กตรอนประจำอยู่ อิเล็กตรอนจึงเคลื่อนที่ไปสู่ระดับพลังงานที่ว่างได้ง่าย เนื่องจากแถบพลังงานความนำกับแถบพลังงานวาเลนซ์ซ้อนทับกัน เมื่อได้รับพลังงานเพียงเล็กน้อยวัสดุโลหะตัวนำจึงมีสภาพความนำไฟฟ้าสูงแสดงได้ดังรูปที่ 2.1(c) แต่เมื่อมีพลังงานความร้อนให้กับวัสดุโลหะตัวนำแล้ว การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะเกิดการชนกันทำให้สภาพความต้านทานทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเรียกว่าสมบัติ Positive temperature coefficient ซึ่งจะมีพฤติกรรมตรงข้ามกับวัสดุสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างแถบพลังงานของวัสดุ (a) ฉนวน, (b) สารกึ่งตัวนำ และ(c) ตัวนำ

2.3.2 หลักการของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบรอยต่อพี-เอ็น

สารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมพิเศษอย่างหนึ่งซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) พฤติกรรมของสารกึ่งตัวนำที่สามารถแปลงพลังงานแสงที่ตก

1) กรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ในสภาวะมืด เรียกว่าสภาวะสมดุล พิจารณาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีรอยต่อพี-เอ็นอยู่ในสภาวะสมดุลแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 จากรูปจะเห็นว่าความหนาแน่นของโฮลและอิเล็กตรอนในด้านทั้งสองไม่เท่ากัน บริเวณรอยต่อและทำให้เกิดประจุไฟฟ้าบวกและลบของไอออนอะตอมสารเจือ มีผลทำให้สนามไฟฟ้าเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ สนามไฟฟ้านี้จะต่อต้านการแพร่ข้ามรอยต่อของพาหะก่อให้เกิดกลไกของความสมดุลคือ พาหะจากอิทธิพลการแพร่ (diffusion) เท่ากับปริมาณพาหะจากอิทธิพลการพัดพา (drift) พาหะจากการพัดพาที่เกิดจากสนามไฟฟ้า (\mathcal{E}) ภายในของอิเล็กตรอนจากด้านพีไปด้านเอ็น จะค่อย ๆ ลดลงจากรอยต่อออกไป ซึ่งการแพร่และการพัดพาของพาหะนั้นมีทิศทางตรงข้ามกันทำให้กระแสไฟฟ้ารวมมีค่าเป็นศูนย์ความชันของกราฟบริเวณปลอดพาหะ เป็นสิ่งแสดงขนาดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อ

2) กรณีของเซลล์อยู่ภายใต้สภาวะสว่าง (Illuminated characteristics) วัสดุสารกึ่งตัวนำอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานแสงที่เรียกว่าโฟตอน ที่มีพลังงานมากกว่าแถบพลังงานช่องว่าง (Energy band gap, E_g) ของสารกึ่งตัวนำชนิดนั้น ในรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าบริเวณรอยต่อพี-เอ็นจะอยู่ในสภาวะไม่สมดุล (Non-equilibrium) ที่ด้านเอ็นพลังงานโฟตอนกระตุ้นทำให้อิเล็กตรอนในชั้นบนสุดของแถบพลังงานวาเลนซ์และอิเล็กตรอนอิสระส่วนเกินซึ่งได้จากการเติมอะตอมสารเจือชนิดอะตอมผู้รับมีระดับพลังงานเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนดังกล่าวจะข้ามแถบพลังงานช่องว่างมาที่แถบความนำของด้านเอ็น ส่วนทางด้านพีจะมีพาหะชนิดโฮลซึ่งมีพฤติกรรมคล้ายพาหะอิเล็กตรอนเมื่อได้รับพลังงานโฟตอนกระตุ้นพาหะโฮลจะข้ามแถบพลังงานช่องว่าง มาที่แถบความนำของด้านพีและกลายเป็นพาหะอิเล็กตรอนอิสระที่แถบความนำ เนื่องจากระดับพลังงานเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อมีระดับต่างกัน อิเล็กตรอนอิสระในแถบความนำด้านพีซึ่งเป็นพาหะข้างน้อยเคลื่อนที่แบบพัดพาในสนามไฟฟ้าทำให้กระแสไฟฟ้าจากอิทธิพลการพัดพามีค่าเพิ่มขึ้นจากปริมาณพาหะอิเล็กตรอน ส่วนพาหะโฮลในแถบวาเลนซ์จะเคลื่อนที่แบบพัดพาเนื่องจากสนามไฟฟ้าด้วยเช่นกัน แต่มีทิศทางตรงข้ามทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเนื่องจากพาหะโฮล เรียกการเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกันนี้ว่า คู่พาหะอิสระ (electron-hole pair) ขณะเดียวกันการเกิดขึ้นของพาหะทำให้เกิดการสะสมประจุ (+,-) ที่รอยต่อ ซึ่งเป็นแสดงพลังงานศักย์ภายใน (ψ_0) สามารถแสดงเป็นความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิด้านเอ็น (E_{Fn}) กับระดับพลังงานเฟอร์มิด้านพี (E_{Fp}) มีค่าเท่ากับแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) ของเซลล์แสงอาทิตย์นั่นเอง และระดับพลังงานเฟอร์มิของทั้งสองด้านต่างเท่ากับ qV_{oc} เมื่อพิจารณาสมการต่อเนื่องของพาหะข้างน้อยชนิดโฮลที่ถูกผลิตด้วยแสงในชั้นเอ็นและพาหะข้างน้อยชนิดอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตด้วยแสงในชั้นพี เคลื่อนที่แบบพัดพาดังสมการ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ

$$\frac{1}{q} \cdot \frac{dJ_h}{dx} + \frac{p_n + p_{n0}}{\tau_h} - g(x) = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{1}{q} \cdot \frac{dJ_e}{dx} - \frac{p_p + p_{p0}}{\tau_e} + g(x) = 0 \quad (2.2)$$

กระแสไฟฟ้าสุทธิเกิดจากการรวมของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่เรียกว่า กระแสพัดพาและกระแสการแพร่ กระแสรวมที่ไหลในเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นผลรวมของกระแสไฟฟ้าจากการพัดพาและการแพร่ดังสมการ

$$J_h = q\mu_h p_h \mathcal{E} - qD_h \frac{dp_n}{dx} \quad (2.3)$$

$$J_e = q\mu_e n_p \mathcal{E} + qD_e \frac{dn_p}{dx} \quad (2.4)$$

โดยที่ J_e คือกระแสไฟฟ้าของอิเล็กตรอนต่อหน่วยพื้นที่ μ_e คือความคล่องตัวของอิเล็กตรอน

J_h คือกระแสไฟฟ้าของโฮลต่อหน่วยพื้นที่ μ_h คือความคล่องตัวของโฮล

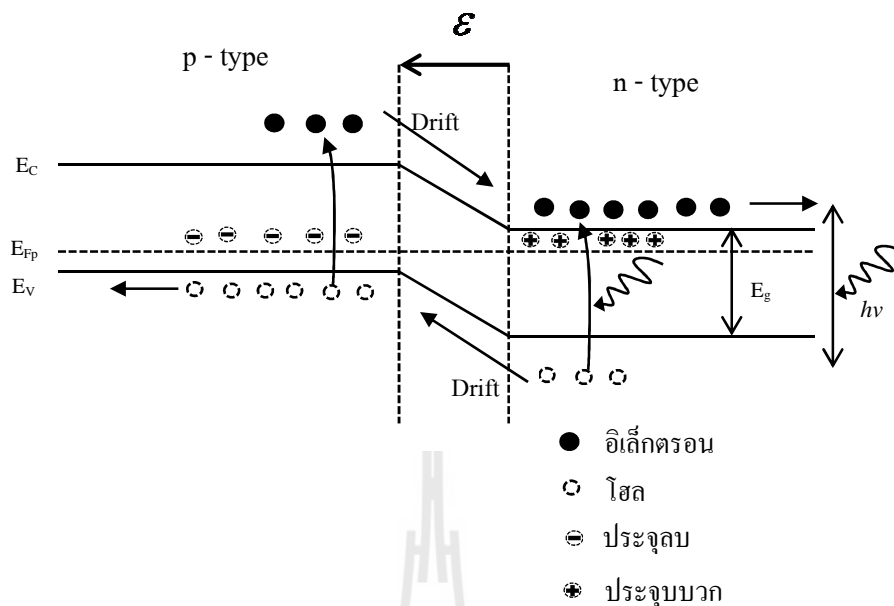
τ_e คือเวลาช่วงชีวิตของอิเล็กตรอน τ_h คือเวลาช่วงชีวิตของโฮล

n_p คือความหนาแน่นอิเล็กตรอนต่อพื้นที่ในชั้นพี D_h คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล

p_n คือความหนาแน่นโฮลต่อพื้นที่ในชั้นเอ็น \mathcal{E} คือสนามไฟฟ้า

$g(x)$ คืออัตราการผลิตพาหะ (generation rate) q คือประจุอิเล็กตรอน

D_e คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน w คือความกว้างของชั้นปลอดพาหะ



รูปที่ 2.3 โคอะแกรมแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นที่อยู่ในสภาวะได้รับแสงตกกระทบที่ผิว

เมื่อแทนสมการที่ (2.3) ลงในสมการที่ (2.1) และแทนสมการที่ (2.4) ลงในสมการที่ (2.2) โดยที่ไม่พิจารณาศักย์ไฟฟ้าในชั้นเอ็นและพีจะเขียนสมการ ได้ดังนี้

$$D_h \frac{dp_n^2}{dx^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_h} + g(x) = 0 \quad (2.5)$$

$$D_e \frac{dn_p^2}{dx^2} - \frac{p_p - p_{p0}}{\tau_e} + g(x) = 0 \quad (2.6)$$

กำหนดให้อัตราการผลิตพาหะ $g(x)$ มีค่าเท่ากับ G และจากสมการที่ (2.5) และ (2.6) เป็นสมการอนุพันธ์อันดับสองสามารถแก้สมการได้ดังสมการที่ (2.7) และ (2.8)

$$\Delta p = p_n - p_{n0} = G\tau_h + Ae^{x/L_h} + Be^{-x/L_h} \quad (2.7)$$

$$\Delta n = n_p - n_{p0} = G\tau_e + Ae^{x/L_e} + Be^{-x/L_e} \quad (2.8)$$

- โดยที่ Δp คือความหนาแน่นของพาหะโฮลส่วนเกิน(excess concentration of holes) มีค่าเท่ากับ
ผลต่างระหว่างของความหนาแน่นโฮลต่อพื้นที่ในชั้นเอ็นกับจุดสมดุล ($p_p - p_{n0}$)
- Δn คือความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนส่วนเกิน (excess concentration of electron)
- L_h คือระยะทางการแพร่ของโฮล และ $L_h = \sqrt{D_h \tau_h}$
- L_e คือระยะทางการแพร่ของอิเล็กตรอน และ $L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$

สำหรับ A และ B คือค่าคงตัวซึ่งสามารถคำนวณได้จากการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต 2
เงื่อนไขขอบเขตคือ

1. ในบริเวณขอบของชั้นปลอดพาหะ ณ $x = b$ พาหะส่วนเกินจะมีจำนวนน้อยมาก นั่น
คือ $\Delta p = 0$
2. บริเวณที่ผิวด้านหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์พาหะจะมีการรวมตัวกัน ณ $x = 0$
 $p_n = p_{n0} \cdot e^{qV/kT}$ และ $n_p = n_{p0} \cdot e^{qV/kT}$ ดังนั้นสมการ (2.7) และ (2.8) แสดงได้ดัง
สมการที่ (2.9) และ (2.10)

$$\Delta p = G\tau_h + [p_{n0}(e^{qV/kT} - 1) - G\tau_h] \cdot e^{-x/L_h} \quad (2.9)$$

$$\Delta n = G\tau_e + [n_{p0}(e^{qV/kT} - 1) - G\tau_e] \cdot e^{-x/L_e} \quad (2.10)$$

ดังนั้นจะได้ความหนาแน่นพาหะข้างน้อยโฮลทางด้านเอ็นและพาหะข้างน้อยอิเล็กตรอน
ทางด้านพีแสดงความสัมพันธ์ของพาหะดังกล่าวได้ด้วยกราฟกึ่งลอการิทึม(Semi-log) ดังรูปที่ 2.4
และสมการที่ (2.11) และ (2.12)

$$p_n(x) = p_{n0} + G\tau_h + [p_{n0}(e^{qV/kT} - 1) - G\tau_h] \cdot e^{-x/L_h} \quad (2.11)$$

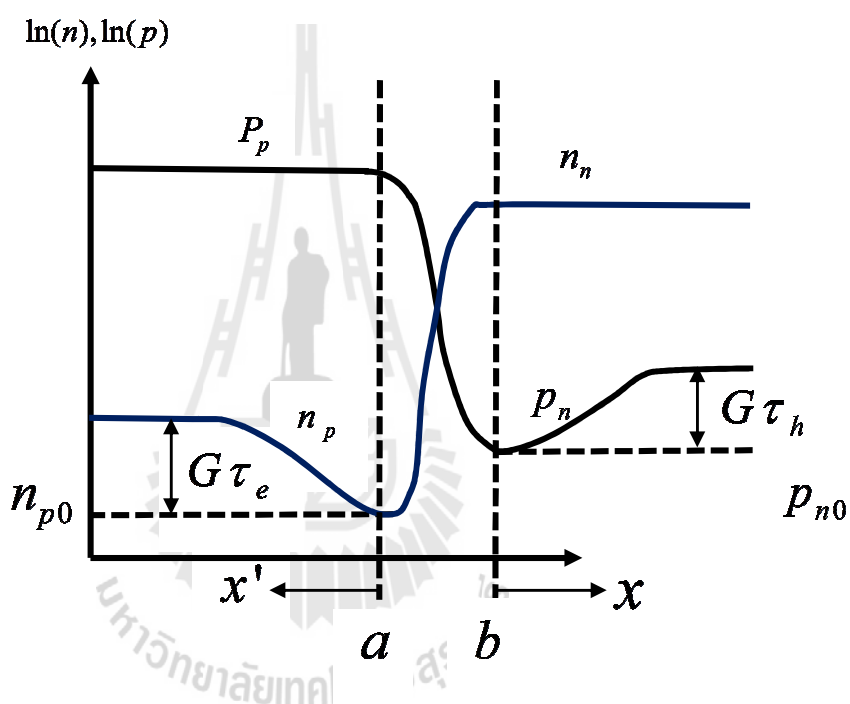
$$n_p(x') = n_{p0} + G\tau_e + [n_{p0}(e^{qV/kT} - 1) - G\tau_e] \cdot e^{-x'/L_e} \quad (2.12)$$

จากสมการความสัมพันธ์ข้างต้น และสมการกระแสไฟฟ้าที่ (2.3) และ (2.4) ความ
หนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากพาหะโฮลแสดงสมการได้เป็น

$$J_h(x) = \frac{qD_h p_{n0}}{L_h} (e^{qV/kT} - 1) \cdot e^{-x/L_h} - qG\tau_h e^{-x/L_h} \quad (2.13)$$

และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากพาหะอิเล็กตรอนเป็น

$$J_e(x') = \frac{qD_e n_{p0}}{L_e} (e^{qV/kT} - 1) \cdot e^{-x'/L_e} - qG\tau_e e^{-x'/L_e} \quad (2.14)$$



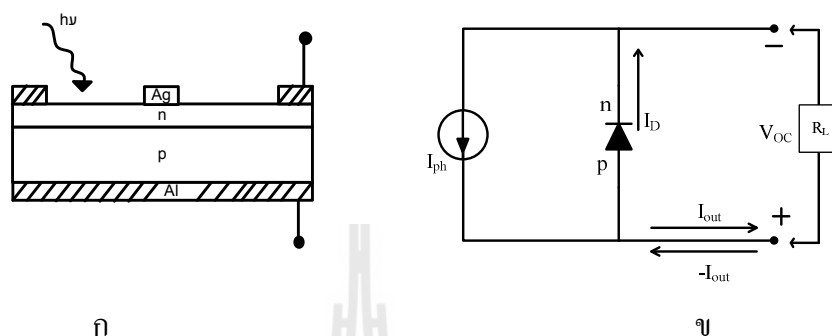
รูปที่ 2.4 กราฟถึงลอการิทึมของการกระจายตัวปริมาณพาหะในสภาวะได้รับแสงตกกระทบบที่ผิว

เมื่อการรวมตัวใหม่ของพาหะบริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อกว้าง w นั้นไม่ถูกนำมาพิจารณา ผลของกระแสที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของ G แสดงได้ดังสมการที่ (2.15)

$$|\delta J_e| = |\delta J_h| = qGw \quad (2.15)$$

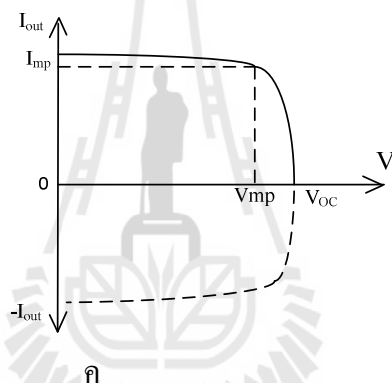
ดังนั้นจะได้ผลรวมของกระแสไฟฟ้าในกรณีที่ระยะของ $x = 0$ และ $x' = 0$ ได้ดังสมการที่ (2.16)

$$J_{total} = J_e \Big|_{x=0} + J_h \Big|_{x=0} = \left(\frac{qD_e n_{p0}}{L_e} + \frac{qD_h p_{n0}}{L_h} \right) (e^{qV/kT} - 1) - qG(\tau_e + \tau_h + w) \quad (2.16)$$



ก

ข



ค

รูปที่ 2.5 (ก) ภาพจำลองเซลล์อาทิตย์ชนิดมีแสงตกกระทบ

(ข) วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดมีแสงตกกระทบ

(ค) กราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันไฟฟ้าชนิดมีแสงตกกระทบ

รูปที่ 2.5 (ก) แสดงโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อพี-เอ็นเมื่อมีแสงตกกระทบซึ่งมีวงจรสมมูลทางไฟฟ้าดังรูปที่ 2.5 (ข) จากวงจรสมมูลทางไฟฟ้าดังกล่าวสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหล (I) และแรงดันไฟฟ้า (V) ได้ดังสมการที่ (2.17) และแสดงความสัมพันธ์ในกราฟดังรูปที่ 2.5 (ค) ในจุดภาคที่ 4 (เส้นประ) และสามารถพิจารณาในรูปทั่วไปซึ่งจะย้ายรูปกราฟมาที่จุดภาคที่ 1 (เส้นทึบ) โดยการปรับเปลี่ยนขนาดของโหลดความต้านทาน (R_L) ที่ต่อเข้ากับเซลล์ทำการหาพื้นที่ใต้กราฟรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีพื้นที่มากที่สุดภายใต้เส้นกราฟกระแสและแรงดันนี้ จุดตัดบนแกนอนจะเป็นแรงดันมากที่สุด (V_{OC}) เมื่อทำการเปิดวงจรและจุดตัดบนแกนตั้งเป็นกระแสที่มีค่ามากที่สุด (I_{SC}) เมื่อทำการลัดวงจร และมีตำแหน่งของกระแส (I_{mp}) และ

แรงดัน (V_{mp}) ที่ทำให้กำลังไฟฟ้ามากที่สุดนอกจากนี้สามารถหาประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) จากสมการที่ (2.18)

$$I_{out} = I_0(e^{qV_{oc}/kT} - 1) - I_{ph} \quad (2.17)$$

$$\text{โดยที่ } I_0 = A \left(\frac{qD_e n_{p0}}{L_e} + \frac{qD_h p_{n0}}{L_h} \right) = A \left(\frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D} \right)$$

I_{out} = กระแสที่ไหลผ่านเมื่อมีการต่อโหลด

I_0 = กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ

I_{ph} = กระแสที่เกิดจากแสงตกกระทบ

$I_D = I_0(e^{qV/kT} - 1)$ คือกระแสไฟฟ้าจากความดันไอโอดของเซลล์แสงอาทิตย์

V_{oc} = แรงดันไฟฟ้าขณะเปิดวงจร

k : ค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ $1.380 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

q : ค่าคงที่ของประจุไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ coulomb}$

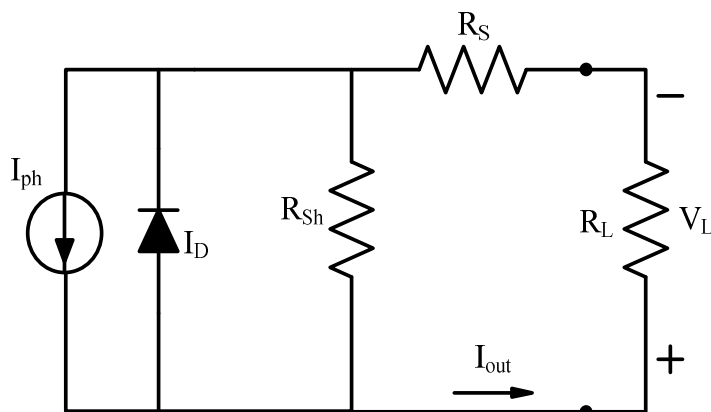
T : ค่าอุณหภูมิหน่วย Kelvin

A : พื้นที่หน้าตัดของเซลล์แสงอาทิตย์

$$\eta = \frac{I_{mp} V_{mp}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{sc} V_{oc}}{P_{in}} \quad (2.18)$$

โดย P_{in} เป็นกำลังไฟฟ้าที่ได้จากแสงต่อพื้นที่รับแสงหนึ่งหน่วยและ FF คือฟิลล์แฟกเตอร์ (Fill factor) ของเซลล์แสงอาทิตย์บ่งบอกถึงอิทธิพลของความต้านทานแฝงภายในที่มีอยู่ของเซลล์โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ (2.19)

$$FF = \frac{I_{mp} V_{mp}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงพารามิเตอร์ตัวต้านทาน

รูปที่ 2.6 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีการใช้งานจริงจะเกิดความต้านทานไฟฟ้าภายในแผงคือความต้านทานอนุกรม (R_s) และความต้านทานขนาน (R_{sh}) ซึ่งทิศทางของโวลต์ (J_h) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสที่เกิดจากแสงตกกระทบ (I_{ph}) จะมีทิศทางการไหลสวนทางกับกระแสอิเล็กตรอน (J_e) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าจากความเป็นไดโอดของเซลล์แสงอาทิตย์ (I_D) สามารถแสดงสมการกระแสไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (2.20)

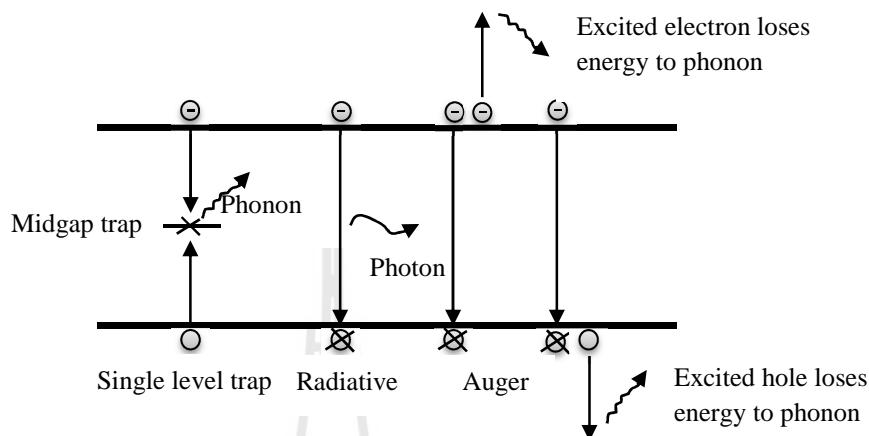
$$I_{out} = I_0 \exp\left[\frac{q(V_{OC} + I_{out}R_s)}{nkT}\right] + \frac{V_{OC} + I_{out}R_s}{R_{sh}} - I_{ph} \quad (2.20)$$

โดยที่ R_s คือค่าความต้านทานอนุกรมระหว่างรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์กับขั้วโลหะ
 R_{sh} คือค่าความต้านทานขนานภายในรอยต่อพี-เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์

2.3.3 ช่วงเวลาชีวิตของพาหะ (Life time)

ในโครงสร้างชั้นรอยต่อพี-เอ็นนั้นพารามิเตอร์สำคัญตัวหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์คือ ระยะทางการแพร่ของพาหะข้างน้อยของอิเล็กตรอน (L_e) และระยะทางการแพร่ของพาหะข้างน้อยของโฮล (L_h) ใช้เป็นตัวกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจาก ระยะทางการแพร่ของพาหะข้างน้อยสัมพันธ์โดยตรงกับค่ากระแสโฟโตที่เกิดขึ้นพิจารณาได้ในสมการที่ 2.17 และระยะทางการแพร่ของพาหะข้างน้อยของอิเล็กตรอนและของโฮลหาได้จาก $L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$ และตามลำดับ $L_h = \sqrt{D_h \tau_h}$ ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จากความสัมพันธ์ดังกล่าวจะเห็นว่าระยะทางการแพร่ของพาหะข้างน้อยจะแปร

ผัน โดยตรงกับค่าเวลาอายุของพาหะข้างน้อย (τ_e) และยังเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดค่าอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อค่ากระแสที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีแสงตกกระทบ กลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะมีอยู่ 3 ชนิดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.7 กลไกการรวมตัวกลับของพาหะในรูปแบบต่าง ๆ

- 1) การรวมตัวของพาหะที่ศูนย์กลางกับดัก (Recombination at Trap centers) หรือเรียกอีกอย่างว่า Shockley-Read-Hall recombination พาหะที่เกิดการรวมตัวใหม่ที่บริเวณตำแหน่งที่เกิดจุดบกพร่องในเนื้อผลึก เมื่อแสงในแบบจำลองแถบพลังงานแล้ว จะแสดงระดับพลังงานกับดักอยู่ระหว่างช่องว่างพลังงาน (forbidden band) ของสารกึ่งตัวนำเมื่อพาหะถูกดักจับที่ศูนย์กลางระดับพลังงานแล้ว จะคายพลังงานในรูปแบบของคลื่นความร้อนออกมา ช่วงเวลาอายุของพาหะก่อนที่จะเกิดการรวมตัวขึ้นที่ระดับศูนย์กลางกับดัก (τ_T) แสดงได้ดังสมการที่ (2.21) และ (2.22) กลไกแสดงการรวมตัวใหม่ของพาหะนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.7

$$\tau_{eT} = \tau_{e0} \left(1 + \frac{m_e}{N_A}\right) \quad (2.21)$$

$$\tau_{hT} = \tau_{h0} \left(1 + \frac{m_h}{N_D}\right) \quad (2.22)$$

โดยที่ m_e และ m_h คือค่าประมาณที่มากที่สุดของพาหะอิเล็กตรอนและพาหะโฮลตามลำดับ

- 2) การรวมตัวแบบ Auger (Auger Recombination) เป็นกลไกการรวมตัวของพาหะที่เกิดขึ้นได้สูงในเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับพาหะ 3 ชนิดคือ อิเล็กตรอน โฮลและอิเล็กตรอนอีกตัวที่อยู่ในแถบความนำแล้วได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจากอิเล็กตรอนที่เพิ่งถูกกระตุ้นขึ้นมาจากชั้นแถบวาเลนซ์ ทำให้อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นนี้ข้ามไปยังสถานะในแถบความนำที่สูงกว่า และตกกลับอีกครั้งพร้อมกับปล่อยพลังงานคลื่นสั้นๆ ในรูปพลังงานความร้อนจากกระบวนการ Thermalisation ถือได้ว่าพลังงานความร้อนนี้ก่อเกิดการสั่นของโครงผลึก (lattice vibration) เป็นการจำกัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ กลไกแบบ Auger ที่แสดงในรูปที่ 2.7 นี้เกิดในวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีการเติมสารเจือปริมาณความเข้มข้นสูง ช่วงเวลาชีวิตของพาหะที่ถูกกำหนดด้วยการรวมตัวแบบ Auger แสดงได้ดังสมการที่ (2.23) และ (2.24)

$$\tau_{eA} = \frac{1}{D_e N_A^2} \quad (2.23)$$

$$\tau_{hA} = \frac{1}{D_h N_D^2} \quad (2.24)$$

โดยที่ τ_{eA} และ τ_{hA} คือช่วงเวลาชีวิตของพาหะอิเล็กตรอนและพาหะโฮลที่รวมตัวแบบ Auger

D_e และ D_h คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะอิเล็กตรอนและพาหะโฮลตามลำดับ

N_A และ N_D คือความหนาแน่นของสารเจือแบบอะตอมผู้รับและแบบอะตอมผู้ให้ตามลำดับ

- 3) การรวมตัวชนิดเปล่งแสง (Radiative Recombination) กลไกนี้เกิดขึ้นในวัสดุสารกึ่งตัวนำ จากการปล่อยพลังงานความยาวคลื่นจากขอบต่ำสุดของแถบความนำถึงขอบบนสุดของแถบพลังงานวาเลนซ์ พลังงานที่เปล่งออกมาจะเท่ากับค่าพลังงานช่องว่างของวัสดุสารกึ่งตัวนำนั้นๆ ช่วงเวลาชีวิตของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลกำหนดด้วยการรวมตัวชนิดเปล่งแสง แสดงได้ดังสมการที่ (2.25) และ (2.26)

$$\tau_{eR} = \frac{1}{2BN_A} \quad (2.25)$$

$$\tau_{hR} = \frac{1}{2BN_D} \quad (2.26)$$

โดยที่ B คือ Radiative recombination coefficient

ค่าช่วงชีวิตของพาหะในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับค่าอัตราการเกิดพาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกกระตุ้น ($G(t)$) และค่าอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะ (R) เมื่อวัสดุได้รับพลังงานกระตุ้นภายนอก ทำให้เกิดพาหะส่วนเกินเพิ่มมากขึ้น และจำนวนที่เพิ่มมากขึ้นนี้จะเสื่อมลง (decay) กลับไปยังสถานะเดิมที่สภาวะสมดุล พร้อมกับการคายพลังงานที่เท่ากับระดับที่ได้รับการกระตุ้น ก่อนนั้นเป็นผลให้ค่าช่วงเวลาที่ยาว ทำให้อัตราการเกิดพาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกกระตุ้นมีค่ามากกว่าอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง

ในกรณีที่วัสดุเดิมสารเจือค่า จำนวนพาหะข้างน้อยส่วนเกินในวัสดุมีปริมาณน้อยกว่าปริมาณอะตอมของสารเจือที่เติมไป จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\tau = \frac{\Delta n}{R} \quad (2.27)$$

โดยที่ Δn คือความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยส่วนเกิน

τ คือค่าช่วงเวลาที่ชีวิตของพาหะข้างน้อย

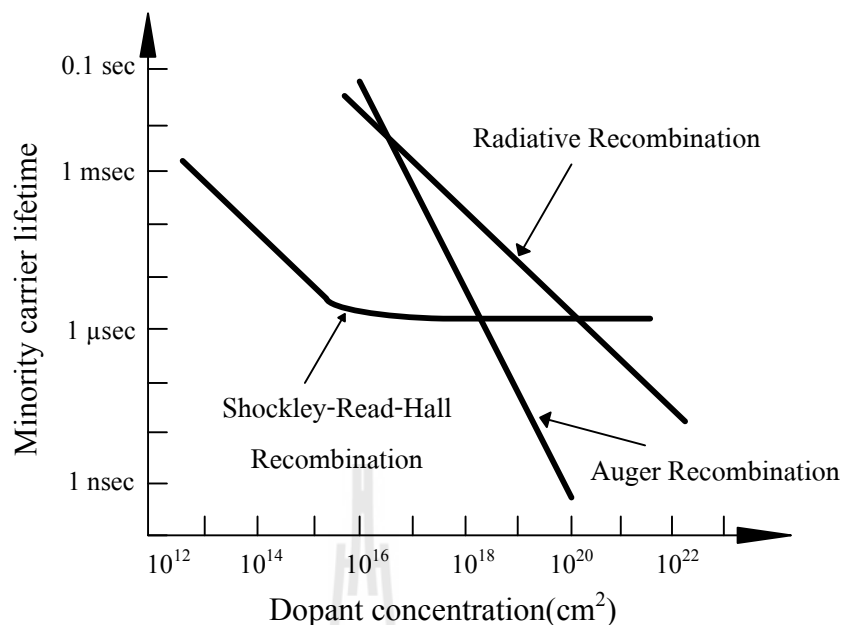
R คืออัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะข้างน้อย

ผลรวมของอัตราการรวมตัวทั้ง 3 แบบคือ

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_T} + \frac{1}{\tau_A} + \frac{1}{\tau_R} \quad (2.28)$$

และค่าช่วงชีวิตของพาหะทั้งก่อนผลึกแสดงได้ดังฟังก์ชันของค่าช่วงชีวิตพาหะจากกลไกการรวมตัวทั้ง 3 แบบได้ดังนี้

$$\tau_{bulk} = \frac{1}{\tau_T} + \frac{1}{\tau_A} + \frac{1}{\tau_R} \quad (2.29)$$

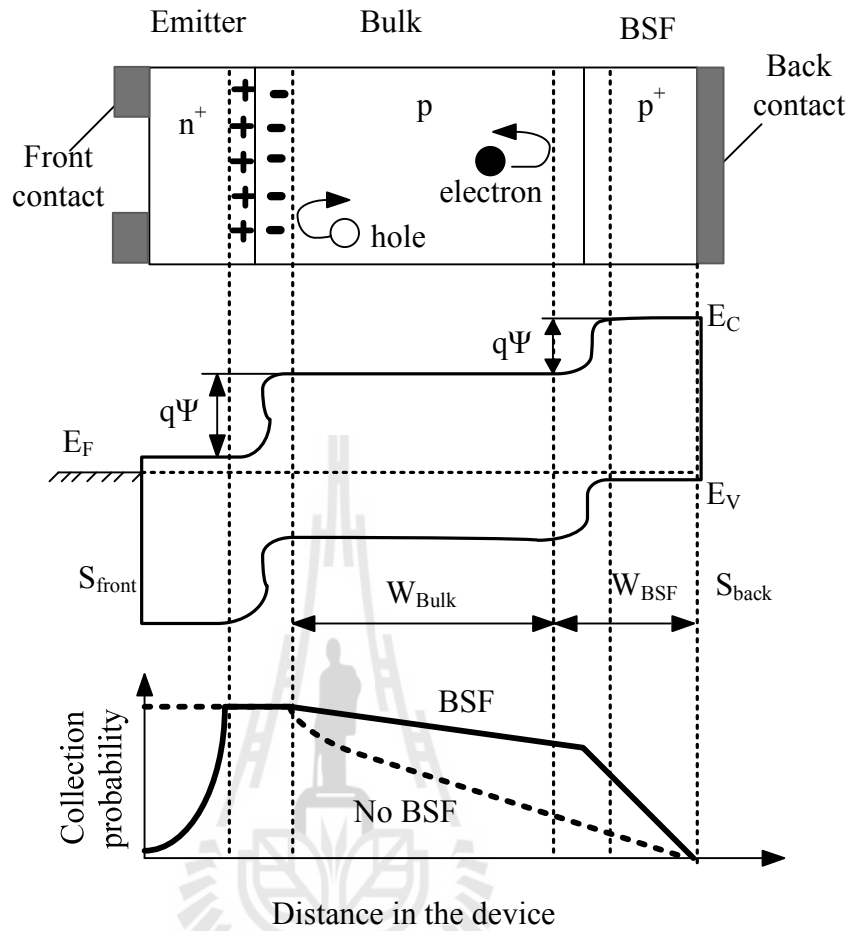


รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นการเติมสารเจือกับเวลาช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อย

กราฟรูปที่ 2.8 จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสารเจือแบบอะตอมผู้รับ (N_A) และเวลาอายุของพาหะข้างน้อยของอิเล็กตรอน (τ_e) ถ้าความหนาแน่นของสารเจือแบบอะตอมผู้รับมีมากขึ้นจะทำให้เวลาอายุของพาหะข้างน้อยของอิเล็กตรอนลดลง ส่งผลทำให้กระแสไฟฟ้าอิมิตชันกลับมีค่าลดลง แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการเปิดวงจร (V_{OC}) และกระแสไฟฟ้าเมื่อทำการลัดวงจร (I_{SC}) จะมีค่าสูงขึ้นดังแสดงในสมการที่ (2.17)

ดังนั้นการเพิ่มความหนาแน่นของสารเจือแบบอะตอมผู้รับและสารเจือแบบอะตอมผู้ให้จะส่งผลให้แรงดันเปิดวงจรเพิ่มขึ้น ถ้าใช้แผ่นฐานชนิดพีแล้วในส่วนชั้นเอ็นโดยปกติจะเติมสารเจือแบบอะตอมผู้ให้ (N_D) ที่มีความหนาแน่นสูงมากเพื่อให้สภาพด้านทานแผ่นมีค่าต่ำ ดังนั้นในพจน์ที่มีสารเจือแบบอะตอมผู้ให้ของสมการกระแสอิมิตชันกลับ (I_0) จึงมีค่าน้อยมาก จากสมการดังกล่าว สรุปได้ว่าแรงดันเปิดวงจรจะเพิ่มขึ้นถ้าเพิ่มความหนาแน่นของสารเจือแบบอะตอมผู้รับ

อย่างไรก็ตามการเติมอะตอมสารเจือชนิดเอ็นสูง ๆ เพื่อเป็นชั้นรับแสงจะส่งผลในด้านลบต่อค่าเวลาอายุของพาหะ ซึ่งได้จากการรวมตัวที่ผิวสูงทำให้กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแสงที่ตกกระทบจะลดลง อีกทั้งที่บริเวณความหนาแน่นของสารเจือค่าสูงจะเกิดความต้านทานอนุกรม (R_s) ที่สูงด้วย

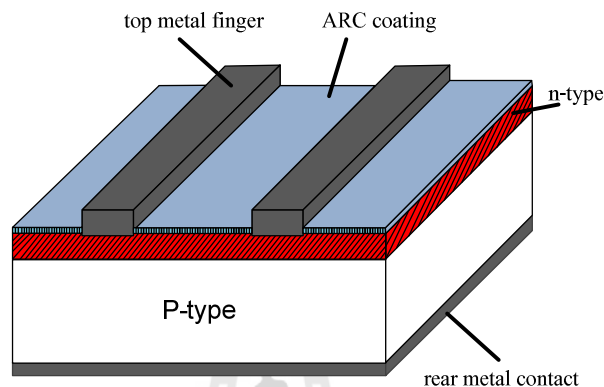


รูปที่ 2.9 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อพี-เอ็นที่มีสนามไฟฟ้าที่ผิวด้านหลัง

รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อพี-เอ็นที่มีสนามไฟฟ้าที่ผิวด้านหลัง พิจารณารอยต่อระหว่างชั้นพีกับชั้นพีความเข้มข้นสารเจือสูง (p/p^+) ส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าด้านหลัง (BSF) จากรอยตอดังกล่าวเนื่องจากมีความต่างศักย์ระหว่างรอยต่อกรณีนี้ทำให้เกิด Collection probability ของพาหะสูงขึ้นในบริเวณด้านหลังของเซลล์เมื่อเทียบกับเซลล์ที่ไม่มี BSF (p/p^+) เพราะมีกระแสพาหะเกิดการพัดพาได้เร็วขึ้นทำให้การรวมตัวใหม่ของพาหะที่แผ่นฐานนั้นลดลง แม้กระนั้นแล้วรอยสัมผัส p^+ กับซิลิคอนอะลูมิเนียมจะทำให้เกิดโอห์มมิกที่รอยต่อที่ดีแต่โครงสร้างนี้มีรอยสัมผัส p^+ /โลหะ ตลอดแผ่นนั้น ทำให้เกิดความต้านทานอนุกรมสูงขึ้น ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์จะลดลงจากผลดังกล่าว ดังนั้นในการพัฒนาโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีหลายช่วงวิวัฒนาการเพื่อลดผลจากความต้านทานอนุกรมโดยสร้างชั้นไดอิเล็กทริกบาง ๆ อยู่ระหว่างรอยต่อ p^+ /โลหะ เป็นต้น ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

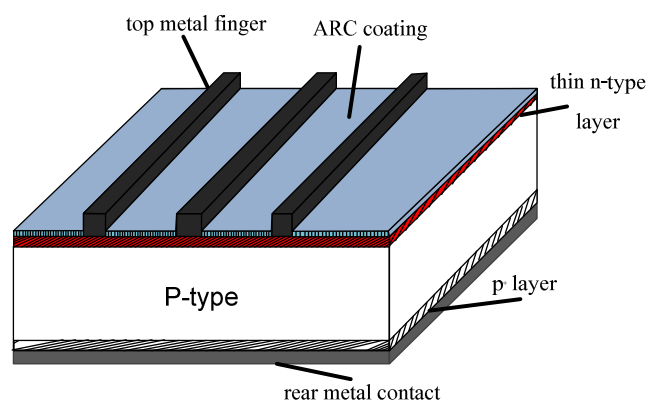
2.3.4 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นจากอดีตถึงปัจจุบัน

ในปี ค.ศ. 1960 ได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ต่อจากบริษัทเบลล์เทเลโฟน โดยใช้เทคนิคการสร้างรอยต่อพีเอ็น แสดงได้ดังรูปที่ 2.10 เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 15% และผลิตในเชิงพาณิชย์



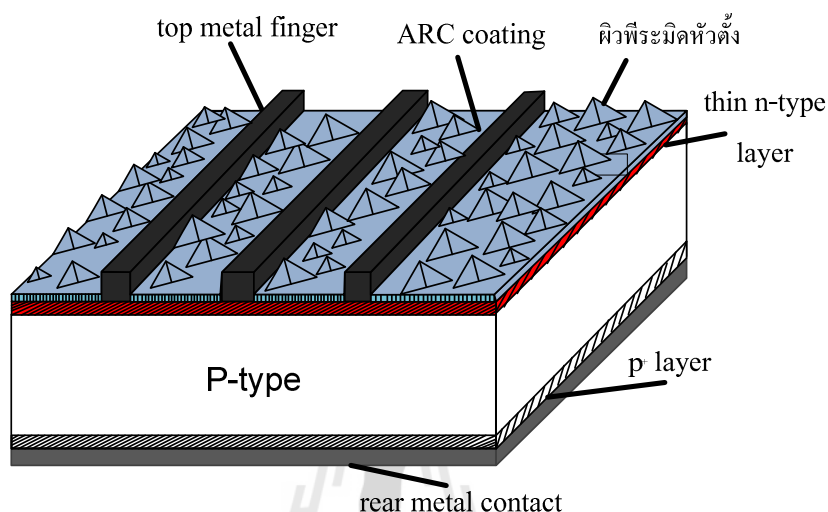
รูปที่ 2.10 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้พัฒนาขึ้นมาในปี ค.ศ. 1960 (Green, 1995)

ในช่วงปี ค.ศ.1970 นักวิจัยจากบริษัทคอมแซท (COMSAT) แห่งสหรัฐอเมริกา ได้ทำการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โดยการสร้างให้ระยะห่างของลายโลหะฟิงเกอร์ (fingers) แคบลงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรวบรวมพาหะ อีกทั้งยังได้เติมสารเจือแบบเข้มข้นระหว่างชั้นรอยต่อของชั้นพีกับอะลูมิเนียมด้านหลังเซลล์เรียกว่า การทำสนามไฟฟ้าที่ผิวด้านหลัง (back-surface field, BSF) แสดงได้ดังรูปที่ 2.11



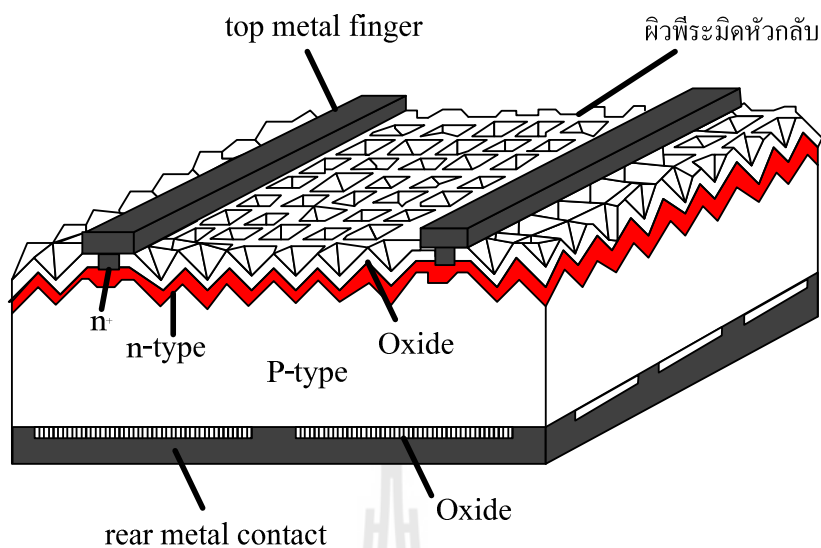
รูปที่ 2.11 เซลล์แสงอาทิตย์ที่เรียกว่า “violet” (Green, 1995)

ต่อมาบริษัทคอมแซทก็ได้เพิ่มการสกัดผิวหน้าของซิลิคอนด้วยสารเคมีให้เกิดรูปทรงพีระมิดที่ด้านรับแสงของเซลล์เพื่อลดการสะท้อนกลับของแสงตกกระทบ ทำให้เซลล์นี้มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงขึ้นเป็น 17% ดังแสดงในรูปที่ 2.12



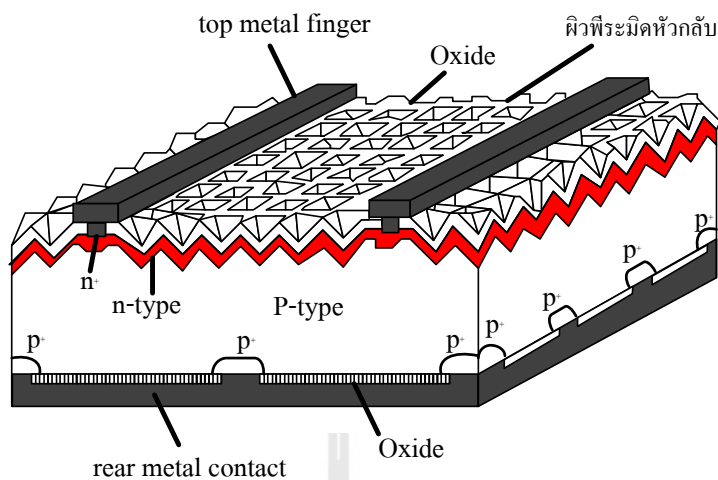
รูปที่ 2.12 เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเพิ่มรูปทรงพีระมิดที่ผิวด้านรับแสงของเซลล์ (Green, 1995)

การพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ UNSW ได้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERC (Passivation emitter and rear cell) จากต้นแบบโครงสร้าง PESC นำมาเพิ่มชั้นไดออกไซด์ทริกที่เรียกว่า ชั้นพาสซีเวชันที่รอยต่อระหว่างชั้นพีกับโลหะทางด้านหลังของเซลล์และได้สร้างพีระมิดหัวกลับ (inverted pyramids) แสดงในรูปที่ 2.13 ถือเป็นความสำเร็จแรกของ UNSW ที่สร้างชั้นเปิดช่องเล็ก ๆ แก่ชั้นไดออกไซด์ทริก (SiO_2) บาง ๆ ที่ด้านหลังของเซลล์เพื่อให้เกิดโครงสร้าง MIS สำหรับลดการสูญเสียบริเวณพื้นที่รับแสงนั้นได้สร้างด้วยเทคนิคโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถมีกระบวนการนี้ในอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากมีขั้นตอนที่ซับซ้อนไม่เหมาะสมกับอุปกรณ์รอยต่อพี-เอ็นพื้นที่กว้างอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERC นี้มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 20% (Ponce-Alcantara, del Canizo, & Luque, 2005)



รูปที่ 2.13 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERC (Green, 1995)

ในปี ค.ศ. 1994 UNSW ได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERL (passivated emitter, rear locally diffused cell) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ในกรณีของโครงสร้าง PERL ได้นำโครงสร้าง PERC มาเพิ่มเติมด้วยการแพร่สารเจือระหว่างช่องเปิดชั้นไดอิเล็กทริกเพื่อแพร่ชั้น p^+ ที่พื้นด้านหลังของเซลล์เพื่อต้องการลดพื้นที่สัมผัสระหว่าง p^+ กับ p ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าที่รอยสัมผัส p/p^+ ลดลง โครงสร้างพีระมิดหัวกลับจะช่วยให้การรวบรวมพาหะดีขึ้น โครงสร้างนี้ยังลดการสูญเสียจากความต้านทานไฟฟ้าที่รอยต่อ เนื่องจากพื้นที่ด้านบนใกล้กับขั้วไฟฟ้ามีการเติมสารเจือเข้มข้นเพื่อเป็นชั้น n^+ และสามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นสั้นซึ่งจะมีพลังงานโฟตอนสูง เป้าหมายการสร้างชั้นรอยต่อที่ชั้นไดอิเล็กทริกด้านหลังที่ผิวเซลล์จะช่วยเพิ่มเวลาช่วงชีวิตของพาหะให้สูงขึ้นจากกลไกการเกิดสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อไดอิเล็กทริก และการใช้แผ่นฐานแบบ FZ (Floating zone) ในโครงสร้างนี้จะช่วยให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์สูงขึ้นส่งผลให้ตัวประกอบกำลังทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ (Fill Factor) มีค่าสูงขึ้นด้วย เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างนี้มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 24% (Zhao, Wang, Altermatt, & Green, 1995) ถือเป็นโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุด แต่ยังไม่มีการนำมาผลิตในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากมีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อน



รูปที่ 2.14 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERL (Green, 1995)

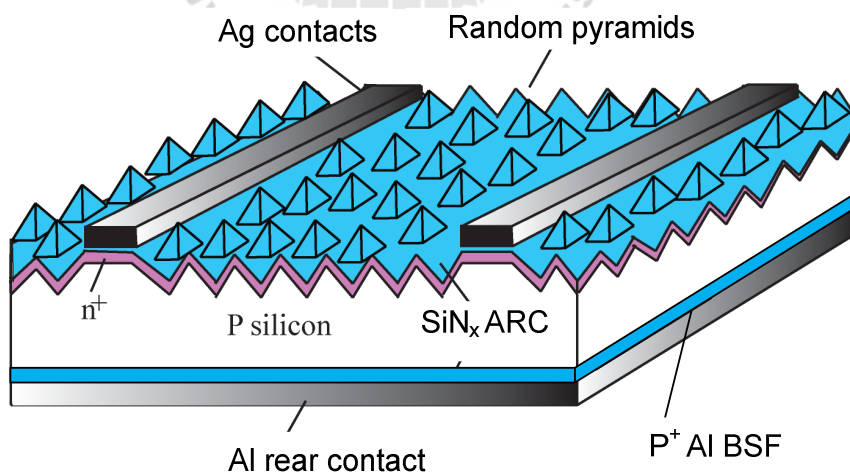
ตารางที่ 2.2 สรุปถึงวิวัฒนาการของเซลล์แสงอาทิตย์จากห้องปฏิบัติการวิจัย ที่มีการศึกษา การสร้างชั้นพาสซีเวชันและสนามไฟฟ้าด้านหลังเซลล์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซลล์มีแรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) และกระแสลัดวงจร (I_{sc}) สูงขึ้น เนื่องจากโครงสร้างมีชั้นของพาสซีเวชันเพื่อลดการรวมตัวของพาหะที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ แต่โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกซิลิคอนที่ใช้ปัจจุบัน ทั้งชนิดผลึกรวมและผลึกเดี่ยวจะใช้เทคนิคการสร้างขั้วโลหะและอบทั้งสองด้าน (Co-firing) และ สร้างสนามไฟฟ้าที่ด้านหลังด้วยขั้วโลหะอะลูมิเนียม (Al-BSF) โครงสร้างนี้นำมาใช้ร้อยละ 80 จาก เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้อยู่ ณ ปัจจุบัน (Glunz, Preu, & Biro) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และรายละเอียด ของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพาสซีเวชันด้านหลัง

ชื่อโครงสร้าง เซลล์แสงอาทิตย์	สร้างโดย	แรงดันเปิด วงจร(mV)	กระแสลัดวงจร (mA/cm ²)	ประสิทธิภาพ เซลล์แสงอาทิตย์ (η)
PESC	UNSW	669	38.6	21.4%
PERC	UNSW	696	40.3	22.8%
PERL	UNSW	696	42	24%
PERT	UNSW	707	40.9	23%
PERF	UNSW	714	33.4	23%

รายละเอียดของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์มีดังนี้

- 1) เซลล์มีขนาดประมาณ 243.36 cm^2 หนา $200 \text{ }\mu\text{m}$ พื้นฐานชนิดพีมีความหนาแน่นพาหะ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ มีความต้านทานประมาณ $1 \text{ }\Omega\text{-cm}$ พื้นฐานแบบผลึกเดี่ยวและผลึกรวมที่มีระนาบ(100)
- 2) ผิวด้านหน้าเซลล์สร้างรูปร่างพีระมิดในระดับไมครอน เพื่อการรับแสงที่ดีขึ้นลดการสะท้อนที่ผิวด้านรับแสง
- 3) ที่ด้านบนเดิมสารเจือฟอสฟอรัสเป็นสารเจือชนิดโดเนอร์ ความหนาแน่นมากกว่า $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ หนาน้อยกว่า $1 \text{ }\mu\text{m}$ มีความต้านทานแผ่นของชั้นเอ็นประมาณ $75 \text{ }\Omega/\square$
- 4) ที่ผิวด้านรับแสงจะมีชั้นกันการสะท้อนซิลิคอนไนไตรด์ (SiN_x) ความหนาในระดับไม่กี่นาโนเมตร ส่งผลให้ค่าดัชนีการหักเหของแสงพุ่งเข้าเซลล์ได้อย่างเหมาะสมกับย่านความยาวคลื่นของแสงบริเวณ $500\text{-}700 \text{ nm}$ ที่ตกกระทบผิวเซลล์
- 5) ที่ผิวด้านรับแสงสร้างขั้วโลหะเงิน (Silver) ลวดลายกริดด้วยเทคนิคการสกรีน (Screen printing) โดยจะออกแบบให้บัสบาร์มีขนาดกว้าง 1.5 mm หนา $20 \text{ }\mu\text{m}$ ส่วนฟิงเกอร์ออกแบบให้กว้าง $100 \text{ }\mu\text{m}$ หนา $20 \text{ }\mu\text{m}$ ระยะห่างระหว่างฟิงเกอร์ 2 mm
- 6) ที่ผิวด้านหลังสร้างขั้วโลหะอะลูมิเนียมด้วยเทคนิคการสกรีนที่มีความหนา $20 \text{ }\mu\text{m}$ นำไปแอนนัลที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างอะลูมิเนียมกับซิลิคอน จนเกิดชั้น P^+ มีความหนาประมาณ $5 \text{ }\mu\text{m}$



รูปที่ 2.15 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างอะลูมิเนียม-สนามไฟฟ้าด้านหลัง (Al-BSF)

2.3.5 การเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ในทุกโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานกว่า 20% จะมีชั้นพาหะอิสระจากชั้นฉนวนบาง ๆ ทั้งด้านรับแสงและด้านหลัง (Aberle, 2000) โดยที่ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนจะมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าส่วนหนึ่งที่สำคัญคือ การสูญเสียกำลังไฟฟ้าจากการรวมตัวกลับของพาหะในวัสดุสารกึ่งตัวนำเรียกว่า การรวมตัวใหม่ของพาหะหรือพาหะถูกกับดักที่ระดับแทร์ป (Recombination at Trap center) และนอกจากการรวมตัวใหม่ของพาหะระดับแทร์ปแล้วยังมีการรวมตัวใหม่ของพาหะตัวที่ผิวสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนจากแถบความนำไม่เสถียรตกกลับไปยังกับดักหรือโฮลในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานเข้าไปแต่ถูกกับดักที่ระดับพลังงานแทร์ป สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎี Shockley-Read-Hall (Shockley & Read Jr, 1952) อัตราการรวมตัวที่ผิว (U_s) ที่ระดับพลังงานใด ๆ แสดงได้ดังสมการที่ (2.31)

$$U_s = \frac{n_s p_s - n_i^2}{\frac{n_s + n_1}{S_{p0}} + \frac{p_s + p_1}{S_{n0}}} \quad (2.31)$$

โดยที่ U_s คืออัตราการรวมตัวใหม่ที่ผิว

n_s คือความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนที่ผิว

p_s คือความหนาแน่นของพาหะโฮลที่ผิว

n_i คือความหนาแน่นของพาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก

n_1 คือความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำที่ระดับพลังงานแถบความนำ

p_1 คือความหนาแน่นของพาหะโฮลในสารกึ่งตัวนำที่ระดับพลังงานแถบความนำ

S_{n0} คือความเร็วของการรวมตัวใหม่ที่ผิวของพาหะอิเล็กตรอน

S_{p0} คือความเร็วของการรวมตัวใหม่ที่ผิวของพาหะโฮล

นอกจากอัตราการรวมตัวใหม่ที่ผิวยังมี อัตราการรวมตัวในเนื้อของสารกึ่งตัวนำ (U_b) สามารถหาได้จากสมการ (2.32)

$$U_b = \frac{\Delta n}{\tau_b} \quad (2.32)$$

โดยที่ Δn คือความหนาแน่นของพาหะส่วนเกิน

τ_b คือค่าช่วงเวลาอายุของพาหะ (lifetime)

ความเร็วสุทธิของการการรวมตัวใหม่ของพาหะ (S_{eff}) ในกรณีได้รับพลังงานโฟโตเข้ากระตุ้นสามารถหาจากสมการที่ (2.33)

$$S_{eff} = \frac{U_s}{\Delta n_{(x=d)}} \quad (2.33)$$

โดยที่ $\Delta n_{(x=d)}$ คือความหนาแน่นของพาหะส่วนเกินที่ตำแหน่งขอบเขตปลอดพาหะรอยต่อพี-เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์

ความสัมพันธ์ที่ได้จากทฤษฎี Shockley-Read-Hall แสดงถึงผลของความหนาแน่นของพาหะที่ผิวถ้ามีค่าสูง ๆ จะทำให้เกิดอัตราการรวมตัวใหม่จะสูงตามไปด้วยดังสมการที่ (2.1) จากสมการดังกล่าว มีข้อพิจารณาเพื่อการลดอัตราการรวมตัวใหม่ที่ผิว โดยการลดความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนและพาหะโฮลที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ (n_s, p_s) เนื่องจากกระบวนการรวมตัวใหม่แบบ Shockley-Read-Hall เกิดจากคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮลความหนาแน่นสูงจะมีอัตราการรวมตัวใหม่ที่ผิวที่สูง ถ้าลดพาหะอิเล็กตรอน-โฮลดังกล่าวได้ อัตราการรวมตัวใหม่ก็จะลดลง วิธีการคือการสร้างสนามไฟฟ้าให้กับบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำ การเกิดสนามไฟฟ้ากระทำได้ 2 แบบคือ

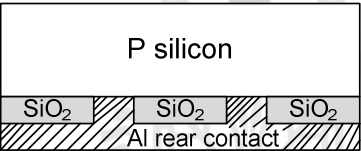
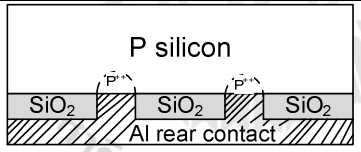
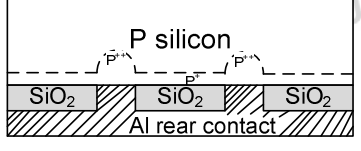
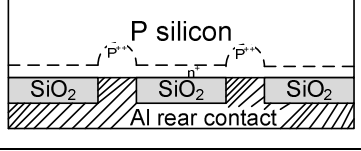
- 1) สร้างชั้นรอยต่อที่ให้ความเข้มข้นสารเจือต่างกัน เช่น รอยต่อซิลิคอนชนิดพีกับชนิดพี ความเข้มข้นสารเจือสูง (p/p^+) หรือรอยต่อซิลิคอนชนิดเอ็นกับชนิดเอ็นความเข้มข้นสารเจือสูง (n/n^+)
- 2) การสร้างชั้นพาสซีเวชันของไดออกไซด์ทริกบาง ๆ เพื่อให้เกิดประกฎภายใต้ชั้นฉนวนนั้น การรวมตัวของพาหะที่ผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะเกิดขึ้นง่ายและมีอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะที่สูงรวมถึงที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำกับขั้วไฟฟ้าก็มีอัตราที่สูงด้วยเช่นกัน การรวมตัวใหม่ของพาหะลักษณะนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียกระแสไฟฟ้าลัดวงจร วิธีการลดอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะดังกล่าวมีวิธีการที่นำมาใช้แก้ปัญหา ดังนี้

- 1) สร้างชั้นไดออกไซด์ทริกเพื่อเป็นชั้นพาสซีเวชันและเป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสง (ARC) ที่ผิวด้านรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนในตัวเดียวกัน โดยที่ชั้นไดออกไซด์ทริกดังกล่าวใช้เทคนิคการออกซิเดชันด้วยความร้อน (Thermal oxidation) ที่อุณหภูมิสูงประมาณ $1,000^\circ\text{C}$ ความหนาแน่นของฟิล์มออกไซด์ซิลิคอน (SiO_2) ที่ได้ประมาณ $10^{-9} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ และความต้านทานผิวฟิล์มมีค่าประมาณ 100 โอห์ม-เซนติเมตร ในเซลล์แสงอาทิตย์ปัจจุบันได้นำวิธีการสร้างชั้นไดออกไซด์ทริกนี้มาใช้สร้างชั้นไดออกไซด์ทริกสำหรับสร้างสนามไฟฟ้าที่ด้านหลัง เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง

ดังกล่าวประกอบด้วย อะลูมิเนียมที่ผ่านการ firing จะได้ p^+ เกิดเป็นสนามไฟฟ้าที่ด้านหลัง (Al-BSF) มีลักษณะ p^+/p ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน

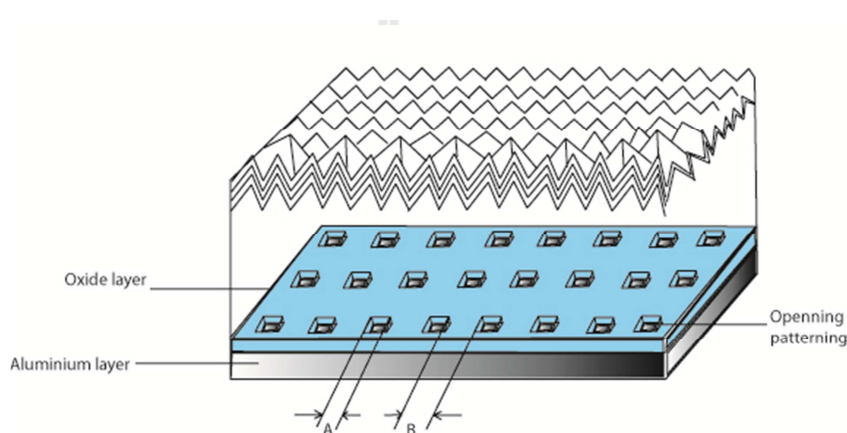
2) การสร้างชั้นพาหะเวชันที่ผิวด้านหลังบางบริเวณพื้นที่ (Local back surface field: LBSF) จากข้อดีของการสร้างสนามไฟฟ้าและการทำชั้นพาหะเวชัน ทำให้นำมาสู่วิธีการรวมชั้นสร้างสนามไฟฟ้าและชั้นพาหะเวชันที่ผิวด้านหลังในเซลล์พร้อมกันเพื่อทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงที่สุดจากการลดการสูญเสียในบริเวณต่าง ๆ ให้มากที่สุด โครงสร้างที่นำการสร้างสนามไฟฟ้าและทำชั้นพาหะเวชันที่ผิวด้านหลังในเซลล์นี้แสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบต่าง ๆ ที่นำชั้นพาหะเวชันที่ผิวด้านหลัง(LBSF) มาใช้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Utama, 2009)

ชื่อโครงสร้าง เซลล์แสงอาทิตย์	แผนภาพการออกแบบพาหะเวชัน ด้านหลังเซลล์	แรงดันเปิดวงจร (mV)	ประสิทธิภาพ เซลล์แสงอาทิตย์ (η)
PERC		696	22.8%
PERL		696	24%
PERT		707	23%
PERF		714	23%

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำหลักการสนามไฟฟ้าและชั้นพาหะเวชันที่ผิวด้านหลังมาใช้ เพื่อให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจรและแรงดันเปิดวงจรของเซลล์สูงขึ้น ส่งผลถึงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงขึ้นด้วย สำหรับการสร้างชั้นสนามไฟฟ้าที่ผิวด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์ในตารางที่ 2.3 ได้มีการทดลองรูปแบบลวดลายช่องเปิดชั้นออกไซด์ซิลิคอนเป็นพื้นที่ช่องเล็กที่ทำเช่นนี้

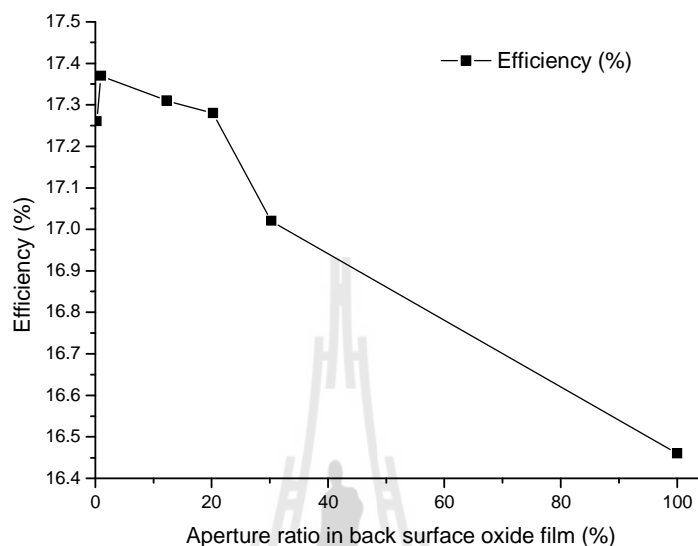
เนื่องจากอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิดที่เติมเจือแบบเข้มข้น (p^+) กับระยะห่างระหว่างช่องเปิดมีผลต่ออัตราการรวมตัวที่ผิวและค่าช่วงชีวิตของพาหะ จากการศึกษาวิจัยจากนักวิจัยหลายกลุ่มต้องการหาช่วงระยะช่องเปิดที่มีความเหมาะสมและได้ผลที่ดีที่สุดจึงได้มีการจดสิทธิบัตรการออกแบบลวดลายของช่องสนามไฟฟ้าที่ผิวด้านหลัง รายละเอียดการคำนวณและการสร้างแสดงในเอกสารการจดสิทธิบัตรเรื่อง space solar cell (Katsu, 2002) ได้สร้างชั้นพาสซีเวชันด้านหลังเซลล์ได้มีการออกแบบพื้นที่ช่องสารเจือที่เข้มข้น (p^+) และระยะห่างระหว่างช่องนั้นมีอัตราส่วนอยู่ระหว่าง 0.25-30 เปอร์เซ็นต์เป็นช่วงที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงที่สุด



รูปที่ 2.16 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพาสซีเวชันที่ผิวด้านหลัง (LBSF)

ในรูปที่ 2.16 แสดงส่วนของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเปิดช่องไดอิเล็กทริกด้านหลังเซลล์ โดยที่ A คือระยะของความกว้างช่องเปิด และ B คือระยะห่างระหว่างช่องเปิด จากการศึกษาพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนของความยาวพื้นที่ต่อระยะห่างของช่องมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีการออกแบบอัตราส่วนของพื้นที่สี่เหลี่ยมช่องเปิดต่อพื้นที่สี่เหลี่ยมของระยะห่างของช่อง โดยใช้แผ่นฐานขนาด 69x36 ตารางมิลลิเมตร และแสดงรายละเอียดคือ ทำการสร้างช่องเปิดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้านละ 70 μm และช่องเปิดแต่ละช่องห่างกัน 200 μm จะได้จำนวนช่องเปิดส่วนความยาวของพื้นที่เซลล์ 345 ช่อง และจำนวนช่องเปิดส่วนความกว้างของพื้นที่เซลล์ 180 ช่อง จะได้จำนวนช่องเปิดต่อพื้นที่ทั้งหมดเป็น $180 \times 345 = 62,100$ ช่องแต่ส่วนที่นำไปคำนวณคือ อัตราส่วนของความพื้นที่สี่เหลี่ยมช่องเปิดต่อพื้นที่สี่เหลี่ยมของระยะห่างของช่อง $\frac{(70 \times 70)}{(200 \times 200)} = 0.1225$ คิดเป็น 12.25% หรือสร้างช่องเปิดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้านละ 30 μm และช่องเปิดแต่ละช่องห่างกัน 300 μm จะได้จำนวนช่องเปิดส่วนความยาวของพื้นที่เซลล์ 230 ช่อง และจำนวนช่องเปิดส่วนความกว้างของพื้นที่เซลล์ 120 ช่อง จะได้จำนวนช่องเปิดต่อพื้นที่ทั้งหมดเป็น

230x120 = 27,600 ช่อง จะได้อัตราส่วนของความพื้นที่สี่เหลี่ยมช่องเปิดต่อพื้นที่สี่เหลี่ยมของ
 ระยะห่างของช่อง $\frac{(30 \times 30)}{(300 \times 300)} = 0.01$ คิดเป็น 1%



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ระยะห่างที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

จากกราฟความสัมพันธ์รูปที่ 2.17 อัตราส่วนของพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ระยะห่างกับประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าอัตราส่วนช่องเปิดต่อพื้นที่ชั้นไดโอดเล็กทรอนิกส์มากกว่า 20% แล้วค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะต่ำลงมากอย่างเห็นได้ชัดเจน อัตราส่วนช่องเปิดต่อพื้นที่ชั้นไดโอดเล็กทรอนิกส์ที่ต่ำกว่า 20% จะมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่ใกล้เคียงกันระหว่าง 17.25% -17.37% และมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงที่สุดที่อัตราส่วนช่องเปิดเท่ากับ 1% ได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 17.37% ดังนั้นในการออกแบบในบทต่อไปจะนำค่าอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ระยะห่างช่องเปิด เป็นเงื่อนไขในการออกแบบการทดลองจากความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วย

2.4 สรุป

บทที่ 2 นี้ได้นำเสนอรายงานผลการสืบค้นวรรณกรรมและงานวิจัยย้อนหลังที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ จากฐานข้อมูล IEEE Science Direct Applied physics letters และอื่น ๆ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง แนวคิดที่ผู้วิจัยอื่น ๆ ได้นำมาใช้ ผลการดำเนินงาน

ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณະนักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรม งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความเป็นมาของเซลล์แสงอาทิตย์ การเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการสร้างชั้นพาสซีเวชันด้านหลังเซลล์และแนวทางการประยุกต์ใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีดกับกระบวนการสร้างลวดลายช่องเปิดไดโอดีทรกในชั้นพาสซีเวชันของเซลล์แสงอาทิตย์



บทที่ 3

การศึกษาปรับปรุงเครื่องพิมพ์แบบฉีดสำหรับสร้างลวดลายชั้นพาสซีเวชัน

3.1 บทนำ

ในบทที่ 2 ได้กล่าวถึงผลของการเปิดช่องชั้น ไดโอดีเล็กทริก ที่มีต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ทำให้ทราบถึงช่วงของค่าอัตราส่วนช่องเปิดที่เหมาะสม ซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยจะมุ่งสู่การประยุกต์ใช้เครื่องพิมพ์ที่ใช้พิมพ์งานเอกสารโดยทั่วไป มาใช้ในการสร้างลวดลายช่องเปิดชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์

3.2 หลักการของเครื่องพิมพ์แบบฉีด

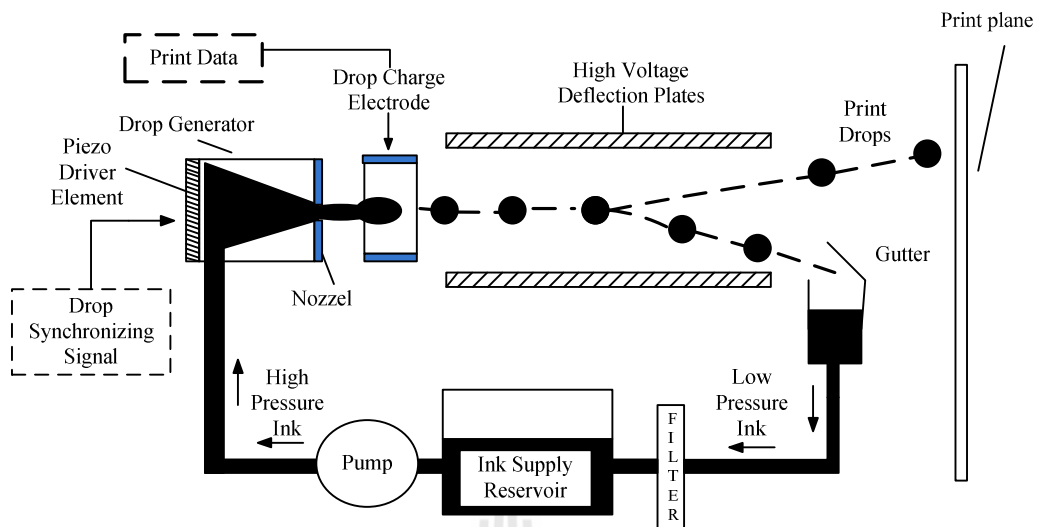
พื้นฐานการออกแบบและการใช้งานของเครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีด สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ เครื่องพิมพ์แบบหัวฉีดชนิดทำงานต่อเนื่อง (continuous inkjet) ชื่อย่อ CIJ และเครื่องพิมพ์แบบหัวฉีดชนิดหยดตามคำคำสั่ง (drop-on-demand inkjet) ชื่อย่อ DOD

3.2.1 หลักการของเครื่องพิมพ์แบบฉีดชนิดทำงานต่อเนื่อง

เครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดแบบทำงานต่อเนื่องมีหลักการทำงานคือ หยดหมึกทำให้มีประจุไฟฟ้า (charge) แล้วหักเหในสนามไฟฟ้าไปยังแผ่นสื่อ ณ ตำแหน่งที่ต้องการแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 เครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดแบบทำงานต่อเนื่องมีข้อดีคือ สามารถสร้างงานพิมพ์ได้รวดเร็ว อาจแบ่งย่อยได้เป็น 2 แบบคือ

1) ระบบหักเหสองทิศทาง (Binary deflection system) ระบบนี้หยดหมึกที่ถูกชาร์จออกมาวิ่งตรงไปติดบนแผ่นสื่อส่วนที่ไม่ได้ชาร์จ (uncharged) และจะหักเหไปกระทบสันดักจับของระบบหมุนเวียนกลับ (recirculation)

2) ระบบหักเหหลายทิศทาง (Multiple deflection system) ระบบนี้หยดหมึกที่ทำให้มีประจุจะวิ่งหักเหด้วยมุมที่แตกต่างกัน ไปติดบนแผ่นสื่อ ตามตำแหน่งที่ต้องการ ส่วนที่ไม่มีประจุจะวิ่งตรงไปกระทบสันดักจับของระบบ หมุนเวียนกลับไปใช้ใหม่ ทั้งสองระบบถูกใช้ในงานจำพวก การสร้างรหัส (coding) การทำเครื่องหมาย (marking) และการทำฉลาก (labeling market)



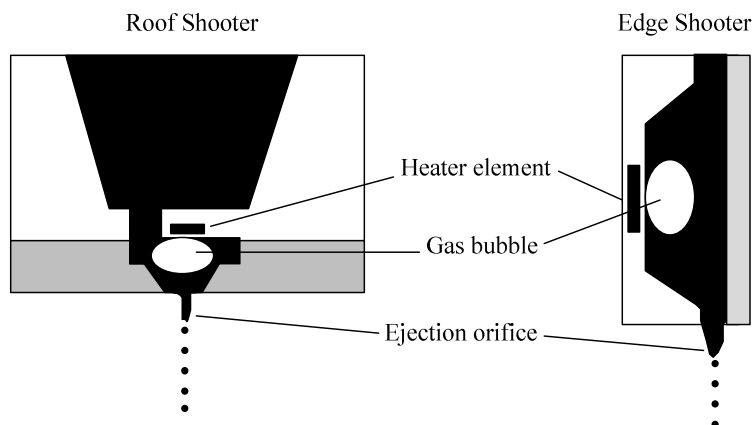
รูปที่ 3.1 การทำงานเครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดแบบทำงานต่อเนื่อง (Pond, 2000)

3.2.2 หลักการของเครื่องพิมพ์แบบฉีดชนิดหยุดตามคำสั่ง

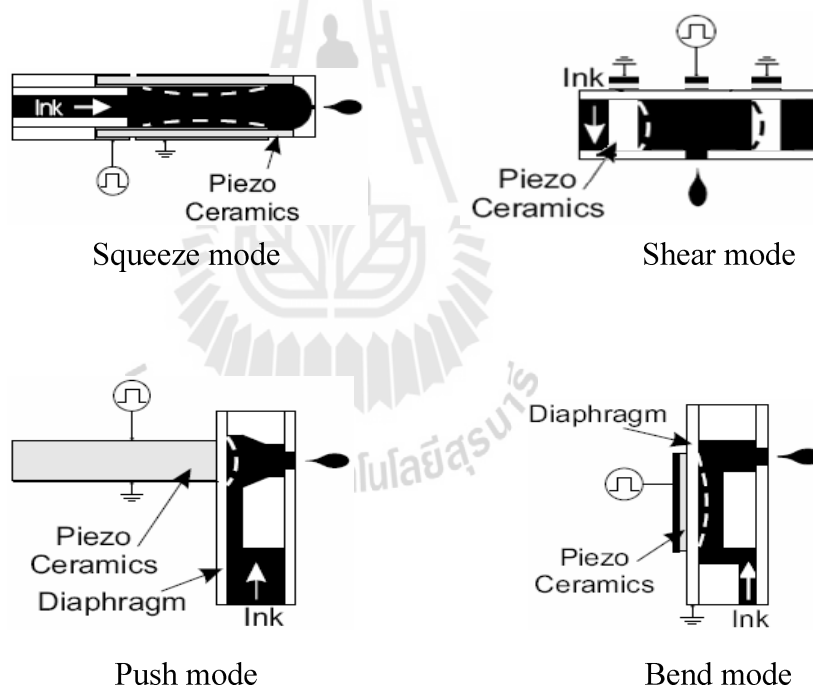
หลักการทำงานของเครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดแบบหยุดตามคำสั่ง (drop-on-demand) ใช้หลักการหยุดตามคำสั่งโดยให้หยดสารพุ่งออกมาโดยตรงไม่มีการหักเหซึ่งแตกต่างจากหลักการ CIJ และเรียกหลักการนี้ว่า DOD ซึ่งขั้นตอนในการทำงานของหลักการ DOD มีข้อดีคือใช้สารเฉพาะส่วนที่เรียกใช้ไม่เหลือกลับมาใช้ใหม่เหมือนหลักการ CIJ โดยอาจแบ่งย่อยได้เป็น 2 แบบคือ

1) ระบบการฉีดเชิงความร้อน (Thermal inkjet or Bubble jet) ใช้หลักการให้ความร้อนจากขดลวดความร้อน (heater) ทำให้เกิดไอน้ำขยายตัวและดันให้สารพุ่งแตกออกเป็นหยดเล็กๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.2

2) ระบบการฉีดชนิดเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric inkjet) ใช้การบิดเบือนที่ผิดปกติไป (deformation mode) ของระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ทำให้เกิดการสั่นสามารถควบคุมปริมาณสารที่ไหลผ่านช่องทางเดินไปสู่หัวฉีดได้ ทำให้มีความแตกต่างจากระบบการฉีดเชิงความร้อนแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 การทำงานเครื่องพิมพ์แบบหยดตามคำสั่งระบบการฉีดเชิงความร้อน (Lee, 2010)



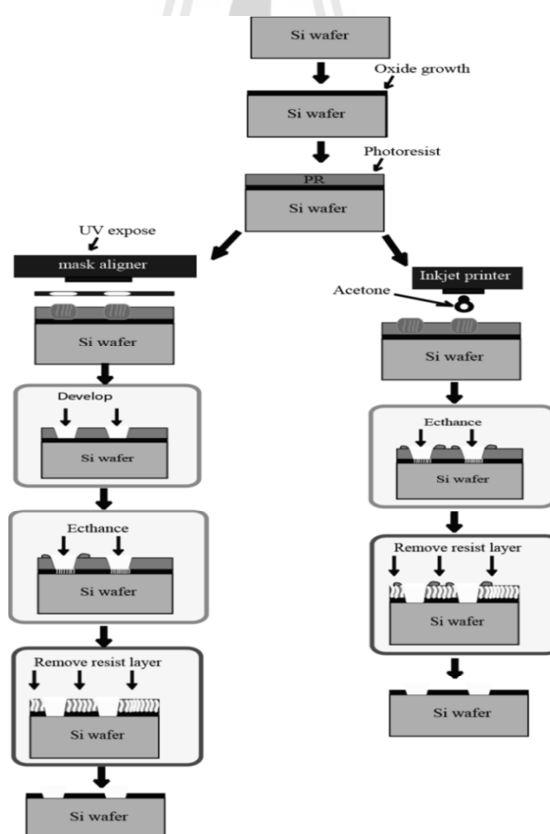
รูปที่ 3.3 การทำงานเครื่องพิมพ์ระบบการฉีดชนิดเพียโซอิเล็กทริก (Utama, 2009)

3.3 การสร้างลวดลายช่องเปิดชั้นพาสซีเวชันด้วยเทคนิคการใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีด

ในปัจจุบันการสร้างแบบลวดลายในแบบพิมพ์ลาย (screen printed) เป็นกระบวนการที่สำคัญสำหรับการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ใช้ในกระบวนการสร้างรอยต่อโลหะให้กับเซลล์

แต่สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERL ที่ให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุดนั้น กระบวนการหลักได้ใช้เทคนิคโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography technique) ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีกระบวนการสร้างซับซ้อนและมีต้นทุนสูงจากการวางรูปแบบหน้ากาทำให้เกิดลวดลายจากการฉายแสง UV การล้างภาพลวดลาย เป็นต้น อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในเรื่องของขนาด จำนวนชิ้นงานที่ได้ต่อการสร้างลวดลายในหนึ่งรอบการผลิต รวมถึงความเข้มแสงของหลอด UV ที่มีอายุการใช้งานที่จำกัดจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาเครื่องพิมพ์แบบฉีดมาใช้ในการสร้างลวดลาย ซึ่งมีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน ไม่ต้องมีชุดหน้ากาต้นแบบและไม่ต้องทำการเปิดลวดลายด้วยกระบวนการล้างด้วย Developer เพียงออกแบบด้วยคำสั่งในคอมพิวเตอร์ไปยังเครื่องพิมพ์เมื่อส่งฉีดสารก็สามารถสร้างลวดลายได้ตามต้องการและสร้างได้จำนวนมากต่อรอบการผลิต

ข้อแตกต่างของกระบวนการสร้างลวดลายด้วยเทคนิคโฟโตลิโทกราฟีกับเทคนิคการใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีดแสดงได้ดังแผนภาพกระบวนการรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภาพเปรียบเทียบกระบวนการสร้างลวดลายด้วยเทคนิคโฟโตลิโทกราฟีกับเทคนิคการฉีดด้วยเครื่องพิมพ์

3.4 การออกแบบและปรับปรุงเครื่องพิมพ์แบบฉีดเพื่อใช้กับแผ่นฐานซิลิคอน

การดัดแปลงเครื่องพิมพ์ในโครงการนี้ใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีด (Inkjet printer) ปรับปรุงให้สามารถเคลื่อนที่ในแนวระนาบและใช้กับแผ่นฐานซิลิคอน มีหัวฉีดแบบหยดตามคำสั่งระบบการฉีดเชิงความร้อน ของเครื่องพิมพ์ยี่ห้อ canon รุ่น pixma ip 1980 ซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะนำมาดัดแปลงให้สามารถเคลื่อนที่ในแนวระนาบและใช้กับแผ่นฐานซิลิคอนได้ มีหลายประการ เช่น มีโครงสร้างที่ง่ายต่อการดัดแปลง มีราคาเหมาะสมกับการนำมาดัดแปลง มีตลับหมึกพิมพ์แยกกับตัวโครงสร้างทำให้ง่ายต่อการบำรุงรักษาหากเกิดการอุดตันของช่องทางเดินสารหรือหัวฉีด คุณสมบัติเหล่านี้เองที่เป็นข้อมูลที่ตัดสินใจเลือกที่จะดัดแปลงเครื่องพิมพ์แบบฉีด (Inkjet printer) ในครั้งนี้ การออกเครื่องพิมพ์สำหรับการใช้กับการเปิดช่องชั้นสารกึ่งตัวนำในครั้งนี้นำเฉพาะบางส่วนมาใช้เท่านั้น เนื่องจากการประยุกต์ใช้ในงานที่แตกต่างไปจากการใช้งานกระดาษธรรมดาซึ่งส่วนที่เหลือจะเป็นการออกแบบและสร้างชิ้นใหม่โดยเน้นการทำงานที่เป็นแนวระนาบกับชิ้นงานที่เป็นแผ่นฐานซิลิคอนซึ่งส่วนประกอบแสดงให้เห็นในหัวข้อที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

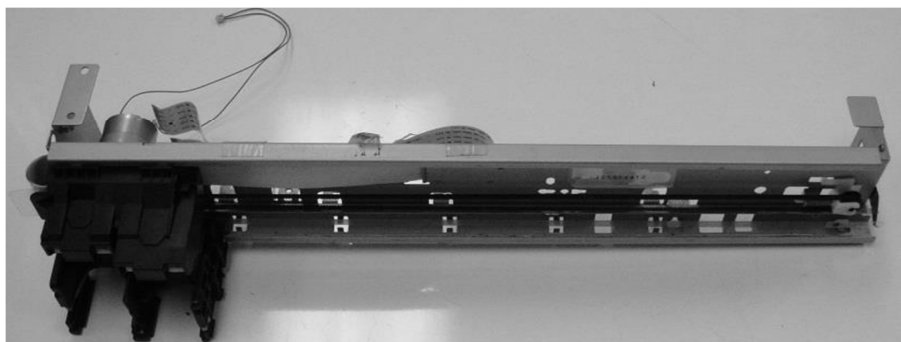
3.4.1 ส่วนประกอบทั้งหมดของเครื่องพิมพ์แบบฉีดที่นำมาใช้

อุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบหลักของเครื่องพิมพ์แบบฉีด และส่วนที่ออกแบบเพิ่มมีดังนี้

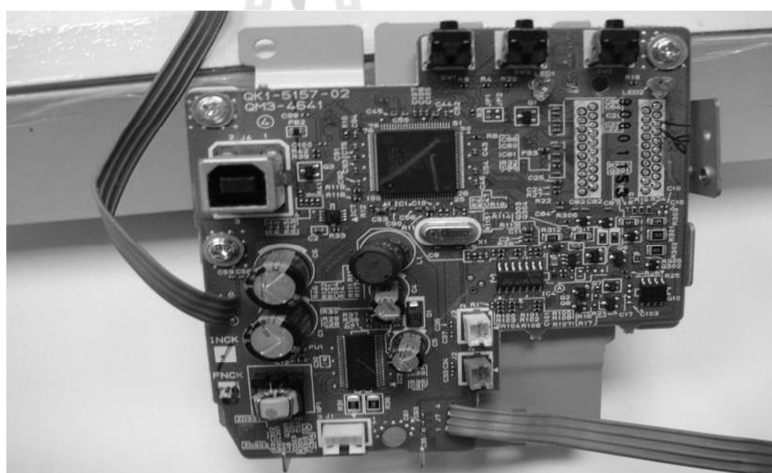
1) โครงยึดและที่เลื่อนหัวหมึกพิมพ์ มีลักษณะเป็น โครงยึดหัวหมึกพิมพ์และสามารถเคลื่อนที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยมีมอเตอร์เป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่รับคำสั่งจากแผงวงจรควบคุมการทำงานที่ตำแหน่งใดบนชิ้นงานที่เป็นแผ่นฐานรองรับหมึกนั้น ส่วนการประกอบตลับหมึกพิมพ์นั้นจะสร้างเป็นบล็อกให้สามารถถอดเข้าออกได้ ทำงานโดยการรับคำสั่งจากแผงวงจรควบคุมการทำงานเช่นกัน โดยการเปลี่ยนไฟฟ้าให้เป็นความร้อนจากชุดขดลวดความร้อนซึ่งเป็นหลักการทำงานของเครื่องพิมพ์แบบกระตุ้นด้วยความร้อน (Thermal Inkjet Printer) หมึกก็จะไหลตามการกระตุ้นดังกล่าว โดยหัวใดที่ถูกกระตุ้นทำงานก็จะขึ้นอ๊อกก็จะทำงานตามที่ได้โปรแกรมไว้ในแผงวงจรควบคุมการทำงาน

2) แผงวงจรควบคุมการทำงาน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับโปรแกรมคำสั่งของแผงวงจรควบคุมการทำงานนับว่าส่วนนี้เป็นหัวใจหลักของเครื่องพิมพ์แบบฉีด การรับคำสั่งการทำงานนั้นแผงวงจรควบคุมการทำงานจะรับคำสั่งจากข้อมูลที่ได้อ่านเข้าสู่แผงวงจรควบคุมการทำงานซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่รับเข้ามานั้นจะถูกแปลงให้เป็นปริมาณไฟฟ้าไปสั่งการมอเตอร์ในส่วนต่าง ๆ และขดลวดความร้อน ทำให้ชิ้นงานถูกเลื่อนเป็นจังหวะและหมึกจะถูกพ่นออกมาตามจังหวะ

การให้ความร้อนของขดลวดความร้อนต่อช่องหัวฉีดนั้น ๆ แผงวงจรควบคุมการทำงานแสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 โครงยึดและเลื่อนหัวหมึกพิมพ์



รูปที่ 3.6 แผงวงจรควบคุมการทำงานทุกส่วนของเครื่องพิมพ์แบบฉีด

3) ตลับหมึกพิมพ์ นับว่ามีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าแผงวงจรควบคุมการทำงานเนื่องจากเป็นส่วนที่รับคำสั่งทำงานจากแผงวงจรควบคุมการทำงาน เครื่องพิมพ์ที่นำมาใช้เป็นเครื่องพิมพ์ที่หัวฉีดใช้หลักการ DOD แบบกระตุ้นด้วยความร้อน (Thermal) แบบ Roof shooter เป็นระบบที่อาศัยแรงดันจากไอน้ำที่ได้จากการแปลงไฟฟ้าให้เป็นความร้อนด้วยขดลวดความร้อนผลัดให้หมึกที่อยู่บริเวณทางออกของหัวฉีด นั้นออกมาติดกับชิ้นงานที่ต้องการ ซึ่งจากข้อมูลในคู่มือของเครื่องพิมพ์แบบฉีดนี้ แบ่งตลับหมึกออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนหมึกดำและส่วนที่เป็นหมึกสี หัวฉีด

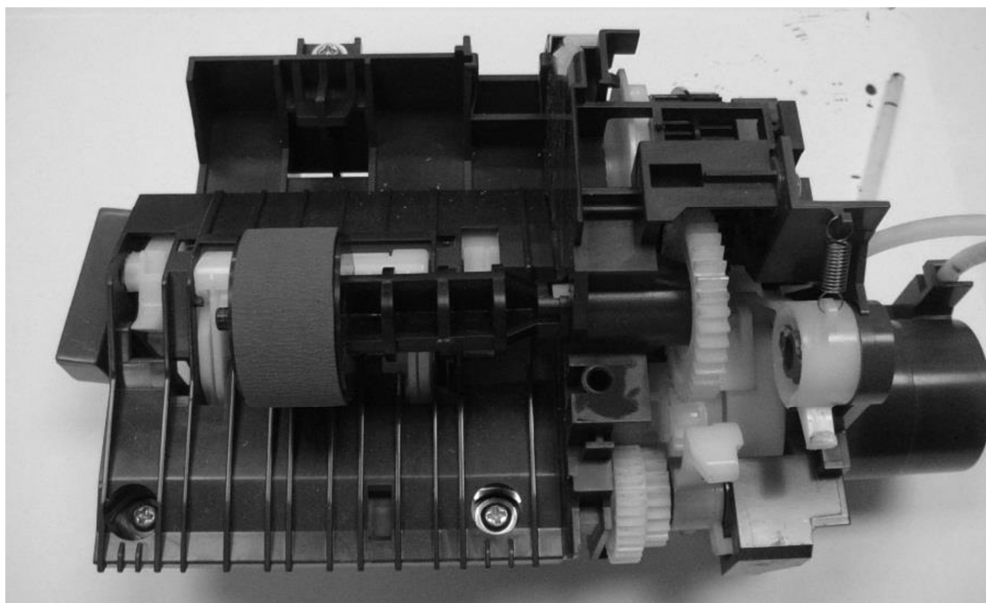
หมึกดำมีจำนวน 320 หัว และหัวฉีดหมึกสีมีจำนวน 384 หัว การทำงานของหัวฉีดขึ้นอยู่กับคำสั่งของวงจรควบคุม ตลับหมึกพิมพ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตลับหมึกพิมพ์

4) ชุดกลไกการเริ่มทำงาน เป็นส่วนที่จะขาดไม่ได้ในเครื่องพิมพ์แบบฉีดทั่วไป งานวิจัยนี้ก็เช่นกันมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากยังหาอุปกรณ์มาทดแทนการทำงานของชุดกลไกการเริ่มทำงานไม่ได้ ต้องมีชุดกลไกการเริ่มทำงานเสริมเข้าไปด้วยใน โครงสร้างของงานวิจัยนี้ มีหลักการทำงานเริ่มจาก รับการหมุนจากแกนขับเคลื่อนให้ฐานรองเคลื่อนที่ไปตามช่องทางเดินฐานรอง เพื่อจะจับรอบการทำงาน โดยการตรวจชิ้นงานตัวอย่างที่เข้าสู่ตำแหน่งที่กำหนด ทำให้ไคนเซนเซอร์ตรวจการทำงานสัมพันธ์กับชิ้นงาน เครื่องจะสั่งการให้โครงยึดและเลื่อนหัวหมึกพิมพ์และมอเตอร์ทุกตัวที่เกี่ยวข้องทำงาน หากเซนเซอร์จับรอบทำงานไม่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของกระดาษ ตัวอย่าง วงจรควบคุมการทำงานจะแจ้งไปที่คอมพิวเตอร์สั่งการนั้นว่ากระดาษติด การแก้ไขให้นำกระดาษที่ติดออกโดยการกดปุ่มเลื่อนกระดาษซึ่งปุ่มนี้สามารถสั่งยกเลิกการทำงานได้ในขณะที่เครื่องกำลังทำงาน ชุดกลไกการเริ่มทำงานแสดงได้ดังรูปที่ 3.8

5) แกนขับเคลื่อนกลไก ซึ่งจะทำงานได้นั้นต้องได้รับทอร์กการหมุนจากมอเตอร์ควบคุมการเคลื่อนที่ของฐานรองซึ่งมอเตอร์นี้มีการควบคุมการหมุนด้วยเอนโคเดอร์ (Encoder) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ให้มีความเร็วตามที่ได้โปรแกรมไว้ แกนขับเคลื่อนชุดกลไกแสดงได้ดังรูปที่ 3.9

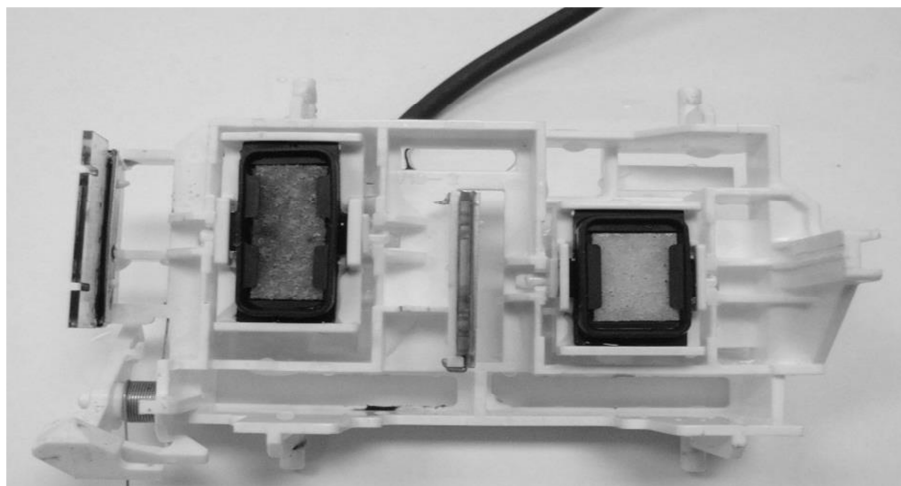


รูปที่ 3.8 ชุดกลไกการเริ่มทำงาน



รูปที่ 3.9 แกนขับเคลื่อนชุดกลไกการเริ่มทำงาน

6) ชุดขับเคลื่อนก่อนการพิมพ์ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อฉีดหมึกทดสอบให้เกิดความต่อเนื่องของของเหลวที่ใช้ ชุดขับเคลื่อนจะทำหน้าที่ดูดหมึกที่ถูกปล่อยออกมานั้นไปเก็บไว้โดยไม่ให้กระจายในบริเวณช่องเก็บตลับหมึกส่งผลให้หัวฉีดทำงานเป็นปกติ การที่จะดูดหมึกได้นั้นต้องมีแรงดูด ซึ่งในที่นี้จะใช้ปั๊มดูดขนาดเล็ก ที่เป็นส่วนประกอบหนึ่งของชุดกลไกการเริ่มทำงานมาช่วย และชุดขับเคลื่อนนี้ยังเป็นตัวเก็บรักษาตลับหมึก ไม่ให้ถูกรบกวนจากฝุ่นผงจนเกิดการอุดตันของหัวฉีด ในขณะที่ไม่มีการใช้งานชุดขับเคลื่อนก่อนการพิมพ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.10



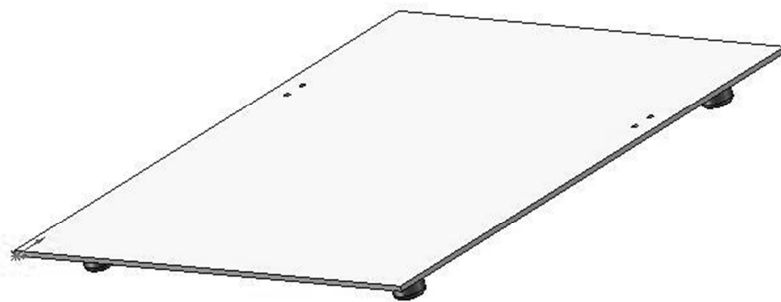
รูปที่ 3.10 ชุดจับหมึกก่อนการพิมพ์

3.4.2 ส่วนที่ออกแบบเพิ่มเติม

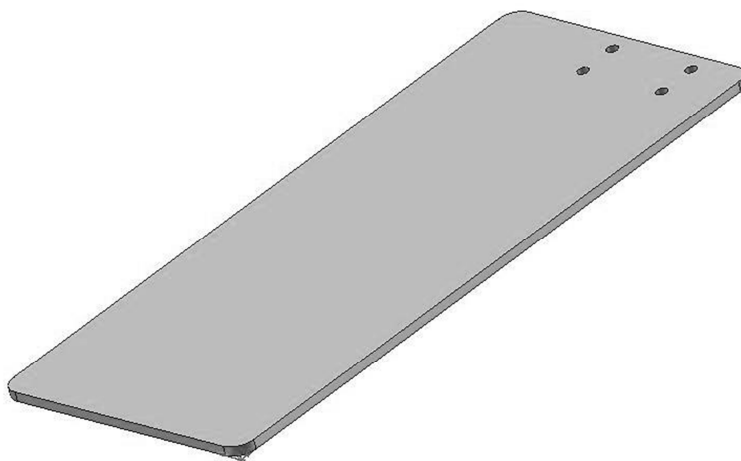
เนื่องจากอุปกรณ์ด้าน โครงสร้างของเครื่องพิมพ์เดิมเป็นอุปกรณ์ที่รองรับการพิมพ์ ด้วยกระดาษจึงต้องออกแบบอุปกรณ์เพิ่มเติมมีดังนี้

1) ฐานรองอุปกรณ์ เครื่องพิมพ์แบบชนิดนี้ มีความกว้างของโครงประมาณ 40 cm จึงได้ ออกแบบให้มีความกว้างและความยาว 50 cm ซึ่งต้องเผื่อขาตั้งของ โครงเลื่อนหัวพิมพ์ด้านละ 5 cm ฐานรองอุปกรณ์นี้จึงเป็นชิ้นส่วนที่รองรับอุปกรณ์ทั้งหมดที่ออกแบบไว้

2) ฐานรองชิ้นงาน เป็นส่วนที่อยู่ติดกับชิ้นงานการออกแบบต้องให้เลื่อนได้ทดแทนการ เคลื่อนที่ของกระดาษจากการใช้งานเดิม และเนื่องจากการตัดแปลงนี้ต้องใช้พื้นที่ของช่องทางเดิน ชิ้นงานเป็นส่วนที่ติดตั้งชุดกลไกดึงการเริ่มทำงานมีขนาดกว้าง 16 cm และยาว 36 cm ดังนั้นความ กว้างของช่องทางเดินชิ้นงานจะแคบลงเท่ากับความกว้างของชุดกลไกดึงการเริ่มทำงาน ดังนั้นการ ออกแบบสั่งการทำงานในคอมพิวเตอร์ต้องเว้นพื้นที่การทำงานบริเวณที่เป็นชุดกลไกดึงกระดาษ ฐานรองชิ้นงานนี้ต้องสามารถเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นจึงได้เชื่อมต่อฐานรองชิ้นงานกับรางเลื่อน และ วัสดุที่ทำให้เคลื่อนที่ได้ ติดด้านล่างของฐานรองชิ้นงานซึ่งสัมผัสกับแกนขับเคลื่อน การทำงานของ ฐานรองชิ้นงานจะทำงานได้เมื่อเครื่องพิมพ์แบบชนิด พร้อมทำงานโดยจะถูกลบออก โดยมอเตอร์ที่ยึด ฐานรองชิ้นงานอยู่ออกมาซึ่งมอเตอร์นี้จะทำงานเมื่อเครื่องพิมพ์แบบชนิด พร้อมทำงานเช่นเดียวกับ ฐานรองชิ้นงาน

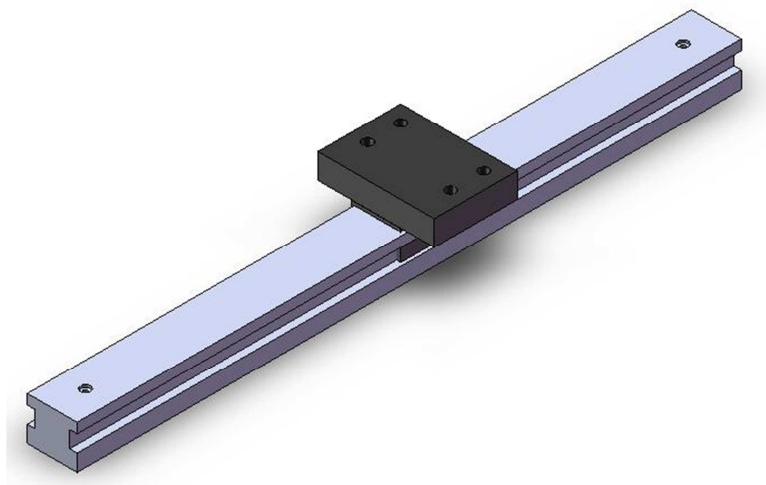


รูปที่ 3.11 ฐานรองอุปกรณ์

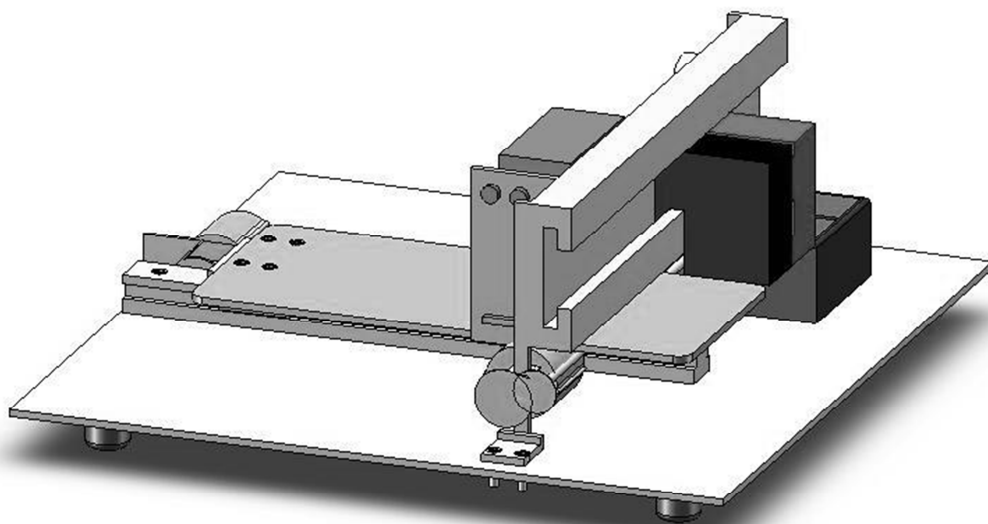


รูปที่ 3.12 ฐานรองชิ้นงาน

3) รางเลื่อนฐานรองชิ้นงาน เป็นชิ้นส่วนที่อยู่ติดกับฐานรองชิ้นงานซึ่งจากที่ออกแบบนั้นไม่สามารถระบุขนาดได้แม่นยำต้องหาอุปกรณ์ชิ้นนี้ให้ได้ ก่อนที่จะเริ่มออกแบบ ซึ่งที่นำมาใช้ในโครงการนี้นั้นมีความยาวขนาด 48 cm รางเลื่อนฐานรองชิ้นงานนี้มีความเรียบลื่นในการใช้งานแม้จะได้รับน้ำหนักมากจากฐานรองอุปกรณ์ก็ตามแสดงได้ดังรูปที่ 3.13

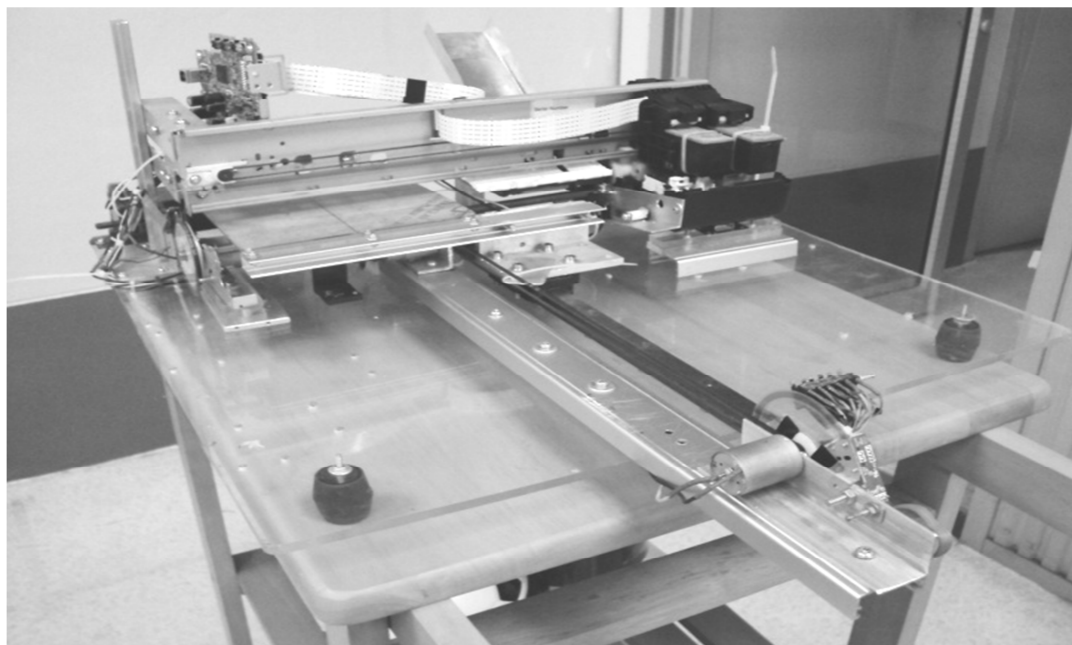


รูปที่ 3.13 ร่างเดือนฐานรองชิ้นงาน



รูปที่ 3.14 การออกแบบตัดแปลงเครื่องพิมพ์แบบฉีดในงานวิจัยนี้

จากอุปกรณ์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้ออกแบบรูปร่างอุปกรณ์ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 3.14 โดยใช้โปรแกรมการออกแบบ Solid Works ในการออกแบบเพื่อเป็นต้นแบบในการสร้างชิ้นงานจริง จากการออกแบบข้างต้นต้องปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถประกอบเข้ากับส่วนที่มากับตัวเครื่องพิมพ์แบบฉีด ตั้งแต่แรกได้ ซึ่งหลังจากนำอุปกรณ์ที่กล่าวมาแล้วนั้นนำมาประกอบจะได้เครื่องพิมพ์แบบฉีดที่ออกแบบไว้ดังนี้



รูปที่ 3.15 เครื่องพิมพ์แบบฉีด ที่ดัดแปลงสำเร็จแล้ว

3.5 การสร้างลวดลายด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด

นำแผ่นฐานซิลิคอนดังกล่าวมาทำความสะอาดโดยใช้หลักการของ RCA (Radio Corporation of America) โดยมีขั้นตอนดังนี้

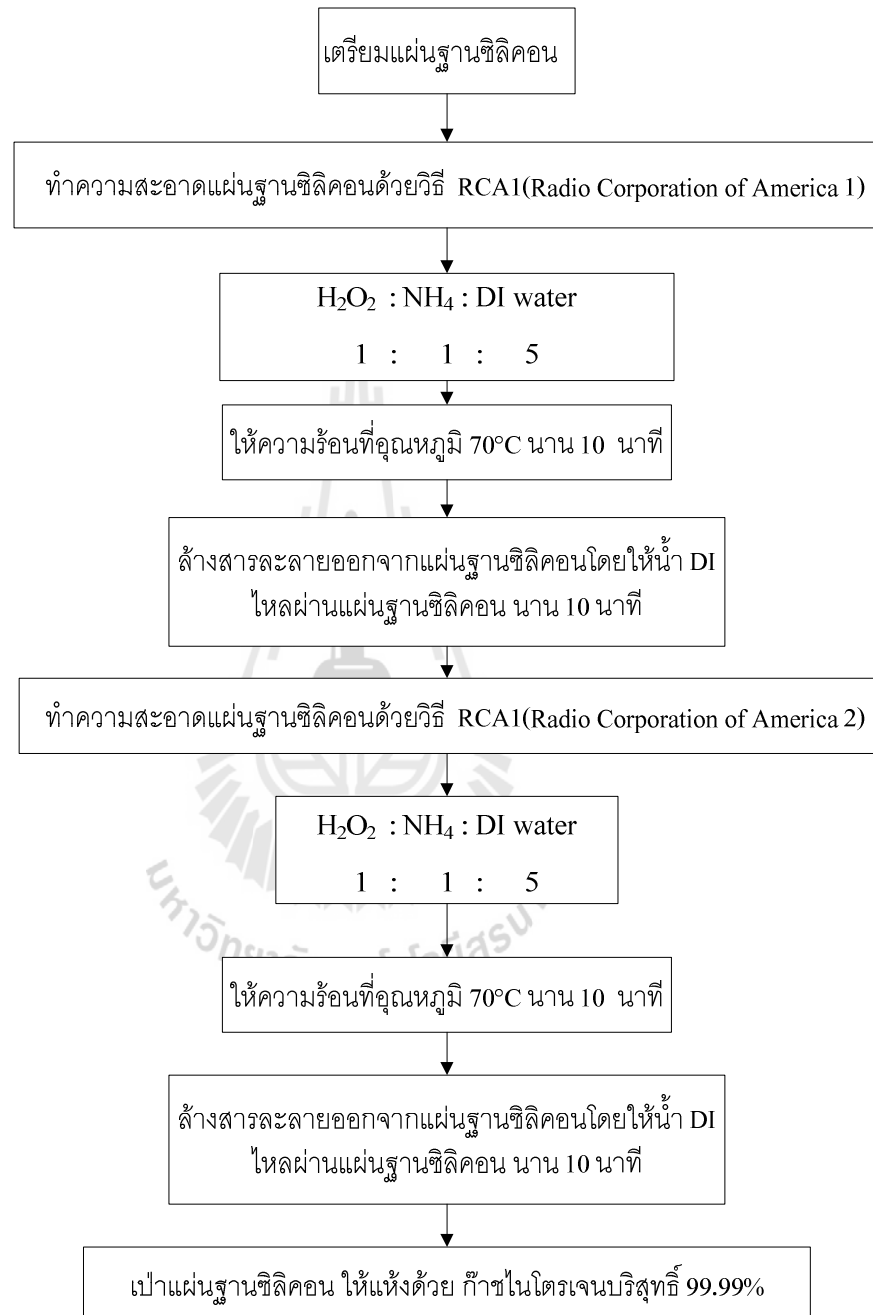
RCA 1 คือ การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเพื่อกำจัด ออแกนิก (organic) ออกจากแผ่นซิลิคอน โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนดังนี้

- เตรียมสาร H_2O_2 (30%) : NH_4 (28-30%) : น้ำ DI ที่อัตราส่วนเท่ากับ 1 : 1 : 5
- แช่แผ่นซิลิคอนลงในสารละลาย ที่อุณหภูมิคงที่ ที่ 70°C เป็นเวลา 10 นาที
- ล้างสารละลายออกจากแผ่นซิลิคอนด้วยน้ำ DI โดยให้น้ำ DI ไหลผ่านแผ่นซิลิคอนนาน 10 นาที

RCA 2 คือ การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน เพื่อกำจัด เมทัลไอออน (Metal ions) ออกจากแผ่นซิลิคอน โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนดังนี้

- เตรียมสาร H_2O_2 (30%) : HCL (36.5-38%) : น้ำ DI ที่อัตราส่วนเท่ากับ 1 : 1 : 5
- แช่แผ่นซิลิคอนลงในสารละลาย ที่อุณหภูมิคงที่ ที่ 70°C เป็นเวลา 10 นาที
- ล้างสารละลายออกจากแผ่นซิลิคอนด้วยน้ำ DI โดยให้น้ำ DI ไหลผ่านแผ่นซิลิคอนนาน 10 นาที

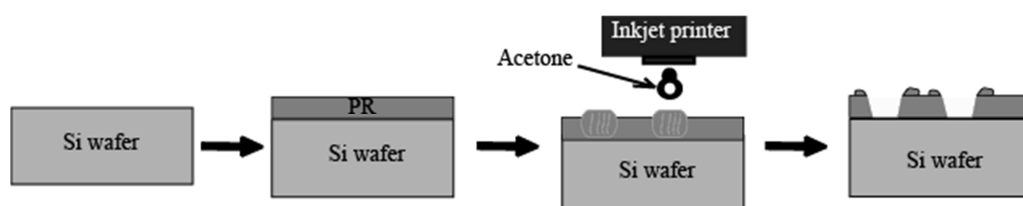
- เป่าแผ่นซิลิคอนให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ (Pure Nitrogen, N₂)



รูปที่ 3.16 กระบวนการทำความสะอาดด้วยหลักการ RCA

ขั้นตอนของกระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนนั้น สามารถนำมาเขียนเป็นแผนภาพซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.16 จากนั้นเคลือบแผ่นฐานซิลิคอนด้วยสารไวแสงแบบบวก (Positive resist) โดย

การเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องสปินให้ทั่วแผ่นตามเงื่อนไขความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลานาน 5 วินาทีตามด้วยใช้ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที อีก 30 วินาที หลังจากได้ฟิล์มสารไวแสงนำมาสร้างลวดลายที่ออกแบบไว้ด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีดที่พัฒนาขึ้นโดยการสั่งงานเครื่องพิมพ์ จากนั้นอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลานาน 30 นาที เมื่อได้ลวดลายช่องเปิดนำไปวิเคราะห์ผลด้วยกล้องจุลทรรศน์ขั้นต้นก่อนการสร้างลวดลายแสดงได้ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 กระบวนการสร้างลวดลายช่องเปิดด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด

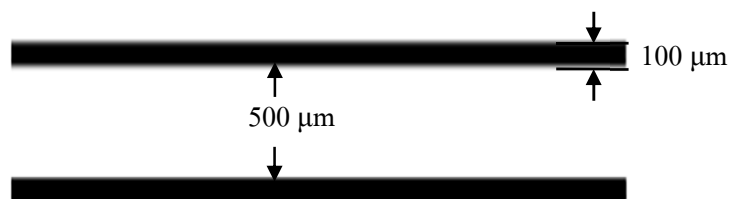
3.6 ผลที่ได้จากการสร้างลวดลายช่องเปิดด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด

ในการวิเคราะห์ผลของการสร้างลวดลายช่องเปิดได้ใช้การวัดความกว้างและระยะห่างของช่องที่ทำได้ใช้กล้องจุลทรรศน์ในการดูลวดลายช่องเปิดเพื่อทราบข้อมูลของขนาดช่องเปิดที่ได้จากเครื่องพิมพ์แบบฉีด โดยออกแบบการฉีดเป็นแบบเส้นตรงและแบบช่องเปิดจัตุรัสขนาดเล็กที่สุดที่เครื่องพิมพ์จะทำได้ดังต่อไปนี้

3.6.1 การออกแบบลวดลายใช้ทดสอบกับเครื่องพิมพ์ที่ดัดแปลงขึ้นและวิเคราะห์ลวดลายช่องเปิดด้วยกล้องจุลทรรศน์

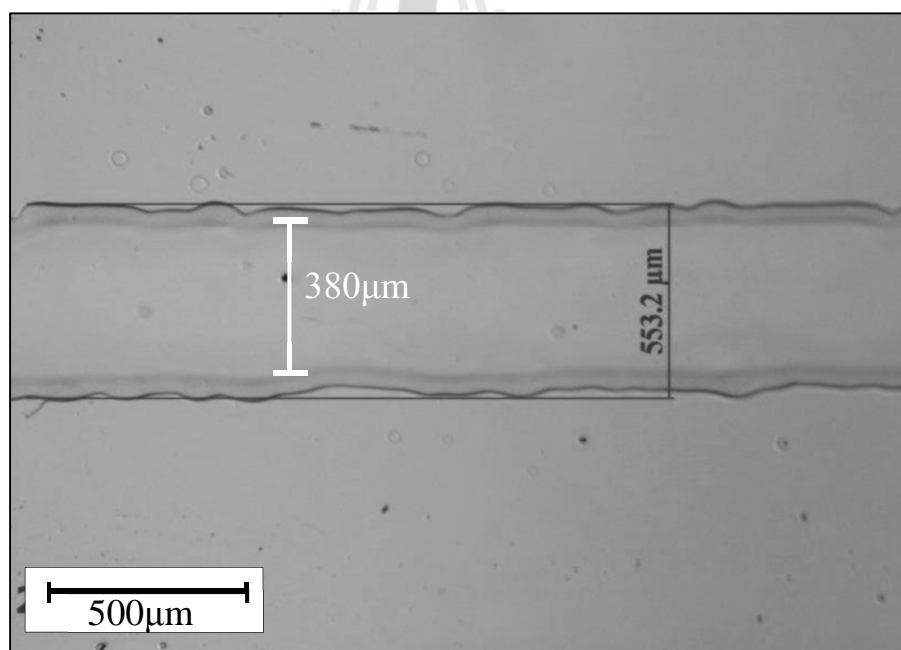
จากหลักการสร้างช่องเปิดในบทที่ 2 นำมาออกแบบทดสอบสร้างลวดลายช่องเปิดแบบเส้นตรงและแบบช่องเปิดจัตุรัสขนาดเล็ก โดยในการออกแบบทดสอบมีดังนี้

- 1) ออกแบบลวดลายเส้นตรงขนาด 100 μm และระยะห่าง 500 μm จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.18

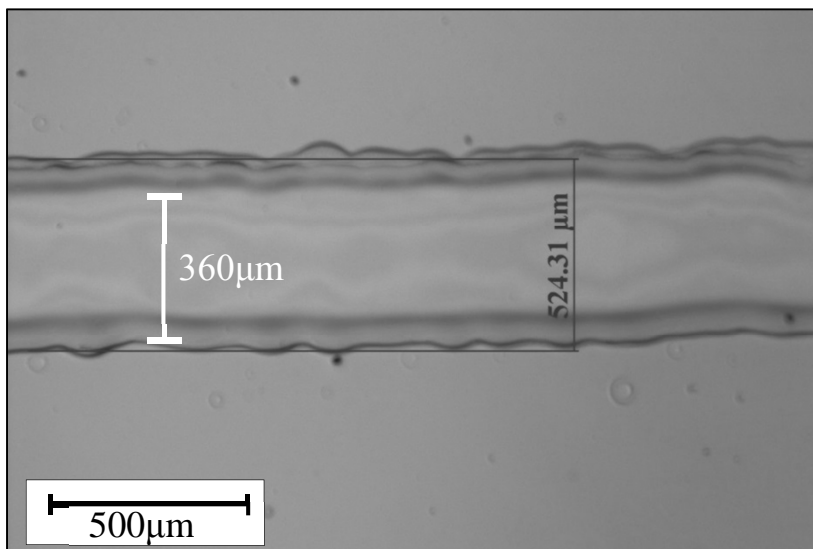


รูปที่ 3.18 การออกแบบหลอดลายเส้นตรงสำหรับทดสอบกับเครื่องพิมพ์แบบฉีด

ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองฉีดอะซิโตนซึ่งเป็นตัวทำละลายชั้นสารไวแสงที่เคลือบบนแผ่นฐานด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (spin-coating) แสดงในรูปที่ 3.19 ซึ่งแสดงขนาดของช่องที่มีการฉีดอะซิโตนด้วยเครื่องพิมพ์บนแผ่นฐานการเปิดช่องเป็นลักษณะของการฉีดเส้นตรงแบบครั้งเดียว จากการวัดขนาดของช่องเปิดมีความกว้างโดยการเฉลี่ยอยู่ประมาณ 380 μm

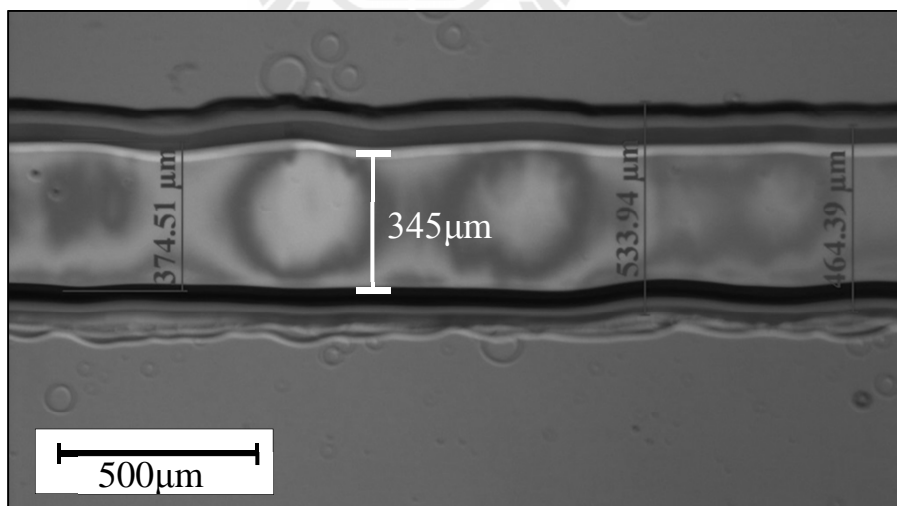


รูปที่ 3.19 ผลการการเปิดช่องชั้นสารไวแสงโดยทำการฉีดซ้ำ 1 ครั้ง



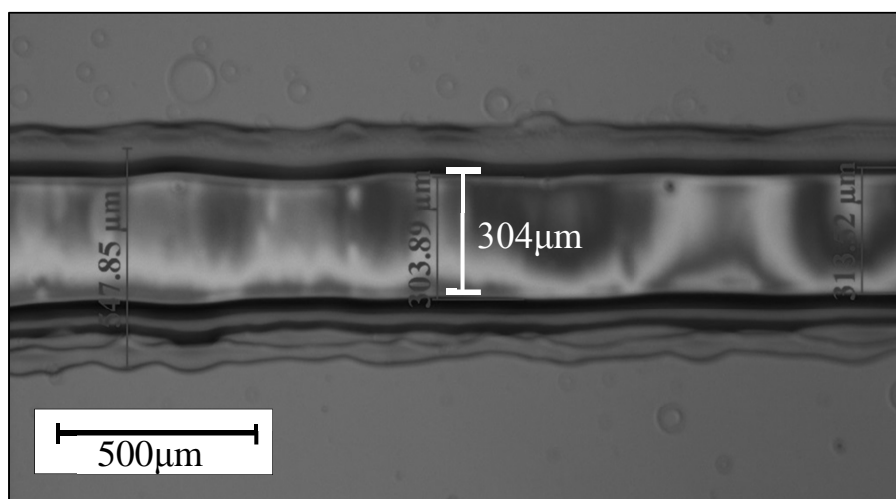
รูปที่ 3.20 ผลการการเปิดช่องชั้นสารไวแสงโดยทำการฉีดซ้ำ 2 ครั้ง

รูปที่ 3.20 แสดงรูปของพื้นผิวการฉีดอะซีโตนด้วยเครื่องพิมพ์บนแผ่นฐานที่ผ่านการเตรียมสำหรับการเปิดช่อง ลักษณะของการฉีดออกแบบการฉีดเป็นเส้นตรงการฉีดครั้งนี้ใช้การฉีดแบบ 2 ครั้งจากการวัดขนาดของช่องเปิดโดยการเฉลี่ยอยู่ที่ 360 μm



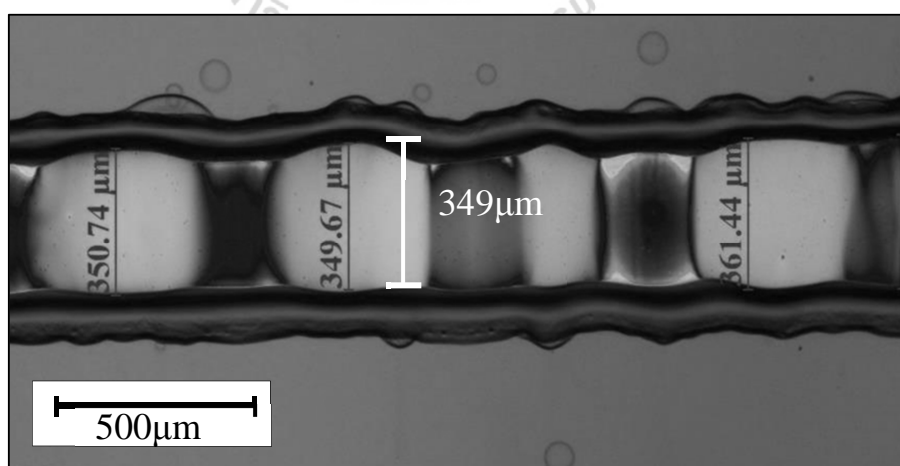
รูปที่ 3.21 ผลการการเปิดช่องชั้นสารไวแสงโดยทำการฉีดซ้ำ 3 ครั้ง

รูปที่ 3.21 แสดงผลการฉีดแบบเส้นตรงและฉีดซ้ำ 3 ครั้ง พบว่ามีความเปลี่ยนแปลงของระดับพื้นผิวสารไวแสงและแผ่นฐานโดยสารไวแสงถูกทำลายในรูปแบบที่กำหนดจากการทำปฏิกิริยาของสารอะซีโตนมีความกว้างช่องเปิดที่ได้เฉลี่ยประมาณ 345 μm



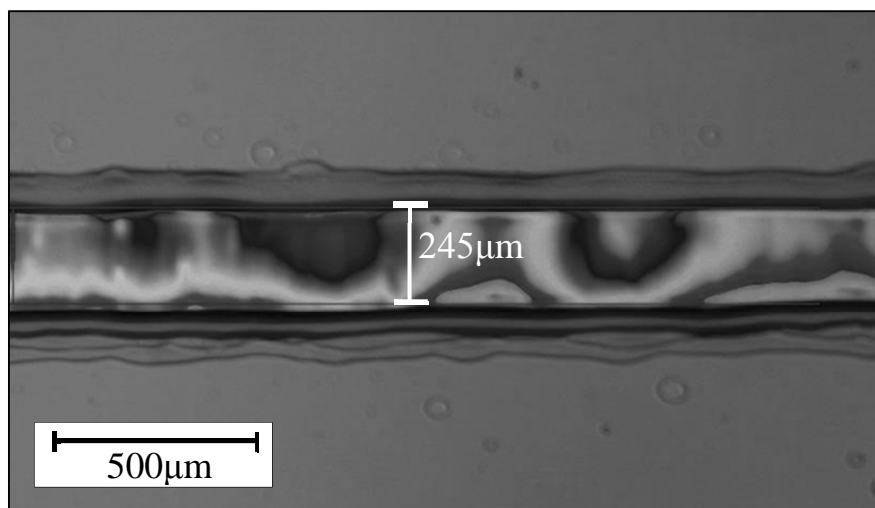
รูปที่ 3.22 ผลการเปิดช่องชั้นสารไวแสงโดยทำการฉีดซ้ำ 4 ครั้ง

รูปที่ 3.22 แสดงผลการฉีดแบบเส้นตรงและฉีดซ้ำ 4 ครั้ง ได้ความกว้างช่องเปิดเฉลี่ยประมาณ 304 μm



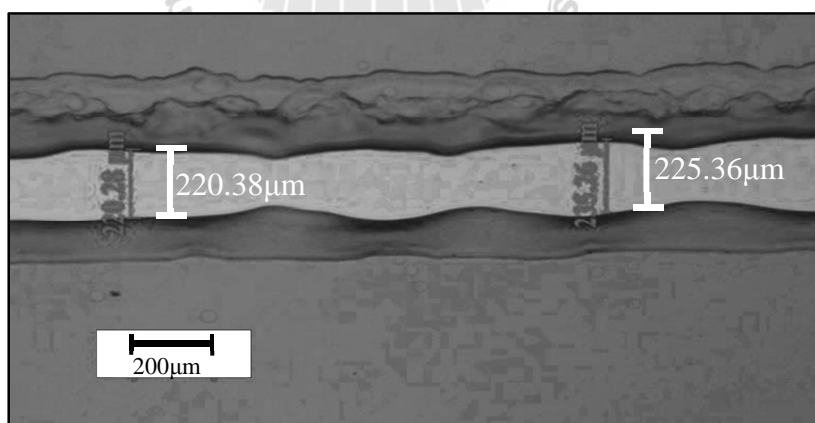
รูปที่ 3.23 ผลการเปิดช่องชั้นสารไวแสงโดยทำการฉีดซ้ำ 5 ครั้ง

รูปที่ 3.23 แสดงผลการกัดแบบเส้นตรงและกัดซ้ำ 5 ครั้ง มีความกว้างช่องเปิดเฉลี่ยประมาณ 350 μm



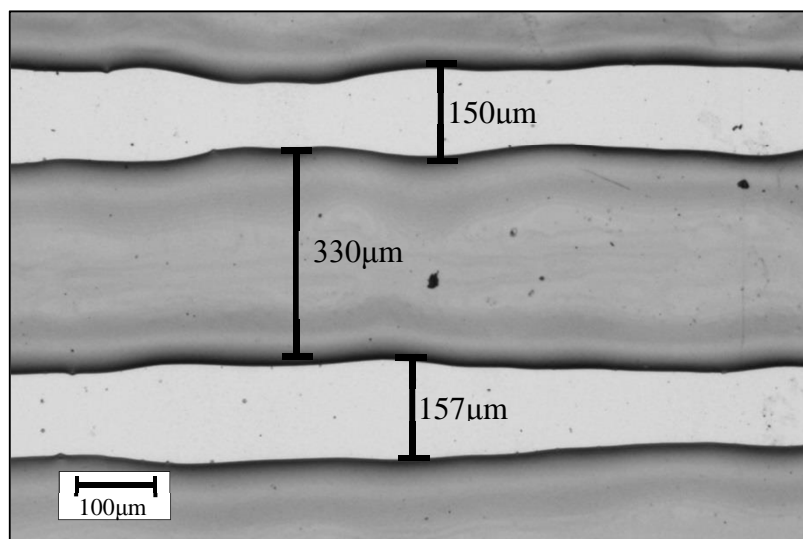
รูปที่ 3.24 ผลการการเปิดช่องชั้นสารไวแสงโดยทำการกัดซ้ำ 5 ครั้ง

รูปที่ 3.24 แสดงผลการกัดซ้ำ 6 ครั้ง พบว่าอะซิโตนทำปฏิกิริยามากขึ้นจนเริ่มเห็นชั้นออกไซด์ที่อยู่ด้านล่างเมื่อวัดความกว้างช่องเปิดที่ได้เฉลี่ยประมาณ 245 μm



รูปที่ 3.25 ผลการการเปิดช่องชั้นสารไวแสงโดยทำการกัดซ้ำ 8 ครั้ง

รูปที่ 3.25 แสดงผลการฉีดซ้ำ 8 ครั้ง จะเห็นความเปลี่ยนแปลงของระดับพื้นผิวสารไวแสง และแผ่นฐานโดยสารไวแสงจะเริ่มหดตัวเป็นช่องเปิดชัดเจนเมื่อวัดความกว้างช่องเปิดที่ได้เฉลี่ยอยู่ที่ $220\ \mu\text{m}$

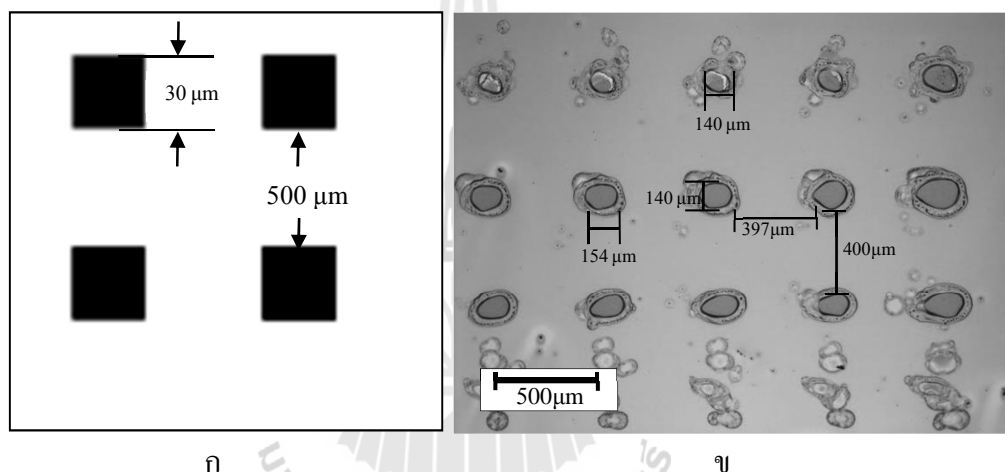


รูปที่ 3.26 ผลการเปิดช่องชั้นสารไวแสงโดยทำการฉีดซ้ำ 10 ครั้ง

รูปที่ 3.26 แสดงผลการฉีดซ้ำ 10 ครั้ง จะเห็นความเปลี่ยนแปลงของระดับพื้นผิวสารไวแสง และแผ่นฐานโดยสารไวแสงจะเริ่มหดตัวเป็นช่องเปิดชัดเจนและเส้นมีความคมชัดมากขึ้นขนาด ลวดลายมีขนาดลดลงเมื่อวัดความกว้างช่องเปิดที่ได้เฉลี่ยอยู่ที่ $150\ \mu\text{m}$ ดังนั้นถ้าออกแบบลวดลาย ช่องเปิดเส้นตรงจาก โปรแกรมคอมพิวเตอร์ขนาด $100\ \mu\text{m}$ จะได้ลวดลายช่องเปิดที่มีขนาด $150\ \mu\text{m}$ เทียบเป็นความคลาดเคลื่อน 50% จากผลการทดลองสร้างลวดลายเส้นตรงนี้สามารถกล่าวได้ว่า ขนาดช่องเปิดที่สามารถทำได้จากเครื่องพิมพ์แบบฉีดนี้มีขนาดลวดลายตามจำนวนการฉีดซ้ำ จาก การศึกษาพบว่าการฉีดสร้างลวดลายซ้ำ 10 ครั้งมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เนื่องจากได้ช่องเปิด ที่มีความคมชัดมากที่สุด

2) ออกแบบลวดลายสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดและระยะห่างต่าง ๆ จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากการออกแบบลวดลายเพื่อให้ได้อัตราส่วนระหว่างช่องเปิด ($A \times A$) กับพื้นที่ที่ไม่ได้เปิดช่อง ($B \times B$) เท่ากับ 1% เพื่อให้เป็นไปตามหลักการในบทที่ 2 ที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพการแปลง พลังงานสูงสุดผลการทดลองที่ได้จากการฉีดอะซิโตนซึ่งเป็นตัวทำละลายชั้นสารไวแสงที่เคลือบ บนแผ่นฐานด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (spin-coating) แสดงได้ดังผลต่อไปนี้

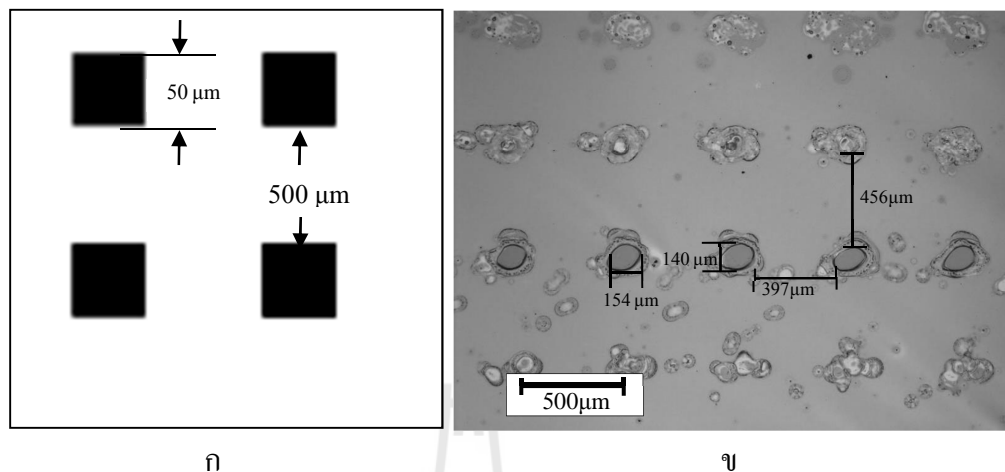
ทดลองสร้างช่องเปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ และระยะห่างของช่องเปิด $500 \mu\text{m}$ การออกแบบแสดงได้ดังรูปที่ 3.27 (ก) ขนาดของช่องที่ได้จากการฉีดอะซิโตนด้วยเครื่องพิมพ์บนแผ่นฐานการเปิดช่องเป็นลักษณะของการฉีดช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสและฉีดซ้ำจำนวน 10 ครั้ง ดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 3.27 (ข) จากผลการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าช่องเปิดมีลักษณะเป็นวงรีหรือวงกลมที่มีขนาดความกว้างช่องเปิดเฉลี่ยอยู่ประมาณ $150 \mu\text{m}$ และระยะห่างระหว่างช่องเปิดประมาณ $400 \mu\text{m}$ เมื่อสังเกตช่องเปิดในแต่ละช่องพบว่าบางบริเวณได้ช่องเปิดที่ไม่สมบูรณ์และสารอะซิโตนเหลืออยู่ซึ่งจะส่งผลต่อลวดลายในขั้นตอนการสกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ เนื่องจากปริมาณการหยดของสารอะซิโตนที่ออกจากหัวพิมพ์แต่ละหัวไม่เท่ากัน ส่งผลให้เกิดช่องที่มีขนาดและความคมชัดไม่เท่ากันดังกล่าว



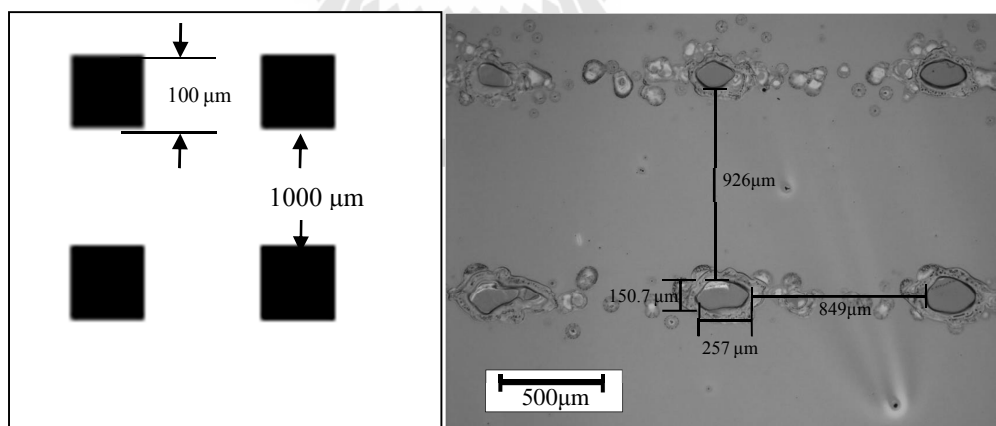
รูปที่ 3.27 (ก) แบบลวดลายช่องเปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ ระยะห่างของช่องเปิด $500 \mu\text{m}$ สำหรับทดสอบกับเครื่องพิมพ์แบบฉีด
 (ข) ผลการสร้างลวดลายช่องเปิดด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ ระยะห่างของช่องเปิด $500 \mu\text{m}$

ทดลองสร้างช่องเปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ และระยะห่างของช่องเปิด $500 \mu\text{m}$ การออกแบบแสดงได้ดังรูปที่ 3.28 (ก) ขนาดของช่องที่ได้จากการฉีดสารอะซิโตนด้วยเครื่องพิมพ์บนแผ่นฐานการเปิดช่องเป็นลักษณะของการฉีดช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสและฉีดซ้ำจำนวน 10 ครั้งดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 3.28 (ข) จากผลการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าช่องเปิดมีลักษณะเป็นวงรีหรือวงกลมที่มีขนาดความกว้างช่องเปิดเฉลี่ย $150 \mu\text{m}$ และระยะห่างระหว่างช่องเปิดประมาณ $450 \mu\text{m}$ เมื่อสังเกตช่องเปิดในแต่ละช่องพบว่าเกิดมีร่องรอยการหยดลงของสารอะซิโตน

ในบริเวณที่ไม่ต้องการซึ่งเกิดจากละอองของหยดสารที่ออกมาจากหัวพิมพ์ในลักษณะสเปรย์จึงทำให้เกิดการหยดลงในบริเวณดังกล่าว



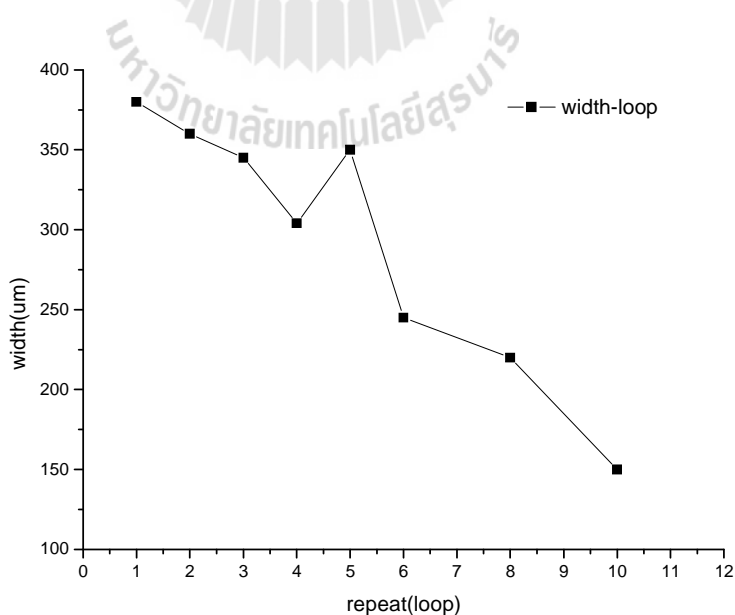
รูปที่ 3.28 (ก) แบบลวดลายช่องเปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ ระยะห่างของช่องเปิด $500 \mu\text{m}$ สำหรับทดสอบกับเครื่องพิมพ์แบบฉีด
(ข) ผลการสร้างลวดลายช่องเปิดด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ ระยะห่างของช่องเปิด $500 \mu\text{m}$



รูปที่ 3.29 (ก) แบบลวดลายช่องเปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ระยะห่างของช่องเปิด $1,000 \mu\text{m}$ สำหรับทดสอบกับเครื่องพิมพ์แบบฉีด
(ข) ผลการสร้างลวดลายช่องเปิดด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ระยะห่างของช่องเปิด $1,000 \mu\text{m}$

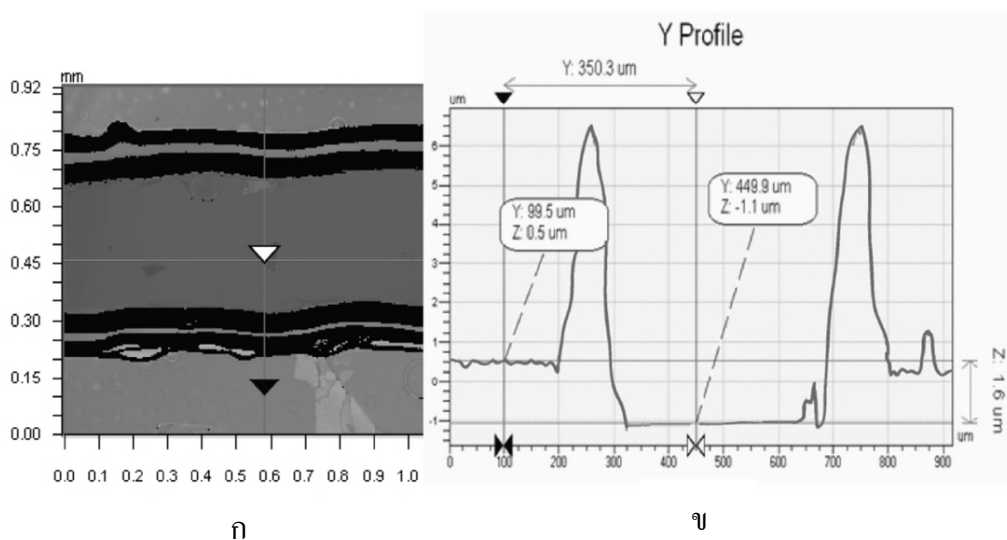
ทดลองสร้างช่องเปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ และระยะห่างของช่องเปิด $1,000 \mu\text{m}$ การออกแบบแสดงได้ดังรูปที่ 3.29 (ก) ขนาดของช่องที่ได้จากการฉีดอะซีโตนด้วยเครื่องพิมพ์บนแผ่นฐานการเปิดช่องเป็นลักษณะของการฉีดช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสและฉีดซ้ำจำนวน 10 ครั้งดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 3.29 (ข) จากผลการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าช่องเปิดมีลักษณะเป็นวงรีหรือวงกลมที่มีขนาดความกว้างช่องเปิดเฉลี่ย $200 \mu\text{m}$ และระยะห่างระหว่างช่องเปิดประมาณ $890 \mu\text{m}$ เมื่อสังเกตช่องเปิดในแต่ละช่องพบว่าเกิดมีร่องรอยการหยดลงของสารอะซีโตนในบริเวณที่ไม่ต้องการซึ่งเกิดจากระอบของหยดสารที่ออกมาจากหัวพิมพ์ในลักษณะสเปรย์จึงทำให้เกิดการหยดลงในบริเวณดังกล่าว

จากผลการฉีดของสารอะซีโตนด้วยเครื่องพิมพ์ที่ประยุกต์และพัฒนาขึ้น เราพบว่าการฉีดซ้ำที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อขนาดของช่องเปิดที่ได้นั้นมีขนาดเล็กลง การสร้างลวดลายช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานในการทำงานวิจัยนี้ เนื่องจากลวดลายที่ได้ยังไม่สมบูรณ์ บางช่วงก็เป็นช่องเปิดที่ไม่ถึงชั้นล่างของสารไวแสงยังมีสารไวแสงปกคลุมอยู่ซึ่งจะไม่สามารถสร้างลวดลายจากการสกัดชั้นซิลิคอนได้ออกให้ได้อย่างสมบูรณ์ หรือไม่สามารถเกิดลวดลายชั้นซิลิคอนได้ออกให้ที่อยู่ภายใต้ชั้นสารไวแสงได้ และการสร้างลวดลายช่องเปิดแบบเส้นตรงจะมีความคมชัดของเส้นตรงมากที่สุด ด้วยการฉีดสารอะซีโตนซ้ำที่เดิมเป็นจำนวน 10 ครั้ง และได้ช่องเปิดเส้นตรงที่มีขนาดเฉลี่ย $150 \mu\text{m}$ และระยะห่างเฉลี่ย $330 \mu\text{m}$ โดยจะนำเสนอไขการเปิดช่องที่ได้นี้ไปสร้างชั้นพาสซีเวชันจากการสร้างลวดลายด้วยเครื่องพิมพ์ในบทต่อไป



รูปที่ 3.30 ความสัมพันธ์ของขนาดของช่องเปิดต่อการฉีดสารละลายอะซีโตนซ้ำ

ความสัมพันธ์ระหว่างการฉีดซ้ำที่เพิ่มขึ้นกับขนาดของช่องเปิดที่ได้แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 3.30 เนื่องจากปฏิกิริยาทำละลายของสารอะซีโตน ซึ่งที่ตำแหน่งเดิมเกิดการหดตัวของสารและสารเคลื่อนไปด้านข้างเกิดเป็นหลุมที่ชัดเจนและลึกขึ้น แสดงดังภาพที่วัดได้จากกล้อง optical profiler รูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 (ก) ผลการเปิดช่องขึ้นสารไวแสงสารด้วยการฉีดสารละลายอะซีโตนจากการวัดด้วยกล้อง optical profiler

(ข) ข้อมูลตำแหน่งภาพของเส้นแนวตั้งจากการวัดด้วยกล้อง optical profiler

3.7 สรุป

ในบทที่ 3 นี้กล่าวถึงการประสบความสำเร็จในการพัฒนาเครื่องพิมพ์แบบฉีดให้สามารถใช้งานได้กับแผ่นฐานซิลิคอนและได้แสดงขั้นตอนการทำงานและผลของการสร้างลวดลายด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีดด้วยการฉีดสารละลายซ้ำ เพื่อเป็นข้อมูลในการทำการทดลองและพัฒนาต่อไป

บทที่ 4

ศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อพี-เอ็น ที่มีลวดลายชั้นพาสซีเวชันด้วย เทคนิคการเตรียมด้วย Sol-gel

4.1 บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงทั้งโครงสร้าง PERL และ โครงสร้างพื้นฐานในการผลิตเชิงพาณิชย์ ต่างก็ใช้เทคนิคการแพร่สารเจือลงทั่วแผ่นฐานเพื่อให้เกิดรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการแพร่ Pre-deposition และกระบวนการแพร่ Drive-in ในปัจจุบันมีการศึกษาวิธีทางเลือกในการแพร่ด้วยวิธี SOD (Spin-On Doping) สามารถแพร่สารเจือที่มีปริมาณต้องการจากการเตรียมตามความเข้มข้นของสารละลาย ผ่านการแพร่ด้วยความร้อนเพียง 1 ขั้นตอน ในบทที่ 4 จะแสดงรายละเอียดในการเตรียมสารและเงื่อนไขในการแพร่ เพื่อให้ได้คุณสมบัติของชั้นเอ็นต้องการและขั้นตอนในการสร้างชั้นพาสซีเวชันจากการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างซิลิคอนกับอะลูมิเนียม

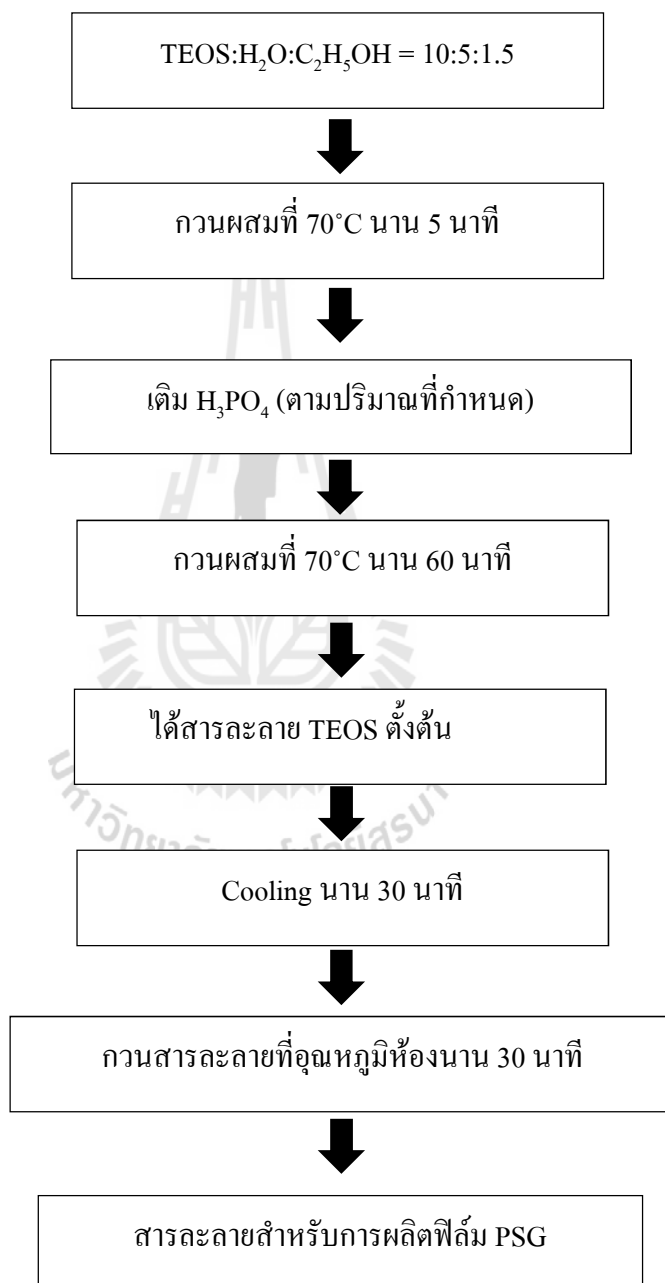
4.2 การสร้างรอยต่อพี-เอ็น ด้วยเทคนิค Spin-On Doping (SOD)

Spin-On Doping (SOD) คือเทคนิคการสร้างรอยต่อพี-เอ็นจากการเตรียมสารละลายซิลิเกต (Silicate) เป็นชนิดเอ็นหรือพีก็ได้ เรียกสารละลายนี้ว่า SOD เพื่อเป็นฟิล์มบางแหล่งของสารเจือที่ต้องการแพร่ลงแผ่นฐานซิลิคอน ที่ผ่านการเคลือบเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่องสปินเนอร์บนผิวหน้าซิลิคอน แล้วนำไปอบด้วยความร้อนเพื่อให้เกิดการแพร่ซึมของสารเจือจากฟิล์มซิลิเกต ขั้นตอนการเตรียมไม่ซับซ้อน (Tang et al., 2012) เช่นถ้าต้องการแพร่ชั้นเอ็น ฟิล์มบางซึ่งเป็นแหล่งของสารเจือต้องเป็น PSG (phosphorus silicate glass) หรือถ้าต้องการแพร่ชั้นพี ฟิล์มบางซึ่งเป็นแหล่งของสารเจือต้องเป็น BSG (Boro-silicate glass) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แผ่นฐานซิลิคอนชนิดพี และทำการเตรียมสารละลายสำหรับฟิล์ม PSG โดยมีขั้นตอนการคำนวณปริมาณการเติมสารเจือแสดงได้ดังภาคผนวก ก และขั้นตอนการเตรียมสารละลายแสดงได้ดังต่อไปนี้

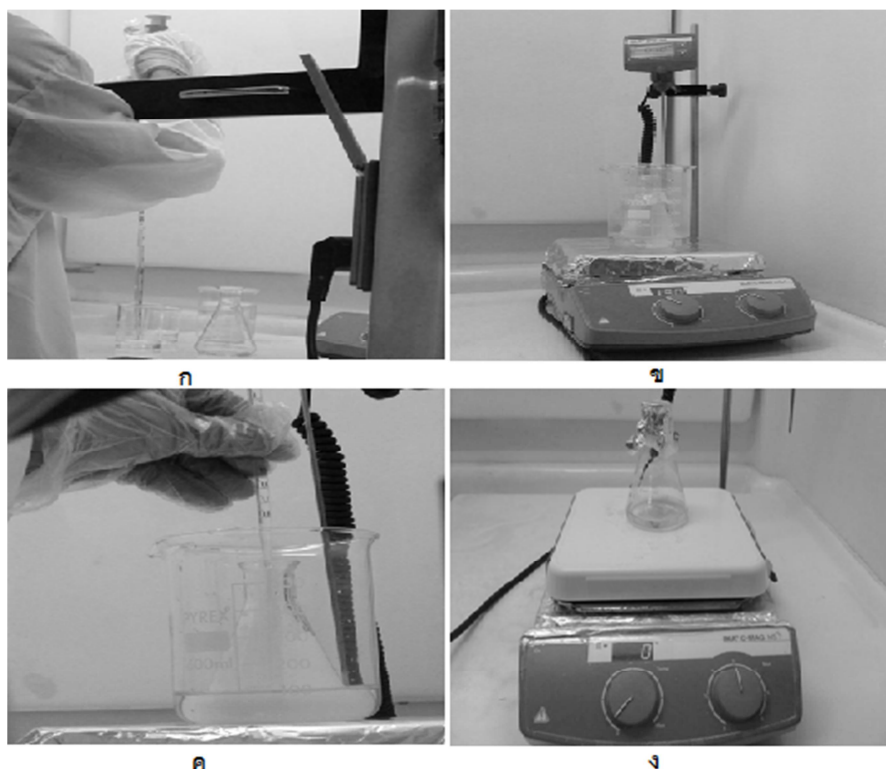
4.2.1 การเตรียมสารละลายตั้งต้นเพื่อเป็นฟิล์ม PSG แหล่งสารเจือฟอสฟอรัส

อัตราส่วนโดยปริมาตรของการเตรียมสารละลาย TEOS:H₂O:C₂H₅OH = 10:20:3 ด้วยอุปกรณ์กวนผสมที่อุณหภูมิ 70°C แสดงขั้นตอนดังรูปที่ 4.2 (ก) และรูปที่ 4.2 (ข) เมื่อกวนผ่านไป 5 นาที หยด H₃PO₄ ลงไปตามปริมาณที่กำหนดแสดงได้ดังรูปที่ 4.2(ค) (การคำนวณความเข้มข้น

ของสารแต่ละชนิดแสดงในภาคผนวก ค) จากนั้นกวนผสมที่อุณหภูมิ 70°C นาน 60 นาที ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที แสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลาย SOD ดังรูปที่ 4.2 (ง) แผนภูมิขั้นตอนการเตรียม SOD ของการสร้างชั้นเอนบนแผ่นฐานซิลิคอนชนิดพีรูปที่ 4.1



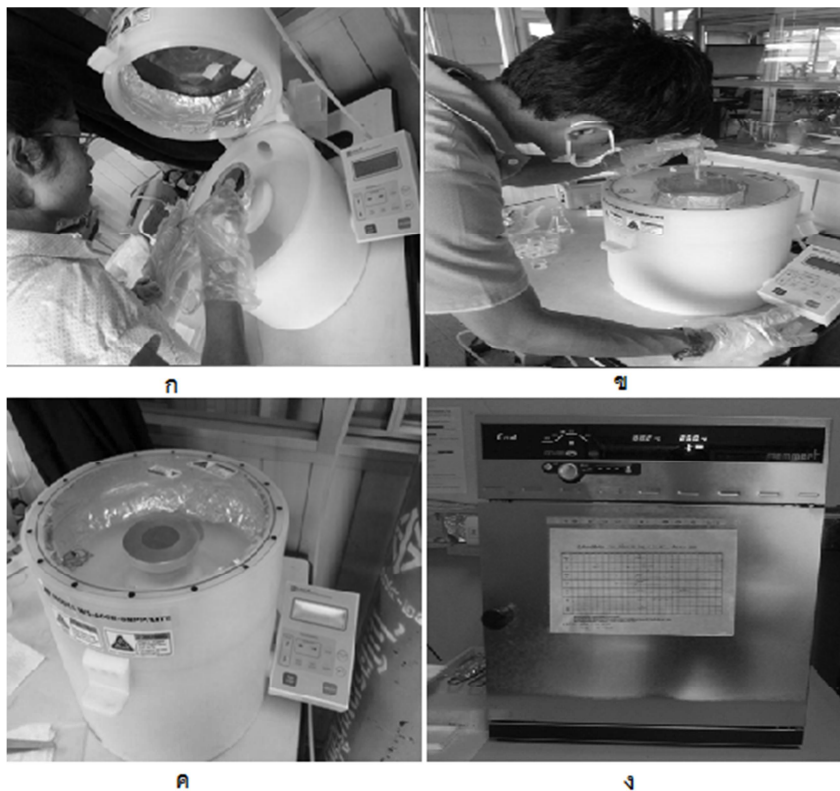
รูปที่ 4.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลาย SOD สำหรับเป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตฟิล์ม PSG



รูปที่ 4.2 (ก) การตวงสารละลาย TEOS:H₂O:C₂H₅O ด้วยปิเปต (ข) กวนผสมที่อุณหภูมิ 70°C (ค) หยด H₃PO₄ ลงไปตามปริมาณที่กำหนด (ง) กวนผสมที่อุณหภูมิห้อง นาน 60 นาที

4.2.2 ขั้นตอนการผลิตฟิล์ม PSG เพื่อเป็นแหล่งสารเจือสำหรับสร้างรอยต่อพี-เอ็น

หลังจากได้สารละลาย SOD สำหรับการผลิตฟิล์ม PSG เพื่อเป็นสารเจือที่แผ่นฐานซิลิคอนชนิดพีแล้ว กระบวนการเริ่มจากทำความสะอาดแผ่นฐานซิลิคอนด้วยวิธี RCA1 และ RCA2 (Kern, 1993) โดยรายละเอียดขั้นตอนได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 หลังจากแผ่นซิลิคอนผ่านการทำความสะอาดแล้วนำมาวางที่แท่นหมุนของสปินเนอร์ดังรูปที่ 4.3 (ก) จากนั้นหยดสารละลาย SOD บนแผ่นซิลิคอนดังรูปที่ 4.3 (ข) เคลือบฟิล์มซึ่งเป็นแหล่งสารเจือฟอสฟอรัสด้วย ด้วยวิธีเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาทีนาน 5 วินาทีตามด้วย ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาทีนาน 30 วินาทีดังรูปที่ 4.3 (ค) และอบไล่ความชื้นที่ 200°C นาน 15 นาทีดังรูปที่ 4.3 (ง) ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 (ก) นำชิ้นงานเข้าไปในแท่นหมุนของเครื่องสปินเนอร์
 (ข) หยดสารละลายที่เตรียมและเริ่มการทำงานของเครื่องสปินเนอร์
 (ค) เครื่องสปินเนอร์ในขณะที่กำลังเคลือบสารละลายบนชิ้นงาน
 (ง) เตาอบใช้ไล่ความชื้น (prebaking) ที่อุณหภูมิ 200°C นาน 15 นาที

4.2.3 การแพร่สารเจือด้วยความร้อนจากแหล่งสารเจือของฟิล์ม PSG

การแพร่สารเจือด้วยความร้อนในเตาเผาอุณหภูมิสูง (Tube Furnace) ในบรรยากาศไนโตรเจนด้วยอัตราการไหลของก๊าซ 100 sccm. ด้วยเทคนิคของ SOD พบว่าเราสามารถควบคุมปริมาณสารเจือได้จากการเตรียมความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลาย SOD ได้ เพื่อลดขั้นตอนการการอบตามความร้อนในขั้นตอน drive-in ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้ผสมสารละลายที่มีอัตราส่วนติมสารกรดฟอสฟอรัส ในเวลาและอุณหภูมิที่แตกต่างกันดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ดังนี้

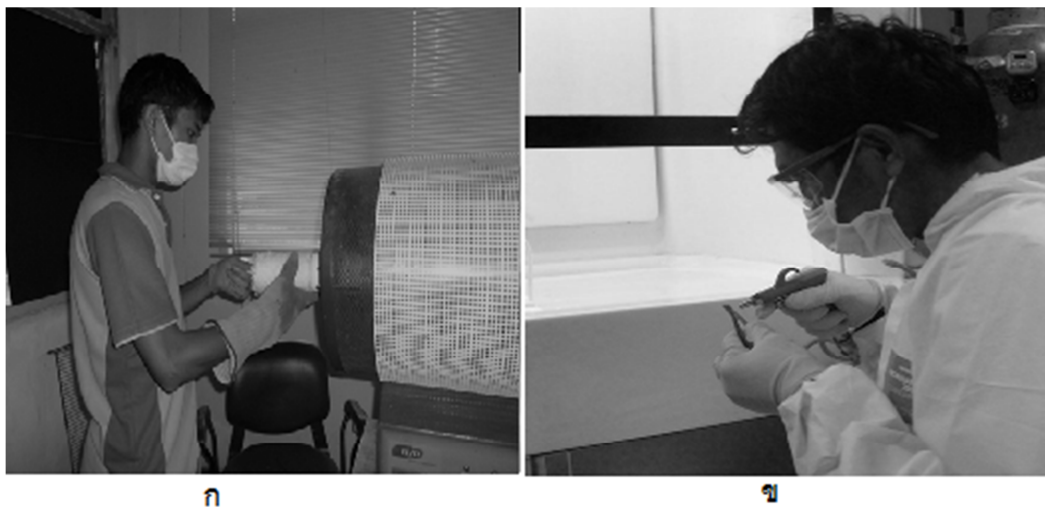
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการ diffusion ที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 4:1 5:1 และ 6:1
ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 800°C – 1,000°C

Diffusion temperature (°C)	Condition
800°C	Diffusion time(minute) = 60 minute TEOS:H ₃ PO ₄ = 4 : 1 TEOS:H ₃ PO ₄ = 5 : 1 TEOS:H ₃ PO ₄ = 6 : 1
850°C	
900°C	
950°C	
1,000°C	

หลังจากกำหนดเงื่อนไขการเจือสารที่อุณหภูมิและเวลาค่าต่าง ๆ แล้ว นำชิ้นงานเข้าเตาเผา และปรับตั้งเงื่อนไขในการทำงานของเตาโดยให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส ต่อนาทีและปรับอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนให้ได้ 100 sccm. ซึ่งถือเป็นค่ามาตรฐานในการแพร่ซึมสารเจือโดยทั่วไป หลังจากแพร่สารเจือด้วยความร้อนแล้วได้ทำการกำจัดฟิล์ม PSG บนผิวชิ้นเอ็นที่ได้ โดยแช่ในสารละลาย HF 5% นาน 3 นาที แล้วล้างด้วยน้ำ DI โดยให้น้ำไหลผ่านนาน 5 นาที โดยปริมาตรจากขวด นาน 1 นาที จากนั้นล้างน้ำ DI โดยให้น้ำไหลผ่านนาน 5 นาทีและเป่าแห้งด้วย ไนโตรเจนบริสุทธิ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 (ข)

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการ diffusion ที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 4:1 อุณหภูมิ 1,000°
ในระยะเวลาระหว่าง 20-90 นาที

Diffusion time(minute)	Condition
20	Diffusion temperature(°C) = 1,000°C TEOS:H ₃ PO ₄ = 4 : 1
30	
40	
60	
80	
90	

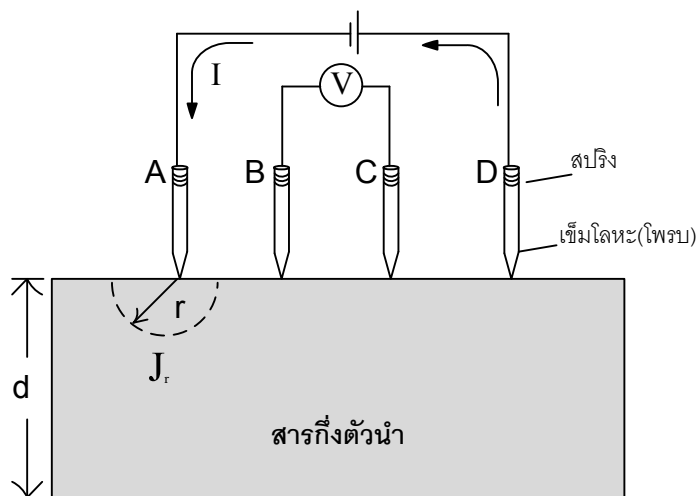


รูปที่ 4.4 (ก) นำชิ้นงานเข้าเตาเผาอุณหภูมิสูงที่มีบรรยากาศไนโตรเจน
(ข) เป่าแห้งชิ้นงานให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์

4.2.4 การวิเคราะห์ค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของรอยต่อชั้นเอ็นทีได้จากการแพร่

หลังจากกำจัดฟิล์ม PSG แล้วนำชิ้นงานไปวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่น (Sheet resistivity, ρ_{\square}) เพื่อเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์และในการวัดได้ใช้เครื่องวัดความต้านทานแบบสี่หัวเข็ม (4-point probe) อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและทดลอง ประกอบด้วยเข็มโลหะจำนวน 4 เข็ม มีปลายแหลมและอาจมีสปริงช่วยให้ปลายของเข็มถูกกดและสามารถสัมผัสกับระนาบผิวหน้าของชิ้นสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี เข็มทั้ง 4 คือ A B C และเข็ม D อยู่ห่างกันเป็นระยะ s เท่ากัน ซึ่งในทางปฏิบัติทุกๆไป จะมีค่าราว 0.5 - 1 มิลลิเมตรและอยู่ในแนวระนาบเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.6 ในการวัดจะเริ่มจากการปล่อยกระแสคงที่เข้าที่เข็มด้านนอกสุดคือเข็ม A และ D ทำให้มีกระแสไหลจากขั้ว A ผ่านเนื้อสารกึ่งตัวนำ ไปยังเข็ม D จึงเกิดมีแรงดันตกคร่อมเนื้อสารและถูกวัดออกมาที่ขั้ว B และ C นำ ค่ากระแสคงที่ I และแรงดัน V ที่วัดได้มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้

ในการวิเคราะห์ทำได้โดยพิจารณาว่า ขนาดของชิ้นสารกึ่งตัวนำ นี้มีขนาดใหญ่และมีความหนา (d) มากกว่าระยะห่างระหว่างเข็ม (s) หรือ $d \gg s$ กระแสไฟฟ้าจากขั้ว A จึงสามารถผ่านออกไปที่ขั้ว D ได้ ความหนาแน่นของกระแสจากขั้ว A จะกระจายออกไปยังเนื้อสารกึ่งตัวนำ ซึ่งความหนาแน่นของกระแส (J) ที่รัศมี r ใดๆที่กระจายออกไป จากจุด A คือ



รูปที่ 4.5 ภาพจำลองการวัดความต้านทานแบบสี่หัวเข็ม (4-point probe)

$$J_r = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (4.1)$$

โดย $2\pi r^2$ คือครึ่งหนึ่งของพื้นที่ผิวของทรงกลมที่มีรัศมี r
จากกฎของโอห์ม สนามไฟฟ้า \mathcal{E}_r ที่จุด r คือ

$$\mathcal{E}_r = \frac{J}{\sigma} = \frac{I}{2\pi r^2 \cdot \sigma} \quad (4.2)$$

เมื่อพิจารณาว่ามีกระแสไหลออกที่ปลายเข็ม D โดยผ่านเนื้อสารกึ่งตัวนำ และทำให้เกิดมีความแตกต่างของศักย์ที่ขั้ว B และ C ดังนั้นความต่างศักย์ไฟฟ้าวรรวมระหว่างขั้ว B และขั้ว C จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า นั่นคือ

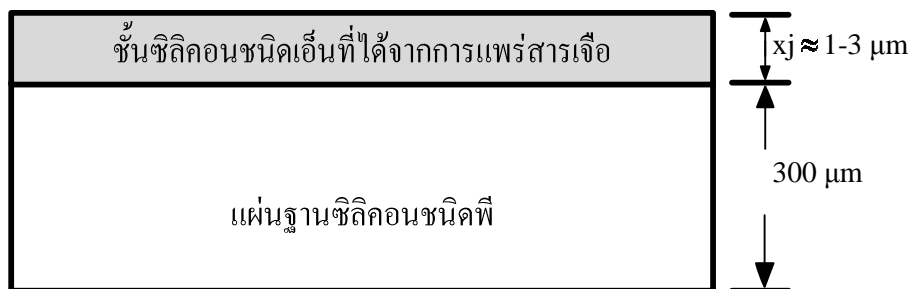
$$V_{B-C} = 2 \left(\frac{I}{4\pi \cdot \sigma \cdot s} \right) = \frac{I}{2\pi \cdot \sigma \cdot s} \quad (4.3)$$

จะได้สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) σ คือ

$$\sigma = \frac{1}{2\pi s} \left(\frac{I}{V} \right) \quad (4.4)$$

ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) คือ

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = 2\pi s \frac{V}{I} \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.6 ภาพตัดขวางโครงสร้างของชั้นสารกึ่งตัวนำ ชั้นบางๆ ที่อยู่บนแผ่นผลึกฐานรอง

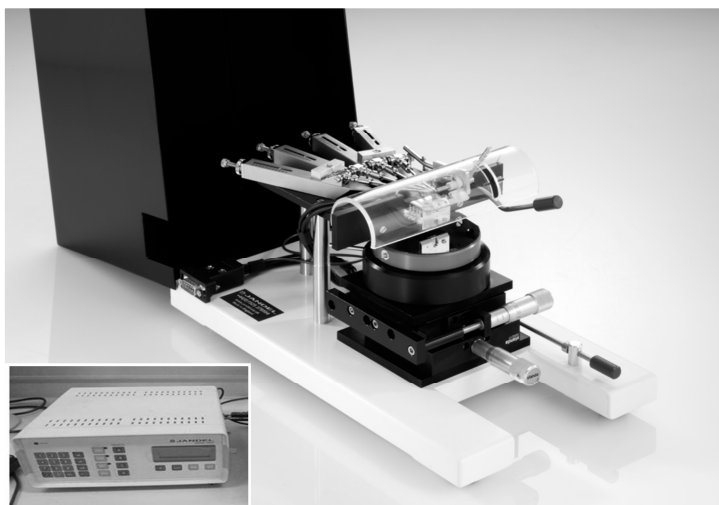
ในกรณีของการวัดชั้นสารกึ่งตัวนำ ที่มีความหนาน้อยๆ หรือ บางมากๆ เช่นการวัดชั้นบางๆ ของสารกึ่งตัวนำที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมสารเจือบนแผ่นผลึกฐานรอง ดังในรูปที่ 4.7 ซึ่งในกรณีนี้ ความหนาของชั้นสาร (x_j) มีค่าน้อยกว่าระยะห่างระหว่างเข็ม หรือ $x_j \ll s$ ดังนั้น ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเฉลี่ย หาได้จากสมการที่ (4.5)

$$\bar{\rho} = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} x_j \approx 4.532 \frac{V}{I} x_j \quad (4.6)$$

โดย x_j คือ ความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำ ที่ทำการวัดหรือเท่ากับความลึกของรอยต่อ พี-เอ็น นอกจากนี้แล้ว จากสมการที่ (4.5) “ความต้านทานไฟฟ้าแผ่น” หรือ Sheet resistivity ρ_{\square} สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.6)

$$\rho = \frac{\bar{\rho}}{x_j} = 4.532 \frac{V}{I} \quad (4.7)$$

จากเงื่อนไขในตารางการทดลองที่ 4.1 - 4.2 หลังจากกำจัดฟิล์ม PSG เรียบร้อยแล้ว ทำการวัดความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้นเอ็นตามด้วยเครื่องวัดความต้านทานแบบสี่หัวเข็มดังรูปที่ 4.8 โดยทำการวัดซ้ำจำนวน 4 ครั้งผลการวัดแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 - 4.6



รูปที่ 4.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานแบบสี่หัวเข็ม (4-point probe)

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้นเอนตามเงื่อนไขการแพร่สารเจือที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 4:1 ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 800°C – 1,000°C เป็นเวลา 60 นาที

Diffusion temperature (°C)	Condition TEOS:H ₃ PO ₄ = 4 : 1 $N_0 = 6.2085 \times 10^{20} \text{ atom/cm}^3$				
	ρ_{\square} (Ω/□) วัดครั้งที่ 1	ρ_{\square} (Ω/□) วัดครั้งที่ 2	ρ_{\square} (Ω/□) วัดครั้งที่ 3	ρ_{\square} (Ω/□) วัดครั้งที่ 4	ρ_{\square} (Ω/□) เฉลี่ย
800°C	706	604	508	561	594.75
850°C	457	466	458	482	465.75
900°C	256	273	302	321	288
950°C	154	150	150	156	152.5
1,000°C	122	121	134	137	128.5

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้นเอ็นตามเงื่อนไขการแพร่สารเจือที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 5:1 ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 800°C – 1,000°C เป็นเวลา 60 นาที

Diffusion temperature (°C)	Condition TEOS:H ₃ PO ₄ = 5 : 1 $N_0 = 5.022 \times 10^{20} \text{ atom/cm}^3$				
	ρ_{\square} (Ω/□) วัดครั้งที่ 1	ρ_{\square} (Ω/□) วัดครั้งที่ 2	ρ_{\square} (Ω/□) วัดครั้งที่ 3	ρ_{\square} (Ω/□) วัดครั้งที่ 4	ρ_{\square} (Ω/□) เฉลี่ย
800°C	772	780	799	798	787.25
850°C	260	266	276	255	264.25
900°C	234	299	280	231	261
950°C	231	185	186	178	195
1,000°C	165	153	155	145	154.5

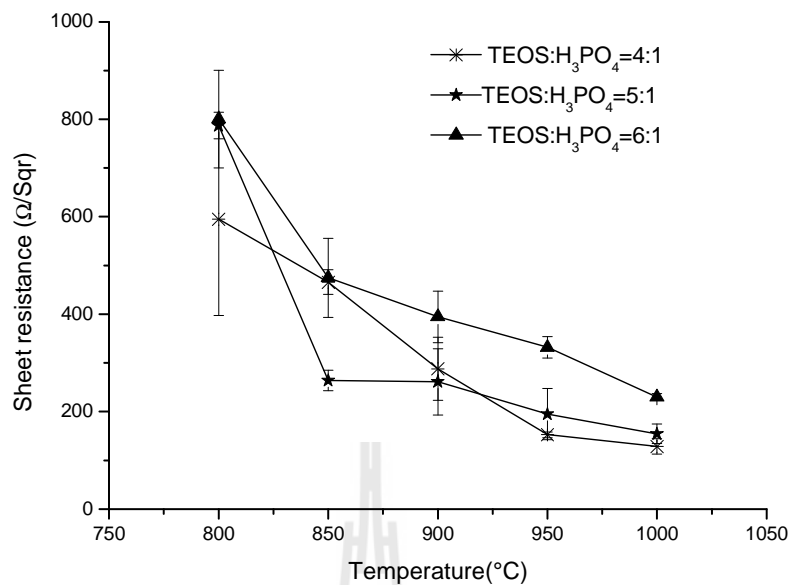
ตารางที่ 4.5 ผลการวัดความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้นเอ็นตามเงื่อนไขการแพร่สารเจือที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 6:1 ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 800°C – 1,000°C เป็นเวลา 60 นาที

Diffusion temperature (°C)	Condition TEOS:H ₃ PO ₄ = 6 : 1 $N_0 = 4.2379 \times 10^{20} \text{ atom/cm}^3$				
	ρ_{\square} (Ω/□) วัดครั้งที่ 1	ρ_{\square} (Ω/□) วัดครั้งที่ 2	ρ_{\square} (Ω/□) วัดครั้งที่ 3	ρ_{\square} (Ω/□) วัดครั้งที่ 4	ρ_{\square} (Ω/□) เฉลี่ย
800°C	800	850	803	750	800.75
850°C	521	484	440	453	474.5
900°C	431	380	389	378	394.5
950°C	324	332	346	326	332
1,000°C	233	226	232	228	229.75

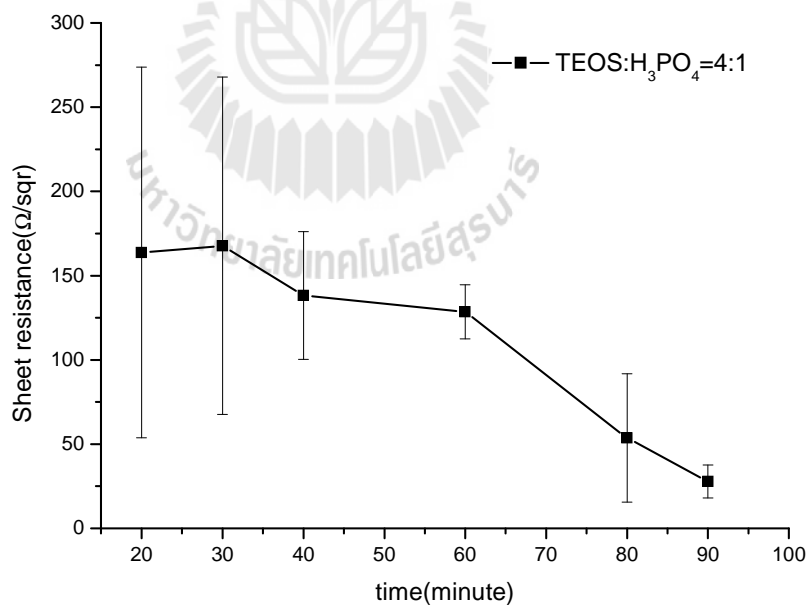
ตารางที่ 4.6 ผลการวัดความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้นเอ็นเจื่อนไขเวลาในการแพร่สารเจือที่ต่างกันโดยที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 4:1 ภายใต้อุณหภูมิ 1,000°C

Diffusion time (minute)	Condition Diffusion temperature (°C) = 1000°C TEOS:H ₃ PO ₄ = 4 : 1 $N_0 = 6.2085 \times 10^{20} \text{ atom/cm}^3$				
	ρ_{\square} (Ω/□) วัดครั้งที่ 1	ρ_{\square} (Ω/□) วัดครั้งที่ 2	ρ_{\square} (Ω/□) วัดครั้งที่ 3	ρ_{\square} (Ω/□) วัดครั้งที่ 4	ρ_{\square} (Ω/□) เฉลี่ย
20	120	150	230	155	163.75
30	240	141	150	140	167.75
40	120	125	150	158	138.25
60	122	121	134	137	128.5
80	66	45	33	71	53.75
90	23.3	25	30	33	27.825

จากผลการวัดความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้นเอ็นเจื่อนในตารางที่ 4.3 -4.6 เพื่อการสังเกตแนวโน้มของผลการทดลองที่ง่ายขึ้น จึงนำผลที่ได้จากตารางดังกล่าวไปพล็อตกราฟดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.8 จากการสังเกตพบว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการแพร่สารเจือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้นเอ็นเจื่อนจะมีค่าลดลง แต่เมื่อเปลี่ยนอัตราความเข้มข้น TEOS:H₃PO₄ จาก 4:1 เป็น 5:1 และ 6:1 ตามลำดับ ภายใต้อุณหภูมิและเวลาเงื่อนไขเดียวกัน ค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้นเอ็นเจื่อนจะมีค่าเพิ่มขึ้น และจากกราฟรูปที่ 4.9 ที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 4:1 ภายใต้ อุณหภูมิการแพร่สารเจือ 1,000°C แต่เปลี่ยนระยะเวลาในการแพร่สารเจือระหว่าง 20-90 นาที พบว่าเมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาในการแพร่สารเจือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้นเอ็นเจื่อนจะมีค่าลดลง ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีค่ามากเนื่องจากระยะเวลาที่ทำการแพร่สารเจือสั้นอุณหภูมิจึงมีการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้เกิดความไม่คงที่ของอุณหภูมิในการแพร่สารเจือดังกล่าว รอยต่อพี-เอ็นโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ใช้ค่าความต้านทานแผ่นของชั้นเอ็นที่ประมาณ 60-100 Ω/□ (Davis et al., 1980) (Komatsu et al., 2010) และ (Bock, Mau, Schmidt, & Brendel, 2010) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกเงื่อนไขการแพร่สารเจือด้วยอัตราส่วน TEOS: H₃PO₄ = 4 : 1 ที่อุณหภูมิ 1,000°C ใช้เวลาในการแพร่สารเจือนาน 60 นาที เพื่อเป็นรอยต่อพี-เอ็นที่ให้ค่า ρ_{\square} ที่เหมาะสม



รูปที่ 4.8 ผลการวัดความต้านทานแผ่นของชั้นเอ็นที่อัตราความเข้มข้น TEOS : H₃PO₄ เท่ากับ 4:1 5:1 และ 6:1 ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 800°C – 1,000°C



รูปที่ 4.9 ผลการวัดความต้านทานแผ่นของชั้นเอ็นที่เวลาในการแพร่สารเจือต่างกัน

4.3 การคำนวณหาความหนาของชั้นเอ็น (x_j)

จากผลการวัดค่าความต้านทานแผ่นของชั้นเอ็นในหัวข้อ 4.2 เนื่องจากความหนาแน่นของฟอสฟอรัสจากการคำนวณในภาคผนวก ก แต่ละอัตราความเข้มข้นของ TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 4:1 5:1 และ 6:1 จะมีความหนาแน่นของสารเจือที่แตกต่างกันแสดงได้ดังตารางที่ 4.7 นำค่าความหนาแน่นที่ได้นี้นำมาคำนวณหาความหนาของชั้นเอ็นดังแสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก แสดงผลได้ดังตารางที่ 4.8 และ 4.9

ตารางที่ 4.7 ความหนาแน่นอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสที่อัตราความเข้มข้นของ TEOS:H₃PO₄ ต่าง ๆ

อัตราความเข้มข้นของ TEOS : H ₃ PO ₄	ความหนาแน่นสารเจือของชั้นเอ็น(P _{phosphorus} : cm ⁻³)
4 : 1	6.2085x10 ²⁰
5 : 1	5.022x10 ²⁰
6 : 1	4.2379x10 ²⁰

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณความหนาของชั้นเอ็นตามเงื่อนไขการแพร่สารเจือที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 4:1 5:1 และ 6:1 ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 800°C – 1,000°C เป็นเวลา 60 นาที

Diffusion temperature (°C)	Condition Diffusion time(minute) = 60 minute		
	TEOS:H ₃ PO ₄ = 4 : 1	TEOS:H ₃ PO ₄ = 5 : 1	TEOS:H ₃ PO ₄ = 6 : 1
	$x_j(\mu\text{m})$	$x_j(\mu\text{m})$	$x_j(\mu\text{m})$
800°C	0.0253	0.0249	0.0247
850°C	0.0614	0.0606	0.0599
900°C	0.1383	0.1365	0.1351
950°C	0.2917	0.2877	0.2848
1,000°C	0.5800	0.5722	0.5664

ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณความหนาของชั้นเอนตามเงื่อนไขเวลาในการแพร่สารเจือที่ต่างกัน โดยที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 4:1 ภายใต้อุณหภูมิ 1,000°C

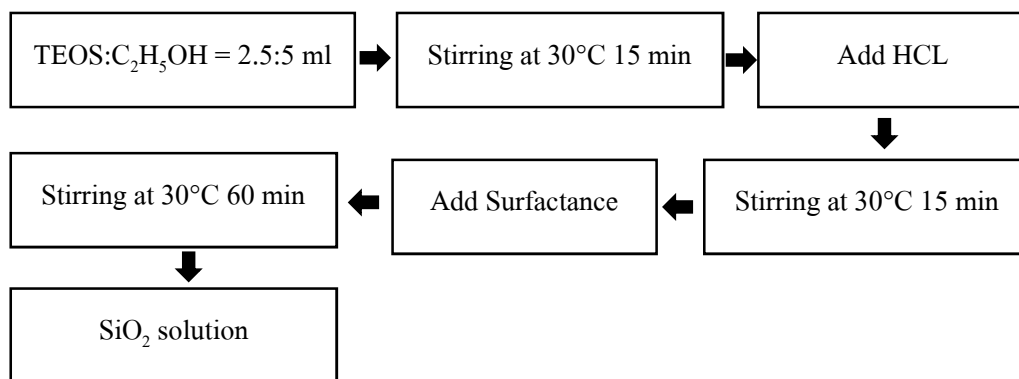
Diffusion time (minute)	Condition Diffusion temperature (°C) = 1,000°C TEOS:H ₃ PO ₄ = 4 : 1 $N_0 = 6.2085 \times 10^{20} \text{ atom/cm}^3$
	X _j (μm)
20	0.3348
30	0.4101
40	0.4735
60	0.5800
80	0.6697
90	0.7103

4.4 การสร้างชั้นไดอิเล็กทริกซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยเทคนิคโซล-เจล

การสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นชั้นพาสซีเวชันด้านหลังของเซลล์ ด้วยการเตรียมสารละลายตั้งต้นจากสารละลายโซ-เจล (Sol-gel) และเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงมีขั้นตอนการเตรียมดังต่อไปนี้

4.4.1 การเตรียมสารละลายตั้งต้นสำหรับสร้างฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์

ในการศึกษานี้ได้ทำการเตรียมสารละลายผสมของ Tetraethylorthosilicate [Si(OC₂H₅)₄ (TEOS, 98% Fluka)] และ Ethanol absolute [C₂H₅OH, (99% BDH) (EtOH)] โดยที่อัตราส่วนของสารละลาย TEOS : EtOH = 2.5: 5 ml เป็นอัตราส่วนโดยปริมาตรและกวนผสมโดยการกวนด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 30°C เมื่อกวนผ่านไป 15 นาที เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก(HCL)ลงไป 0.06 ml จากนั้นกวนต่อไปอีก 15 นาที เติมสารลดแรงตึงผิว Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide [C₁₉H₄₂BrN (CTAB, 99% Sigma Aldrich)] ลงไปจำนวน 4.49 ml (การคำนวณความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดแสดงในภาคผนวก ข) จากนั้นกวนผสมที่อุณหภูมิ 30°C นาน 60 นาที จะได้สารละลายตั้งต้นสำหรับ SiO₂ รายละเอียดขั้นตอนการเตรียมแสดงได้ดังแผนภาพรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แผนภาพขั้นตอนการเตรียมสารละลาย SiO₂ Solution

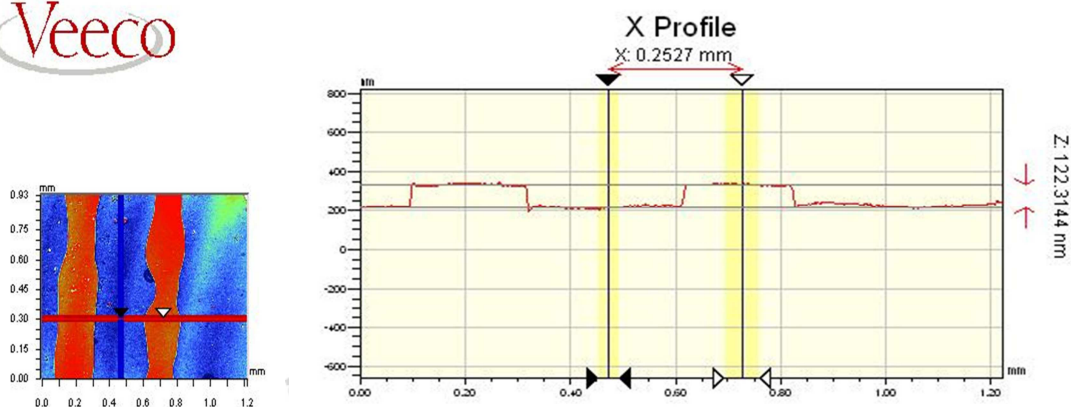
4.4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์

เมื่อได้สารละลาย SiO₂ solution แล้วนำแผ่นซิลิกอนที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยเทคนิค RCA1 และ RCA2 จากนั้นเป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจนบริสุทธิ์ นำไปเคลือบฟิล์มสารละลาย SiO₂ solution ที่ได้จากการเตรียมสารละลายข้างต้นด้วยการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วระหว่าง 3,000 – 6,000 รอบต่อนาทีนาน 30 วินาทีและอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C และ 500°C นาน 30 นาที เนื่องจากการทดลองและผลของความหนาจากการวัดด้วยกล้อง optical profiler แสดงดังตารางที่ 4.11 คุณสมบัติทางแสงบ่งบอกถึงสมบัติของ SiO₂ จากการศึกษารวบรวมพบว่าความหนาของชั้นไดออกไซด์สำหรับพาสซีเวชันควรมีค่าประมาณ 100 นาโนเมตรและค่าดัชนีหักเหของซิลิกอนไดออกไซด์โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 1.4 – 1.5 ทำการวัดเพื่อยืนยันผลของฟิล์ม SiO₂ จากวิธีไซล-เจล ดังกล่าวด้วยเครื่อง Ellipsometry จากการวัดได้ความหนาเท่ากับ 105 นาโนเมตร มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.48 ในกรณีการเคลือบด้วยความเร็วรอบ 6,000 รอบต่อนาที เป็นเวลานาน 30 นาที จากนั้นอบไล่ความชื้น 500°C นาน 30 นาที และวัดความหนาในเงื่อนไขอื่น ๆ ด้วยกล้อง optical profiler ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จากผลการทดลองที่ได้ดังตารางที่ 4.11 จึงเลือกเงื่อนไขการเคลือบด้วยความเร็วรอบ 6,000 รอบต่อนาทีนาน 30 อบไล่ความชื้น 500°C นาน 30 นาทีเนื่องจากได้ความหนาของฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์เท่ากับ 105.79 นาโนเมตร เนื่องจากใกล้เคียงกับความหนาที่ต้องการในการทำพาสซีเวชันมากที่สุดและได้เลือกเงื่อนไขความหนาฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์เท่ากับ 151.53 นาโนเมตรเป็นข้อยืนยันในการวิเคราะห์ว่าข้อแตกต่างของความหนาฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างไร จึงนำค่าความหนาฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ที่ได้นี้ไปใช้ในกระบวนการสร้างลวดลายด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีดต่อไป

ตารางที่ 4.10 เงื่อนไขการทดลองและผลของความหนาจากการวัดด้วยกล้อง optical profiler

ความเร็วรอบการเคลือบแบบ หมุนเหวี่ยง(รอบต่อนาที)	ความหนาฟิล์มที่ได้จากการ อบฟิล์ม 70°C	ความหนาฟิล์มที่ได้จากการ อบฟิล์ม 500°C
3,000	529.85 nm	151.53 nm
4,000	444.35 nm	137.38 nm
5,000	494.69 nm	129.08 nm
6,000	122.31 nm	105.79 nm
7,000	145.07 nm	117.16 nm

Veeco



รูปที่ 4.11 ผลการวัดความหนาฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยกล้อง optical profiler

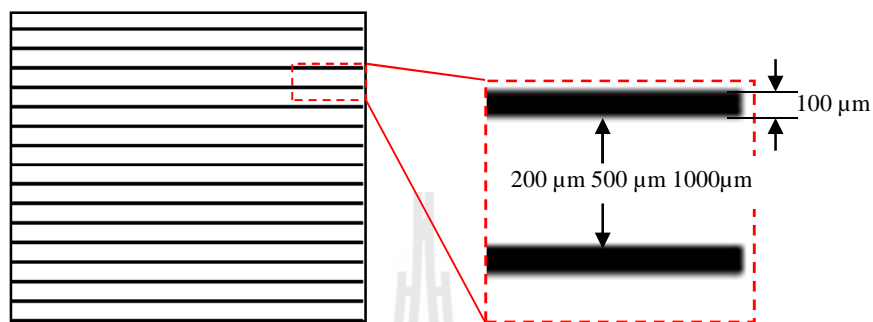
4.5 การสร้างชั้นพาสซีเวชันของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด

หลังจากได้ชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์จากขั้นตอนในข้อ 4.4.2 แล้วได้ดำเนินการดังต่อไปนี้

4.5.1 การสร้างช่องเปิดลวดลายเส้นตรงบนชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์

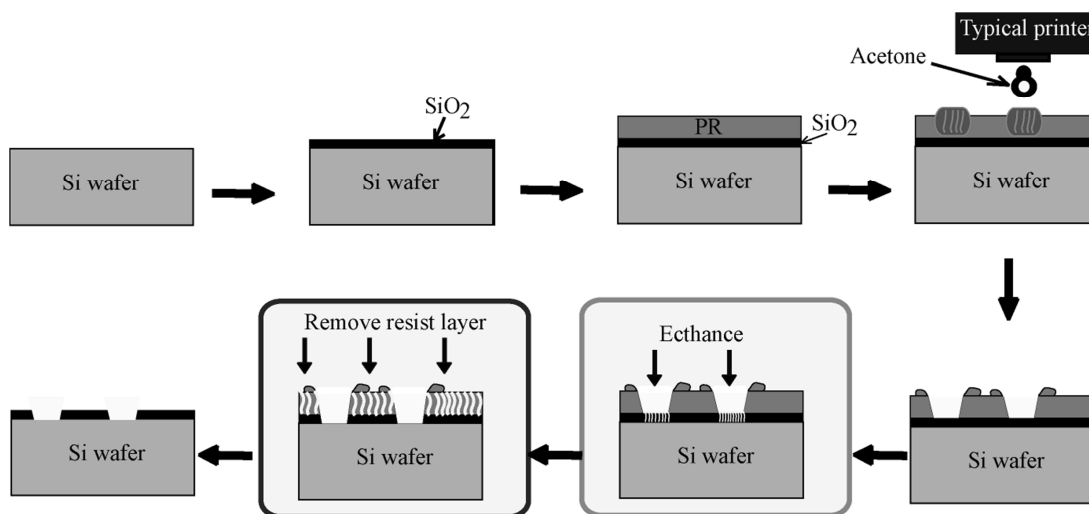
การศึกษานี้ในขั้นแรกของการเปิดช่องชั้น SiO_2 ได้ทำการเคลือบสารไวแสงแบบบวก (Positive resist: PFI-34 Sumiresist) ลงบนแผ่นซิลิกอนที่ผ่านกระบวนการผลิตรอยต่อพี-เอ็น และฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์แล้ว ด้วยการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่อง Spinner ยี่ห้อ LAURELL รุ่น WS-400B-8NPP/LITE ให้ทั่วแผ่นด้วยฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ ในเงื่อนไข

ความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลานาน 5 วินาที ตามด้วยใช้ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที อีก 30 วินาที หลังจากได้ฟิล์มสารไวแสงนำมาสร้างลวดลายที่ออกแบบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ต่อกับเครื่องพิมพ์แบบจีดที่พัฒนาขึ้น โดยออกแบบลวดลายเส้นตรงขนาด 100 μm และระยะห่าง 200 μm 500 μm และ 1,000 μm จากโปรแกรมสำหรับสร้างลวดลายขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 แบบลวดลายเส้นตรงที่ใช้ในงานวิจัยนี้

เมื่อนิโคตตินละลายอะซิโตนเพื่อให้บริเวณที่นิโคตตินละลายเปิดเป็นช่องขึ้น จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลานาน 30 นาที จากนั้นตามด้วยเปิดช่องขึ้นไดอิเล็กทริกด้วยการสกัดด้วยการแช่ในสารละลายไฮโดรฟลูออริก (HF) 5% นาน 25 วินาที เมื่อได้ลวดลายช่องเปิดดังกล่าวแล้ว กำจัดชั้นฟิล์มสารไวแสงด้วยการแช่ในสารละลายอะซิโตนจนสารไวแสงหลุดออกหมด จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำ DI ไหลผ่านนาน 5 นาที ตามด้วยเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ผลของการสร้างลวดลายจากแบบในรูปที่ 4.12 ด้วยเครื่องพิมพ์แบบจีดที่พัฒนาขึ้น ขั้นตอนการสร้างสร้างลวดลายชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นชั้นพาสซีเวชันของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงได้ดังแผนภาพรูปที่ 4.13 จากนั้นทำการวัดผลด้วยกล้องจุลทรรศน์ในขณะที่มีฟิล์มสารไวแสงและขณะที่กำจัดสารไวแสงออกเรียบร้อยแล้วแสดงได้ดังต่อไปนี้



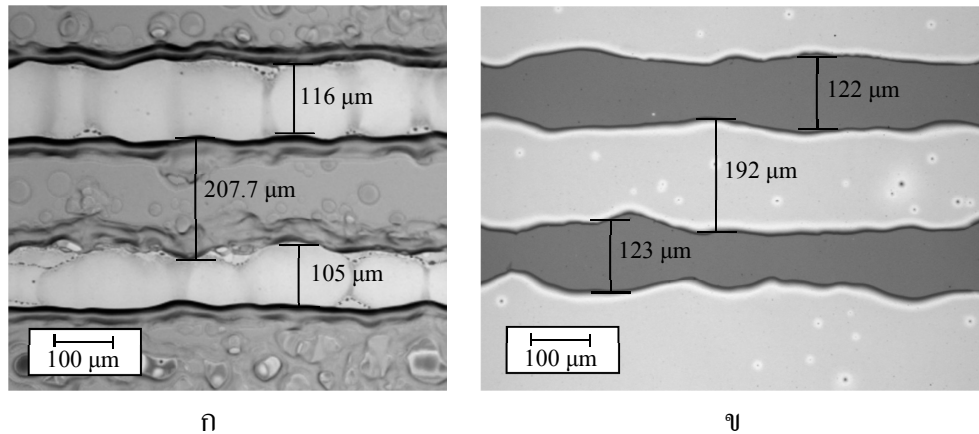
รูปที่ 4.13 กระบวนการสร้างลวดลายชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อเป็นชั้นพาสซีเวชัน

4.5.2 ผลที่ได้จากการเปิดช่องลวดลายเส้นตรงบนชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์

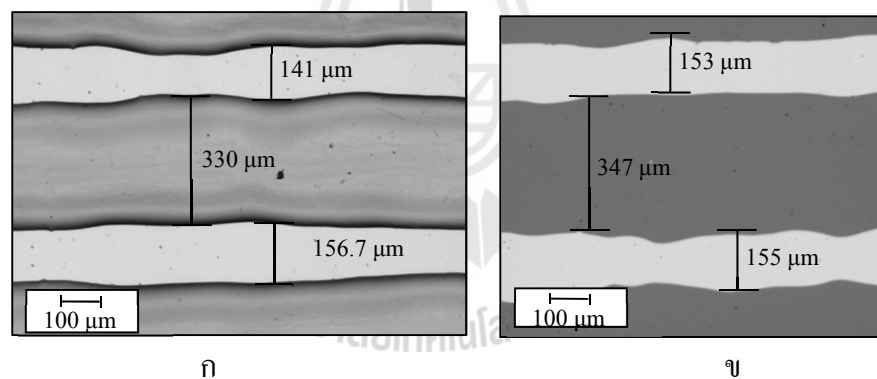
ในการวิเคราะห์ผลของการสร้างลวดลายช่องเปิดได้ใช้การวัดความกว้างของช่องเปิดและระยะห่างระหว่างช่องเปิด ที่ได้รับการฉีดสารอะซีโตนด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด ได้ใช้กล้องจุลทรรศน์ในการวัดขนาดลวดลายช่องเปิดเพื่อเก็บข้อมูลของขนาดช่องเปิดที่ได้โดยมีผลดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.14 (ก) แสดงผลจากการเปิดช่องจากการออกแบบลวดลายเส้นตรงขนาด $100\ \mu\text{m}$ ระยะห่าง $200\ \mu\text{m}$ โดยการฉีดสารอะซีโตนซ้ำจำนวน 10 ครั้ง เกิดเป็นลวดลายเส้นตรงขนาดเฉลี่ย $120\ \mu\text{m}$ และระยะห่างช่องเปิดเฉลี่ย $200\ \mu\text{m}$ แต่หลังจากสกัดชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์บริเวณช่องเปิดและกำจัดฟิล์มสารไวแสงออกจะได้ลวดลายเส้นตรงขนาดเฉลี่ย $122\ \mu\text{m}$ และระยะห่างช่องเปิดเฉลี่ย $190\ \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ข) ผลที่ได้นำไปวิเคราะห์หาอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ส่วนที่ไม่ได้เปิดช่องในหัวข้อต่อไป

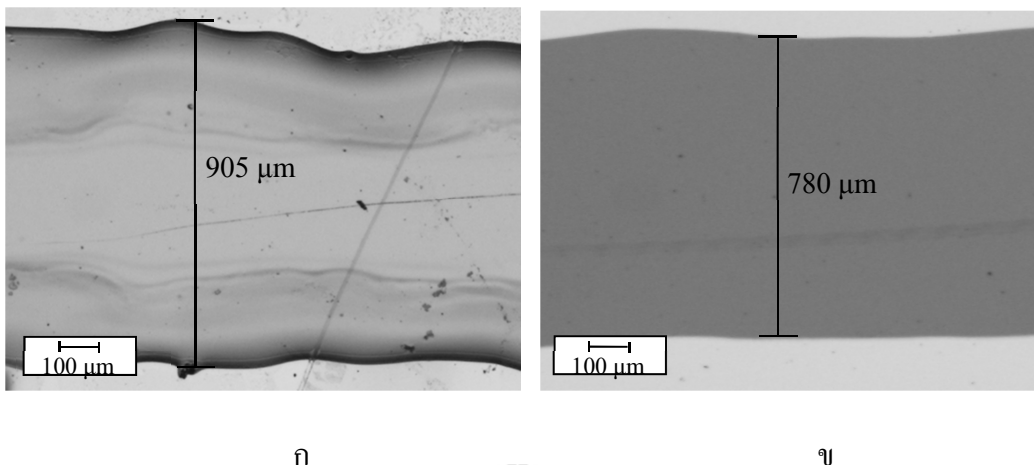
รูปที่ 4.15 (ก) แสดงผลจากการเปิดช่องจากการออกแบบลวดลายเส้นตรงขนาด $100\ \mu\text{m}$ ระยะห่าง $500\ \mu\text{m}$ โดยการฉีดสารอะซีโตนซ้ำจำนวน 10 ครั้ง เกิดเป็นลวดลายเส้นตรงขนาดเฉลี่ย $150\ \mu\text{m}$ และระยะห่างช่องเปิดเฉลี่ย $350\ \mu\text{m}$ แต่หลังจากสกัดชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์บริเวณช่องเปิดและกำจัดฟิล์มสารไวแสงออกจะได้ลวดลายเส้นตรงขนาดเฉลี่ย $155\ \mu\text{m}$ และระยะห่างช่องเปิดเฉลี่ย $340\ \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ข) ผลที่ได้นำไปวิเคราะห์หาอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ส่วนที่ไม่ได้เปิดช่องในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.14 (ก) ผลการเปิดช่องจากการลอกแบบลวดลายเส้นตรงขนาด 100 μm ระยะห่าง 200 μm ก่อนสกัดฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ออก
 (ข) ผลการเปิดช่องจากการลอกแบบลวดลายเส้นตรงขนาด 100 μm ระยะห่าง 200 μm หลังสกัดฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์และกำจัดสารไวแสงออก



รูปที่ 4.15 (ก) ผลการเปิดช่องจากการลอกแบบลวดลายเส้นตรงขนาด 100 μm ระยะห่าง 500 μm ก่อนสกัดฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ออก
 (ข) ผลการเปิดช่องจากการลอกแบบลวดลายเส้นตรงขนาด 100 μm ระยะห่าง 500 μm หลังสกัดฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์และกำจัดสารไวแสงออก



รูปที่ 4.16 (ก) ผลการเปิดช่องจากการออกแบบลวดลายเส้นตรงขนาด 100 μm ระยะห่าง 1,000 μm ก่อนสกัดฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ออก

(ข) ผลการเปิดช่องจากการออกแบบลวดลายเส้นตรงขนาด 100 μm ระยะห่าง 1,000 μm หลังสกัดฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์และกำจัดสารไวแสงออก

รูปที่ 4.16 (ก) แสดงผลจากการสร้างลวดลายเส้นตรงขนาด 100 μm และระยะห่าง 1,000 μm เนื่องจากมีระยะห่างระหว่างเส้นช่องเปิดกว้างมาก ดังนั้นผลการวัดจากกล้องจุลทรรศน์ จึงได้รูปในลักษณะที่ไม่สมบูรณ์ผลจากการเปิดช่องได้ลวดลายเส้นตรงขนาดเฉลี่ย 150 μm ระยะห่างเฉลี่ย 900 μm โดยการฉีดสารอะซิโตนซ้ำจำนวน 10 ครั้ง หลังจากสกัดชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณช่องเปิดและกำจัดฟิล์มสารไวแสงออกทำการวัดลวดลายเส้นตรงได้ขนาดเฉลี่ย 150 μm และระยะห่างระหว่างช่องเปิดเฉลี่ย 780 μm จากข้อมูลที่ได้สามารถสรุปและคำนวณอัตราส่วนของพื้นที่ช่องเปิดและพื้นที่ส่วนที่ไม่เปิดช่องบนตัวอย่างที่มีพื้นที่ขนาด 1 cm^2 ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.11 อัตราส่วนของพื้นที่ช่องเปิดและพื้นที่ส่วนที่ไม่เปิดช่องบนตัวอย่างขนาด 1 cm^2

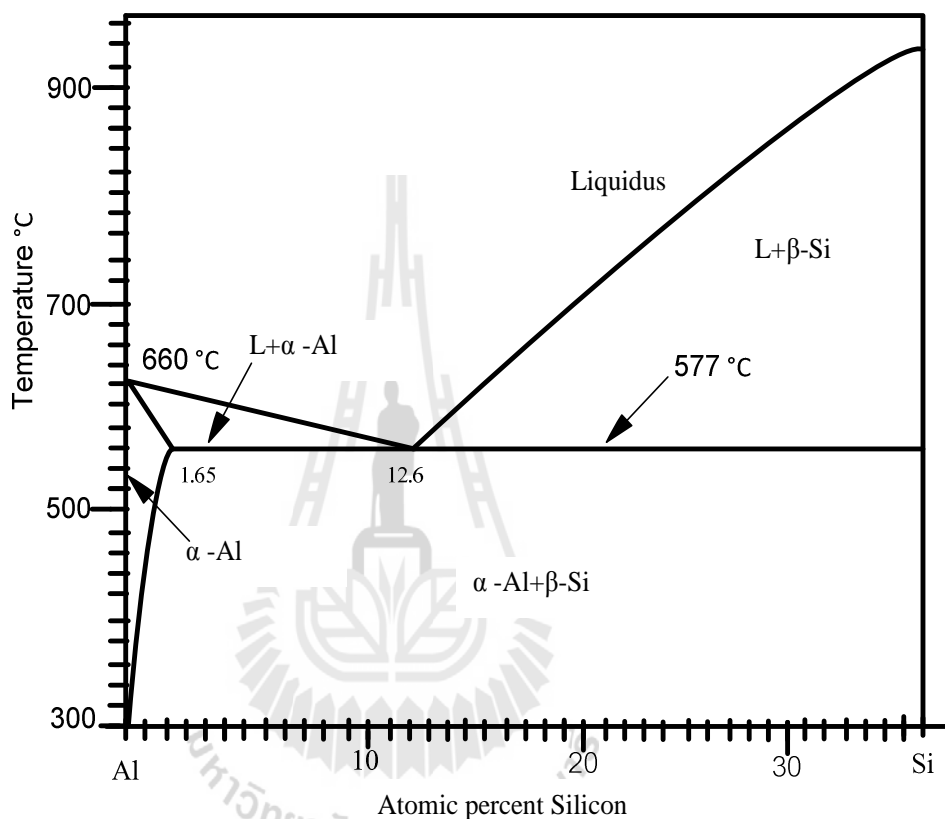
ความกว้างช่องเปิดเฉลี่ย (μm)	ระยะห่างระหว่างเส้นตรงเฉลี่ย (μm)	จำนวนเส้นตรง	อัตราส่วนของพื้นที่ช่องเปิดและพื้นที่ส่วนที่ไม่เปิดช่อง(%)
122	190	33	67.39
150	350	17	34.23
150	780	9	15.6

ตาราง 4.12 แสดงผลการเปิดช่องเงื่อนไขต่าง ๆ ในชิ้นงานขนาด $1 \times 1 \text{ cm}^2$ เพื่อนำไปคำนวณอัตราส่วนของพื้นที่ช่องเปิดและพื้นที่ส่วนที่ไม่เปิดช่อง จากผลความกว้างช่องเปิดเฉลี่ยและระยะห่างระหว่างเส้นตรงเฉลี่ยดังกล่าว ซึ่งในบทที่ 2 ได้แสดงตัวอย่างการคำนวณไว้แล้ว จากนั้นนำชิ้นงานตัวอย่างแต่ละเงื่อนไขไปสร้างขั้วโลหะด้านหลังและทำการแอนนีส เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าด้านหลัง (BSF) เพื่อให้เกิด P^+ ด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างซิลิคอนกับอะลูมิเนียมซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.6 ต่อไป

4.6 การสร้างชั้นซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูง ด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างซิลิคอนกับอะลูมิเนียม

การทำโลหะผสม (alloy) ระหว่างโลหะอะลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำซิลิคอน (Al-Si) โดยอาศัยการแพร่ระหว่างอะตอมของ Al-Si หลักสำคัญของการผลิตโลหะผสมนี้คือการตกผลึกซ้ำ (Recrystallization) จากการหลอมละลาย Al-Si เกิดซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูง (p^+) ในเนื้อของซิลิคอนชนิดพีเอง พฤติกรรมของ Al-Si อธิบายได้จากเฟสไดอะแกรมของ Al-Si รูปที่ 3.13 ในการสร้างรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมกับแผ่นฐานซิลิคอน จะพิจารณาที่สภาวะสมดุลทางความร้อน แต่ละเฟสที่แตกต่างกันแสดงได้ตั้งเส้นบอกสถานะ ตำแหน่งที่เฟสหลายเฟสมีส่วนผสมไม่เท่ากันมาหลอมรวมกัน มีลักษณะเป็นขั้นสลับไปมาระหว่างแต่ละเฟสเรียกว่า จุดยูเทคติก (eutectic point) เส้นที่กำหนดบริเวณที่สูงกว่าเส้นนี้ระบบ Al-Si จะมีสถานะของเหลวทั้งหมดเรียกเส้นนี้ว่า Liquidus line ส่วนเส้น Solidus line คือเส้นที่บอกบริเวณที่ต่ำกว่าเส้นนี้ระบบ Al-Si จะมีสถานะเป็นของแข็งทั้งหมด เส้น Solvus line คือเส้นที่บ่งบอกถึงความสามารถในการละลายของโลหะในระบบสมดุล α คือความสามารถในการละลายได้ (solid solubility) ของ Si ใน Al และ β คือความสามารถในการละลายได้ของ Al ใน Si ตามลำดับ ในกระบวนการทำโลหะผสม Al-Si มีบริเวณที่สำคัญที่ควรทราบดังนี้ บริเวณของแข็ง Si แบบสมบูรณ (Si-rich solidus : β -Si) บริเวณของแข็ง Al แบบสมบูรณ (Al-rich solidus and solvus : α -Al) และบริเวณของเหลว Al (Al-liquidus) ในกรณีที่มีปริมาณของซิลิคอนต่ำกว่า 1.65% ในโลหะผสม Al-Si ความสามารถในการละลายได้ของ Si ใน Al จะมีค่าสูงสุดที่จุดยูเทคติกที่อุณหภูมิ 577°C และจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น การผสมของโลหะในลักษณะนี้จะเกิดในบริเวณ α -Al ส่วนกรณีที่มีปริมาณของซิลิคอนมากกว่า 1.65% เฟสของโลหะผสมดังกล่าวจะอยู่ที่จุดยูเทคติกที่อุณหภูมิ 577°C เช่นกัน แต่ปริมาณของซิลิคอนเท่ากับ 12.6% จะเกิดโครงสร้างที่เรียกว่า Lamellar structure ในกรณีที่มีปริมาณของซิลิคอนมากกว่า 12.6% เรียกกรณีนี้ว่าไฮเปอร์ยูเทคติก (Hypereutectic) ความสามารถในการละลายได้ของ Al ใน Si จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดชั้นซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูง (p^+)

ภายในบริเวณของซิลิคอน มีความหนาแน่นของอะตอม Al ในของเหลว Al-Si และมีความสามารถในการละลายได้ของ Al ใน Si จึงเกิดการตกผลึกช้า ส่วนในกรณีปริมาณของซิลิคอนระหว่าง 1.65%-12.6% เรียกกรณีนี้ว่าไฮโปยูเทคติก (Hypoeutectic) ความสามารถในการละลายได้ของ Al ใน Si มีน้อยมากจึงไม่เกิดชั้นซิลิคอนชนิดที่ความเข้มข้นสูง



รูปที่ 4.17 แผนภาพเฟสไดอะแกรมของ Al-Si

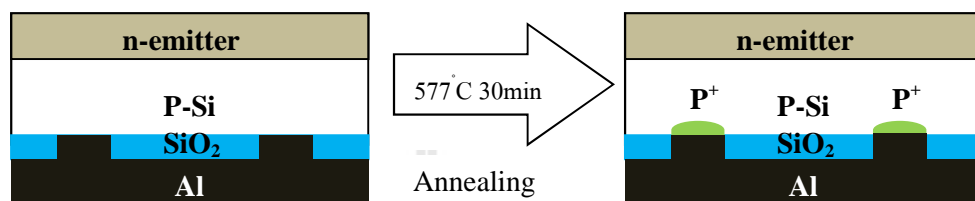
4.6.1 ขั้นตอนการสร้างชั้นซิลิคอนชนิดที่ความเข้มข้นสูงในช่องเปิดด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างซิลิคอนกับอะลูมิเนียม

การสร้างชั้นซิลิคอนชนิดที่ความเข้มข้นสูงภายในช่องเปิดไดโอดีเล็กทริกพาสซีเวชันด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างซิลิคอนกับอะลูมิเนียมมีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำแผ่นฐานที่ผ่านการสร้างรอยต่อพี-เอ็นและมีลวดลายของช่องเปิด SiO_2 จากการฉีดด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีดและทำความสะอาดด้วยกระบวนการ RCA แล้วมาทำการสร้างขั้วโลหะอะลูมิเนียมด้านหลังแบบทั่วทั้งแผ่นขนาด 1 เซนติเมตร บนลวดลายที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิคการพิมพ์ลาย (Screen printing)

2) นำไปแอนนีสที่อุณหภูมิ 577°C ภายใต้การไหลของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่ 100 sccm. เป็นเวลานาน 30 นาทีในเตาอุณหภูมิสูงดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.18

3) นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์ผลการเปิดช่องสร้างชั้นซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูง ด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างซิลิคอนกับอะลูมิเนียมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ สแกนกำลังขยายสูง (FESEM)



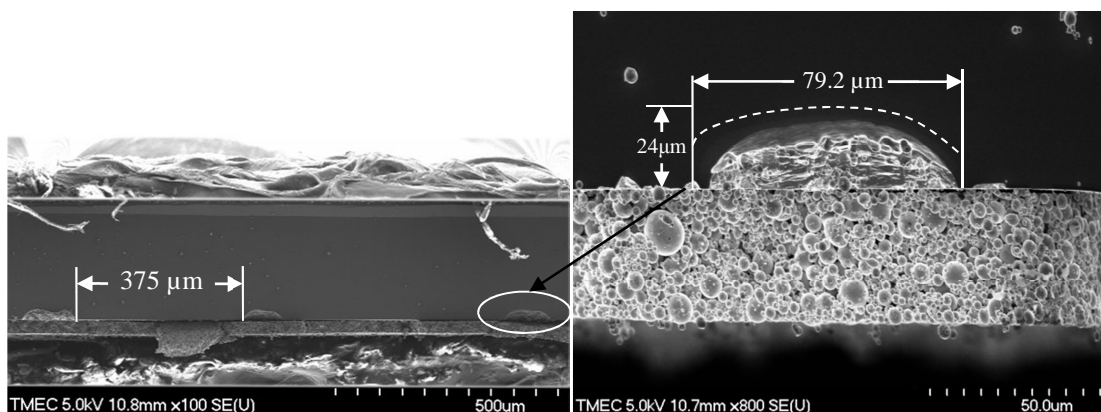
รูปที่ 4.18 การสร้างชั้นซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูงด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างซิลิคอนกับอะลูมิเนียม

4.6.2 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างของพื้นที่ซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูงในช่องเปิดซิลิคอนไดออกไซด์

การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างของการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างอะลูมิเนียมกับซิลิคอน (Al-Si) ในช่องเปิดซิลิคอนไดออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิการแอนนีส 577°C นาน 30 นาที นั้นทำได้โดยการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนกำลังขยายสูง เพื่อศึกษาผลการแทรกซึมของอะลูมิเนียมที่เกิดจากการหลอมละลายจนเกิดเป็นบริเวณซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูง ผลของบริเวณนี้แสดงในรูปที่ 4.18

รูปที่ 4.19 แสดงภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนกำลังขยายสูง ของชั้นของชั้นฟิล์ม Al/SiO₂/p-Si ที่ผ่านกระบวนการอบด้วยความร้อน ซึ่งสามารถพบเห็นการซึมผ่านของอะลูมิเนียมเกิดขึ้นเมื่อทำการอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 577°C เป็นเวลานาน 30 นาที จะสังเกตเห็นว่าชั้นของอะลูมิเนียมจะมีลักษณะเป็นผลึกกลมเกิดจากการขยายตัวเนื่องจากความร้อน และสังเกตเห็นช่องเปิดที่มีระยะห่างประมาณ 375 μm ขนาดกว้างเฉลี่ย 101 \pm 30 μm ตามขนาดเฉลี่ยของลวดลายช่องเปิดที่ออกแบบไว้ในชั้น SiO₂ ด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด เมื่อสังเกตบริเวณรอยต่อระหว่างซิลิคอนกับอะลูมิเนียมจะเกิดโครงสร้าง Lamellar โดยมีความหนาประมาณ 24 μm ในบริเวณเส้นประจะเป็นผลที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนเฟสและเกิดเป็นชั้นซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูง (P⁺) ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับพฤติกรรมของการแลกเปลี่ยนเฟส Al-Si ที่เกิดขึ้นของ Urrejolo

และคณะ (Urrejola et al., 2011) จากผลการศึกษานี้เป็นการยืนยันถึงผลสำเร็จในการเกิดบริเวณ p⁺-Si ในช่องเปิดจากการฉีดสร้างลวดลายจากเครื่องพิมพ์ได้



รูปที่ 4.19 ภาพตัดขวางจาก FE-SEM ของชั้นฟิล์ม Al/SiO₂/Si ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิการแอนนัล 577°C นาน 30 นาที

4.6.3 การวิเคราะห์ค่าช่วงเวลาคงชีพของพาหะ (Carrier lifetime)

ค่าช่วงชีพของพาหะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีความสัมพันธ์กับอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะบ่งบอกถึงค่าประสิทธิภาพของชั้นพาสซีเวชันในเซลล์แสงอาทิตย์ อีกทั้งยังมีผลต่อค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย โดยการวัดค่าช่วงชีพของพาหะในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องมือวัดช่วงชีพพาหะ Photoconductance Lifetime Tester : Sinton รุ่น WCT-120 รูปที่ 4.20 แสดงแผนภาพส่วนประกอบและอธิบายหลักการวัดด้วยเทคนิค Quasi-Steady-State Photoconductance (QSSPC) method (Sinton, Cuevas, & Stuckings, 1996) เป็นเทคนิคที่ต้องมีโลหะสัมผัสที่ชิ้นงานด้านหลัง เพื่อส่งผ่านแหล่งของพลังงานภายนอกของการวัดซึ่งใช้แสงเลเซอร์แบบพัลส์ (Pulse) เพื่อไปกระตุ้นให้เกิดการสร้างพาหะอิสระขึ้นในสารกึ่งตัวนำแสดง หลังจากนั้นพาหะอิเล็กตรอนอิสระบางส่วนจะกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลด้วยกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะขึ้นไปที่ชั้นพลังงานวาเลนซ์ เป็นผลทำให้ความนำไฟฟ้าของชิ้นงานลดลงและส่งผ่านสัญญาณที่ตรวจจับได้ออกมาเป็นฟังก์ชันของเวลา ค่าช่วงชีพของพาหะก่อนจะรวมตัวใหม่อีกครั้งนั้น มีความสัมพันธ์ดังสมการ 4.7 (Vetter, Orpella, Puigdollers, Cuevas, & Alcubilla, 2001) แสดงได้ดังนี้

$$\frac{1}{\tau_{meas}} = \frac{1}{\tau_{bulk}} + \frac{1}{\tau_{diff} + \tau_{surf}} \quad (4.8)$$

โดยที่ $\tau_{diff} = \frac{d^2}{\pi^2 \cdot D_{n,p}}$ และ $\tau_{surf} = \frac{d}{2 \cdot S}$

τ_{bulk} คือ ค่าช่วงชีวิตของพาหะที่เนื้อวัสดุ

τ_{surf} คือ ค่าช่วงชีวิตของพาหะที่ผิว

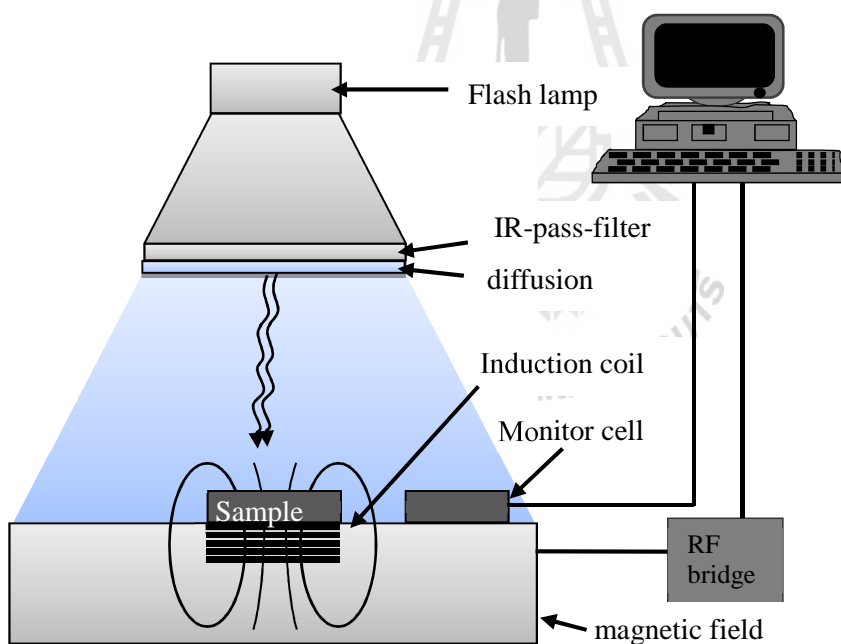
τ_{meas} คือ ค่าช่วงชีวิตของพาหะที่เนื้อวัสดุ

$D_{n,p}$ คือ ค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะข้างน้อย

τ_{diff} คือ ระยะเวลาการแพร่ของพาหะจากเนื้อวัสดุไปยังผิว

d คือ ความหนาของแผ่นฐานซิลิคอน

S คือ อัตราความเร็วของการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิว (Surface recombination velocity)



รูปที่ 4.20 แผนผังของระบบการทำงานอย่างง่ายของเครื่อง Photoconductance Lifetime Tester รุ่น WCT-120

ในกรณีศึกษานี้ได้ใช้แผ่นฐานผลึก Si ชนิดพีที่มีการเติมสารเจือซึ่งให้ความเข้มข้นของอะตอมประมาณ $10^{14} \text{ atom/cm}^3$ เมื่อนำไปแทนค่าในเทอมของ τ_{diff} ทำให้มีค่าน้อยมากในระดับ 10^{-9}

วินาที เมื่อเปรียบเทียบกับเทอมของ τ_{surf} และ τ_{bulk} แล้ว แสดงให้เห็นว่าผลของ τ_{diff} ไม่มีผลต่อค่า τ_{meas} ที่วัดได้ซึ่ง τ_{meas} คือค่าประสิทธิผลของช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อย (Effective lifetime : τ_{eff}) เทคนิคนี้ใช้หลักการวัดแสงเลเซอร์แบบพัลส์ (photo conductance) ภายใต้สภาวะแสงเงา Steady หรือ quasi-steady-state ความหนาแน่นของกระแสจากอัตราการเกิดของพาหะที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง (J_{ph}) และความหนาแน่นของกระแสจากอัตราการรวมตัวใหม่ (J_{rec}) มีค่าเท่ากันดังสมการที่ (4.9)

$$J_{ph} = J_{rec} \quad (4.9)$$

ความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนและพาหะโฮลจะมีความสมดุลในวัสดุ ผลรวมของการรวมตัวใหม่ในวัสดุในเทอมของความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยเฉลี่ย (Δn_{av}) และค่าช่วงชีวิตของพาหะโดยที่มีความหนาแน่นของตัวอย่างเท่ากับ W แสดงได้ดังสมการที่ (4.10)

$$J_{ph} = \Delta n_{av} qW / \tau_{eff} \quad (4.10)$$

จากความสัมพันธ์ $\Delta n = G\tau_{eff}$ ความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนและพาหะโฮลที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงจะมีค่าเท่ากัน ($\Delta n = \Delta p$) เป็นผลทำให้ค่าความนำของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความนำสุทธิแสดงได้ดังสมการที่ (4.10)

$$\sigma_L = q(\Delta n_{av} \mu_n + \Delta p_{av} \mu_p)W = q\Delta n_{av} (\mu_n + \mu_p)W \quad (4.11)$$

โดยที่ μ_n และ μ_p คือค่าความคล่องตัวของพาหะอิเล็กตรอนและพาหะโฮล (mobility) ตามลำดับ จากสมการที่ (4.11) สามารถหาค่า Δn_{av} และ $\mu_n + \mu_p$ ได้จากการวัดค่าความนำทางไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสง ค่าประสิทธิผลของช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อย τ_{eff} หาค่าได้จากการแทนค่าสมการที่ (4.9) ลงในสมการที่ (4.8) ดังสมการต่อไปนี้

$$\tau_{eff} = \sigma_L / [J_{ph} (\mu_n + \mu_p)] \quad (4.12)$$

ข้อมูลจากเทคนิคการวัดแบบ quasi-steady-state เราสามารถเขียนสมการแรงดันเปิดวงจร (V_{OC}) ให้อยู่ในรูปของความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยเฉลี่ยได้ดังสมการที่ (4.12)

$$V_{OC} = (kT/q) \ln \left[(\Delta n_{av} (N_A + \Delta p) / n_i^2) + 1 \right] \quad (4.13)$$

การวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะในงานวิจัยนี้ได้นำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบด้วยชั้นพาสซิเวชันที่มีลวดลายช่องเปิดด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีดเงื่อนไปการสร้างรอยต่อพี-เอ็นด้วยการเติมสารเจือฟอสฟอรัสด้วยอัตราส่วน TEOS: $H_3PO_4 = 4:1$ ที่อุณหภูมิการแพร่ซึม $1,000^\circ C$ นาน 60 นาที ความหนาของชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์และระยะห่างช่องเปิดค่าต่าง ๆ ซึ่งความหนาและระยะห่างช่องเปิดชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์นี้มีผลต่อค่าช่วงชีวิตของพาหะ โดยค่าช่วงชีวิตพาหะที่ได้จากการวัดนี้เป็นค่าช่วงชีวิตพาหะก่อนที่พาหะจะรวมตัวใหม่ที่บริเวณเนื้อวัสดุ (Bulk recombination lifetime) และมีความแตกต่างกันไปตามความหนาและระยะห่างของช่องเปิดชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ตารางที่ 4.10 แสดงเงื่อนไขโครงสร้างโดยที่ระยะช่องเปิดของชั้นพาสซิเวชันซึ่งกำหนดให้ชิ้นงานทุกชิ้นมีขนาด $1 \times 1 \text{ cm}^2$ ในการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น เน้นการศึกษาผลของชั้นพาสซิเวชันที่มีอัตราส่วนของพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ส่วนที่ไม่ถูกเปิดช่อง ที่มีต่อค่าประสิทธิภาพของช่วงชีวิตของพาหะที่เกี่ยวข้องกับอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะ ดังนั้นในส่วนงานวิจัยนี้จะไม่นำชั้นโลหะกริดด้านบนมาพิจารณาหรือมีส่วนของโครงสร้างนี้มาพิจารณา

ตารางที่ 4.12 เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อพี-เอ็นในเงื่อนไขที่มีความหนาและระยะห่างของช่องเปิดที่ต่างกันเปรียบเทียบ โครงสร้างที่ไม่มีเปิดช่องชั้นพาสซิเวชัน

ชื่อชิ้นงาน	ความหนาชั้น SiO_2	ระยะห่างช่องเปิดลวดลายเส้นตรง	อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ส่วนที่ไม่ปิดช่อง(%)	เงื่อนไขที่ใช้ร่วมกันในทุกชิ้นงาน
S ₁ . n ⁺ emitter/p-Si /Al	ไม่มี	ไม่มี	-	อัตราส่วนต่อปริมาตร TEOS/ $H_3PO_4 = 4:1$ ความต้านทานแผ่นชั้นเอ็น ประมาณ 120 Ω/\square ชั้นอะลูมิเนียมหนา 30 μm
S ₂ . MIS: n ⁺ emitter/p-Si/ SiO_2 /Al	100 nm	ไม่มี	-	
S ₃ . BSF : n ⁺ emitter/p-Si/p ⁺ Si/Al	ไม่มี	ไม่มี	-	
S ₄ . Localized p ⁺ contacts_100 nm -190	100 nm	190 μm	67.39	
S ₅ . Localized p ⁺ contacts_100 nm -350	100 nm	350 μm	34.23	
S ₆ . Localized p ⁺ contacts_100 nm -780	100 nm	780 μm	15.6	

ตารางที่ 4.12 เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อพี-เอ็นในเงื่อนไขที่มีความหนาและระยะห่างของช่องเปิดที่ต่างกันเปรียบเทียบ โครงสร้างที่ไม่มีการเปิดช่องชั้นพาสซีเวชัน (ต่อ)

ชื่อชิ้นงาน	ความหนาชั้น SiO ₂	ระยะห่างช่องเปิด ลวดลายเส้นตรง	อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ส่วนที่ไม่ปิดช่อง (%)	เงื่อนไขที่ใช้ร่วมกันในทุกชิ้นงาน
S ₇ . Localized p ⁺ contacts_150 nm-190	150 nm	190 μm	67.39	อัตราส่วนต่อปริมาตร TEOS/ H ₃ PO ₄ = 4:1 ความต้านทานแผ่นชั้นเอ็น ประมาณ 120 Ω/□ ชั้นอะลูมิเนียมหนา 30 μm
S ₈ . Localized p ⁺ contacts_150 nm-350	150 nm	350 μm	34.23	
S ₉ . Localized p ⁺ contacts_150 nm-780	150 nm	780 μm	15.6	

นิยามของชื่อชิ้นงานและแสดงผลของค่าช่วงชีวิตพาหะที่วัดได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.13 โดยแต่ละชื่อชิ้นของชิ้นงานมีความหมายดังนี้

S₁. n⁺ emitter/p-Si /Al แสดงโครงสร้างผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็นที่ใช้เทคนิคการแพร่ซึมแบบ SOD และชั้นอะลูมิเนียมเคลือบด้านหลัง

S₂. n⁺ emitter/p-Si/SiO₂/Al อาจเรียกว่าโครงสร้าง MIS เป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนชั้นรอยต่อพี-เอ็น และชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนา 100 nm และชั้นอะลูมิเนียมเคลือบด้านหลัง

S₃. n⁺ emitter/p-Si/p⁺Si/Al อาจเรียกว่าโครงสร้าง BSF เป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น และซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูงและชั้นอะลูมิเนียมเคลือบด้านหลัง

S₄. Localized p⁺ contacts_100 nm -190 เป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 100 nm เคลือบแผ่นด้านหลังมีขนาดกว้างของช่องเปิด 100 μm เมื่อผ่านการอบที่ความร้อนระดับ eutectic แล้วจะมีบริเวณ p⁺-Si เกิดในช่องเปิดขนาดกว้างเฉลี่ย 101±30 μm และระยะห่างของช่องเปิด 190 μm และมีชั้นอะลูมิเนียมเคลือบด้านหลัง

S₅. Localized p⁺ contacts_100 nm -350 เป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 100 nm เคลือบแผ่นด้านหลังมีขนาดกว้างของช่องเปิด 100 μm เมื่อผ่านการอบที่ความร้อนระดับ eutectic แล้วจะมีบริเวณ p⁺-Si เกิดในช่องเปิดขนาดกว้างเฉลี่ย 101 \pm 30 μm และระยะห่างของช่องเปิด 350 μm และมีชั้นอลูมิเนียมเคลือบด้านหลัง

S₆. Localized p⁺ contacts_100 nm -780 เป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 100 nm เคลือบแผ่นด้านหลังมีขนาดกว้างของช่องเปิด 100 μm เมื่อผ่านการอบที่ความร้อนระดับ eutectic แล้วจะมีบริเวณ p⁺-Si เกิดในช่องเปิดขนาดกว้างเฉลี่ย 101 \pm 30 μm และระยะห่างของช่องเปิด 780 μm และมีชั้นอลูมิเนียมเคลือบด้านหลัง

S₇. Localized p⁺ contacts_150 nm -190 เป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 150 nm เคลือบแผ่นด้านหลังมีขนาดกว้างของช่องเปิด 100 μm เมื่อผ่านการอบที่ความร้อนระดับ eutectic แล้วจะมีบริเวณ p⁺-Si เกิดในช่องเปิดขนาดกว้างเฉลี่ย 101 \pm 30 μm และระยะห่างของช่องเปิด 190 μm และมีชั้นอลูมิเนียมเคลือบด้านหลัง

S₈. Localized p⁺ contacts_150 nm -350 เป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 150 nm เคลือบแผ่นด้านหลังมีขนาดกว้างของช่องเปิด 100 μm เมื่อผ่านการอบที่ความร้อนระดับ eutectic แล้วจะมีบริเวณ p⁺-Si เกิดในช่องเปิดขนาดกว้างเฉลี่ย 101 \pm 30 μm และระยะห่างของช่องเปิด 350 μm และมีชั้นอลูมิเนียมเคลือบด้านหลัง

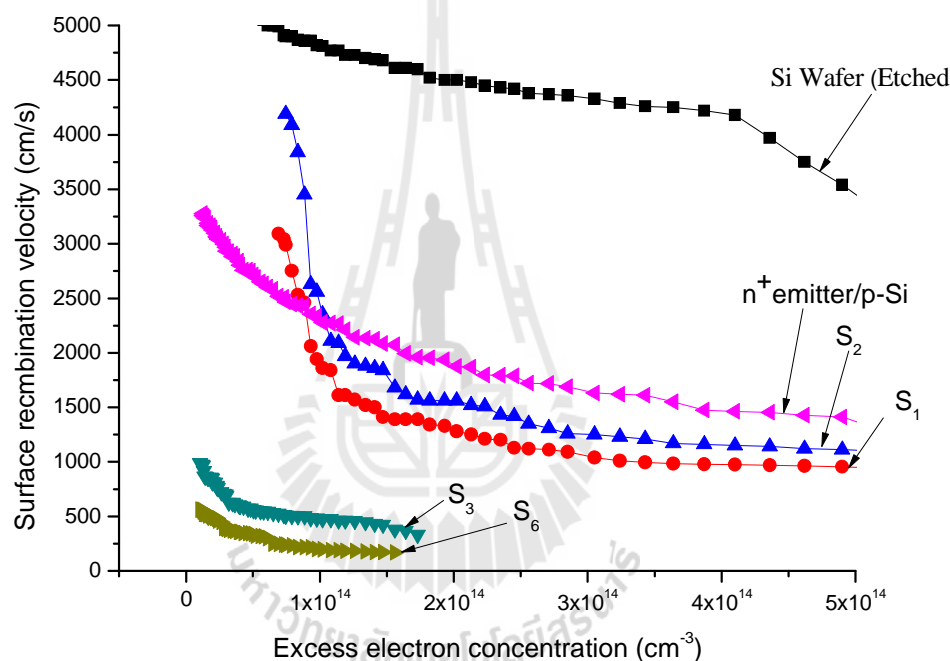
S₉. Localized p⁺ contacts_150 nm -780 เป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 150 nm เคลือบแผ่นด้านหลังมีขนาดกว้างของช่องเปิด 100 μm เมื่อผ่านการอบที่ความร้อนระดับ eutectic แล้วจะมีบริเวณ p⁺-Si เกิดในช่องเปิดขนาดกว้างเฉลี่ย 101 \pm 30 μm และระยะห่างของช่องเปิด 780 μm และมีชั้นอลูมิเนียมเคลือบด้านหลัง

ตารางที่ 4.13 ค่าช่วงชีวิตและอัตราความเร็วของการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิวของชิ้นงานในเงื่อนไขโครงสร้างพาสซีวชันที่แตกต่างกัน (แสดงรายละเอียดการวัดได้ดังภาพผนวก ง)

ชื่อชิ้นงาน	ค่าช่วงชีวิต ($\tau_{meas}, \mu s$)	ค่าอัตราความเร็วในการรวมตัวที่ผิวด้านหลัง ($S_{eff}, cm/s$)
Si Wafer (Etched)	3.96	4,798
S ₁ . n ⁺ emitter/p-Si /Al	10.48	1,813
S ₂ . MIS: n ⁺ emitter/pSi/SiO ₂ /Al	9.08	2,093
S ₃ . BSF : n ⁺ emitter/pSi/p ⁺ Si/Al	40.64	469
S ₄ . Localized p ⁺ contacts_100 nm -190	61.44	316
S ₅ . Localized p ⁺ contacts_100 nm -350	76.62	248
S ₆ . Localized p ⁺ contacts_100 nm -780	98.18	194
S ₇ . Localized p+ contacts_150 nm-190	57.88	348
S ₈ . Localized p+ contacts_150 nm-350	70.79	268
S ₉ . Localized p+ contacts_150 nm-780	90.52	210

จากผลการวัดค่าช่วงชีวิตตารางที่ 4.14 พบว่าตัวอย่างที่ขึ้นพาสซีวชันหนา 100 nm ระยะห่างช่องเปิดเท่ากับ 780 μm นั้นได้ค่าช่วงชีวิตของพาหะที่ยาวที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น ๆ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการทำการเปิดช่องที่ระยะห่างมากกว่า 780 μm ซึ่งผู้วิจัยยังไม่ได้คำนึงถึง แต่จากความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการแปลงพลังงานกับอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ส่วนที่ไม่ถูกเปิดช่อง (%) ในรูปที่ 2.17 พบว่าอัตราส่วนที่น้อยกว่า 20% ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานก็ไม่ต่างกันมากนัก เมื่อนำไปแทนในสมการที่ (4.1) จะได้ค่าอัตราความเร็วในการรวมตัวของพาหะที่ผิวด้านหลัง (S_{eff}) ตามโครงสร้างของชิ้นงาน รูปกราฟที่ 4.21 แสดงผลของอัตราความเร็วในการรวมตัวของพาหะที่ผิวด้านหลังของโครงสร้างต่าง ๆ ที่ความหนาแน่นพาหะส่วนเกิน (Excess electron concentration : cm^{-3}) และผลของอัตราความเร็วในการรวมตัวของพาหะที่ผิวด้านหลัง โครงสร้างช่องเปิดที่มีระยะห่างและความหนาฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ค่าต่าง ๆ โครงสร้างที่ 4-9

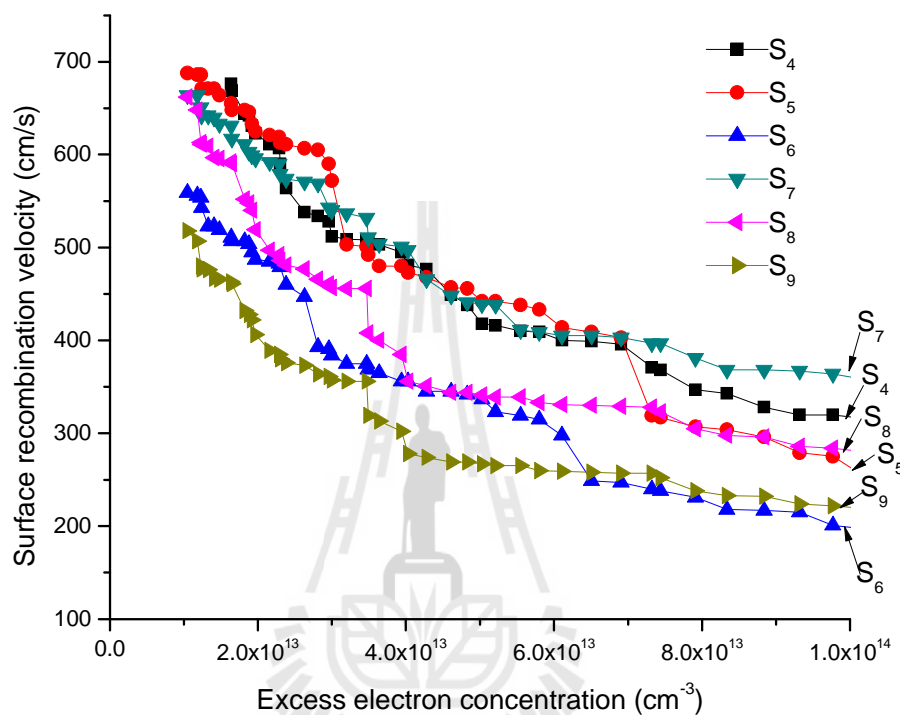
จากผลความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพาหะส่วนเกินกับอัตราความเร็วในการรวมตัวของพาหะที่ผิวด้านหลังโครงสร้างต่าง ๆ พบว่าในแต่ละโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อพี-เอ็นมีผลต่ออัตราความเร็วในการรวมตัวของพาหะที่ผิวด้านหลังของพาหะ โครงสร้างที่มีชั้นพาสซิเวชันบริเวณแบบเปิดช่องชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ จะให้ค่าอัตราความเร็วในการรวมตัวของพาหะที่ผิวด้านหลังที่ตำแหน่งความหนาแน่นพาหะค่าต่างๆที่ต่ำกว่าโครงสร้างอื่นที่ไม่มีชั้นพาสซิเวชัน เนื่องจากจะได้รับความหนาแน่นของพาหะส่วนเกิน Δn_{av} มีปริมาณสูงอยู่ทำให้ค่า V_{oc} ที่ได้มีค่าสูง ดังสมการที่ (4.12)



รูปที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพาหะส่วนเกินกับอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะโครงสร้างแบบต่าง ๆ

รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพาหะส่วนเกินกับอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิวด้านหลังโครงสร้างที่มีชั้นพาสซิเวชันแบบเปิดช่องชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เงื่อนไขที่มีช่องเปิดขนาดต่าง ๆ จากกราฟจะเห็นว่าโครงสร้างประกอบด้วยชั้นรอยต่อพี-เอ็น ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 100 nm กว้างเฉลี่ย 150 μm และระยะห่าง 780 μm นั้นให้ค่าอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิวด้านหลังมีค่าต่ำสุดในที่ฟังก์ชันของความหนาแน่นพาหะค่าต่างๆกัน เมื่อเทียบกับโครงสร้างอื่น ๆ ซึ่งเป็นผลดีต่อค่า V_{oc} และ I_{sc} เนื่องจากมีค่าช่วงชีวิตของพาหะที่สูงขึ้น พารามิเตอร์ที่ได้เหล่านี้มีความสำคัญที่จะนำไปคำนวณใน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น ด้วยโปรแกรม PC1D ที่กำหนดให้ค่าอื่น ๆ เช่น ความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมและขนานภายในของเซลล์มีค่าตามมาตรฐานอุตสาหกรรมเพื่อจำลองหาค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานต่อไป



รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพาหะส่วนเกินกับอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็นในเงื่อนไขที่มีชั้นพาสซีเวชันกับระยะห่างช่องเปิดค่าต่าง ๆ

4.7 การวิเคราะห์การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จากพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองด้วยแบบจำลอง PC1D

แบบจำลอง PC1D เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำโครงสร้างรอยต่อพี-เอ็น เช่น ทรานซิสเตอร์ ไดโอด รวมถึงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยกรณีแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน โดยมีหน้าต่างการทำงานของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 4.23 ที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในแบบจำลอง PC1D เพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีการจำลองแหล่งแสงเทียมมาตรฐาน AM1.5 ใช้ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน

ตารางที่ 4.14 พารามิเตอร์ที่สำคัญของแบบจำลอง PC1D เพื่อนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานในเซลล์แสงอาทิตย์

ชื่อพารามิเตอร์	ค่ามาตรฐานที่ใช้
Device area (cm ²)	100 cm ²
Thickness (μm)	380 μm
Texture angle (degrees)	54.74
Front, Texture depth (μm)	8
Front Reflectance (%)	14%
τ_{meas} (μs)	ตามเงื่อนไขในตารางที่ 4.11
S_{front} (cm / s)	1×10^5
S_{back} (cm / s)	ตามเงื่อนไขในตารางที่ 4.11
1st front diff. (cm ⁻³)	6.2×10^{20} cm ⁻³
1st rear diff. (cm ⁻³)	1×10^{20} cm ⁻³

เมื่อนำค่าช่วงชีวิตของพาหะ (τ_{meas}) และค่าความเร็วการรวมตัวที่ผิวด้านหลัง (Back surface recombination velocity, BSRV: S_{eff}) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดชิ้นงานที่มีเงื่อนไขดังตารางผลการทดลองที่ 4.14 เพื่อนำมาคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสลัดวงจร (I_{sc}) แรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) กำลังไฟฟ้าสุทธิขาออก (P_{max}) ฟิสิกส์แฟกเตอร์ (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) กับค่าช่วงชีวิตของพาหะ จำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เป็นพารามิเตอร์พื้นฐานในแบบจำลองของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในตารางที่ 4.15 และค่ากระแสลัดวงจร ค่าแรงดันเปิดวงจร ค่ากำลังไฟฟ้าสุทธิขาออก และค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเงื่อนไขโครงสร้างต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.16 รูปที่ 4.25 แสดงคุณลักษณะ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลอง PC1D ในเงื่อนไขตัวอย่างโครงสร้าง S₃ และรูปที่ 4.26 แสดงผลการจำลองของเซลล์ที่ได้จากแบบจำลอง PC1D ในเงื่อนไขตัวอย่างโครงสร้าง S₃ ซึ่งประกอบด้วยกราฟ Quantum Efficiency กราฟ Generate & Recombination กราฟ Carrier Densities และกราฟ Base Current & Power

3.prm - PC1D for Windows

File Device Excitation Compute Graph View Options Help

1 S_f S_r

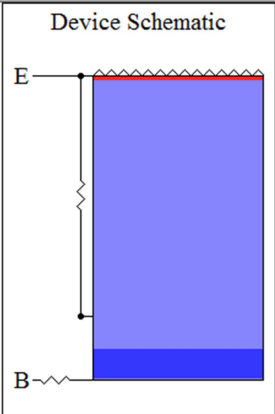
DEVICE
 Device area: 100 cm²
 Front surface texture depth: 8 μm
No surface charge
 Exterior Front Reflectance: 14%
No Exterior Rear Reflectance
 Internal optical reflectance enabled
 Front surface optically rough
 Emitter contact enabled
 Base contact: 0.015 Ω
 Internal conductor: 0.3 S

REGION 1
 Thickness: 380 μm
 Material from si.mat
 Carrier mobilities from internal model
 Dielectric constant: 11.9
 Band gap: 1.124 eV
 Intrinsic conc. at 300 K: 1×10¹⁰ cm⁻³
 Refractive index from si.inr
 Absorption coeff. from si300.abs
 Free carrier absorption enabled
 P-type background doping: 5×10¹⁵ cm⁻³
 1st front diff.: N-type, 6.2×10²⁰ cm⁻³ peak
No 2nd front diffusion
 1st rear diff.: P-type, 1×10²⁰ cm⁻³ peak
No 2nd rear diffusion
 Bulk recombination: τ_n = τ_p = 40.65 μs
 Front-surface recom.: S model, S_n = S_p = 1×10⁵ cm/s
 Rear-surface recom.: S model, S_n = S_p = 469 cm/s

EXCITATION
 Excitation from one-sun.exc
 Excitation mode: Transient, 16 timesteps
 Temperature: 25°C
 Base circuit: Sweep from -0.8 to 0.8 V
Collector circuit: Zero
 Primary light source enabled
 Constant intensity: 0.1 W cm⁻²
 Spectrum from am15g.spc
Secondary light source disabled

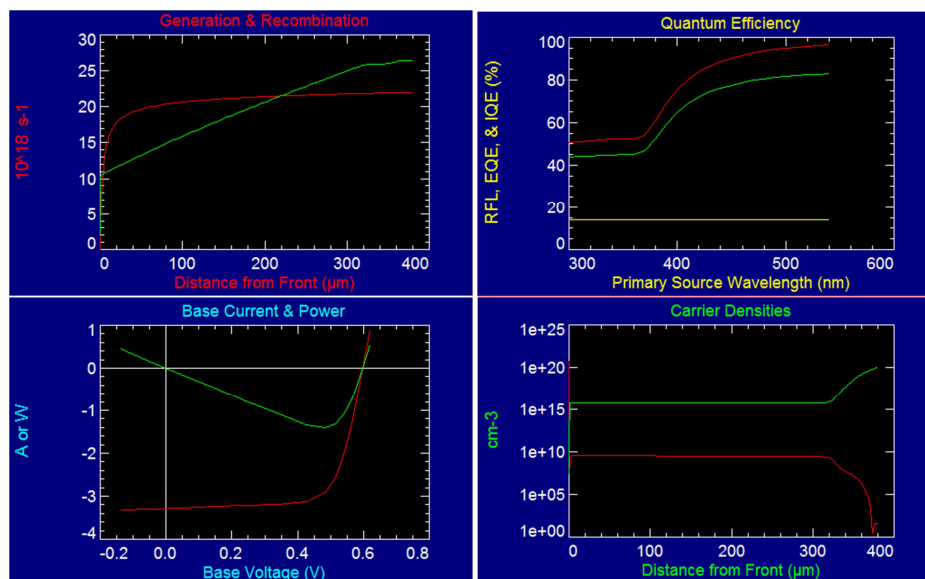
RESULTS
 Short-circuit I_b: -3.283 amps
 Max base power out: 1.414 watts
 Open-circuit V_b: 0.5985 volts

Device Schematic



For Help, press F1

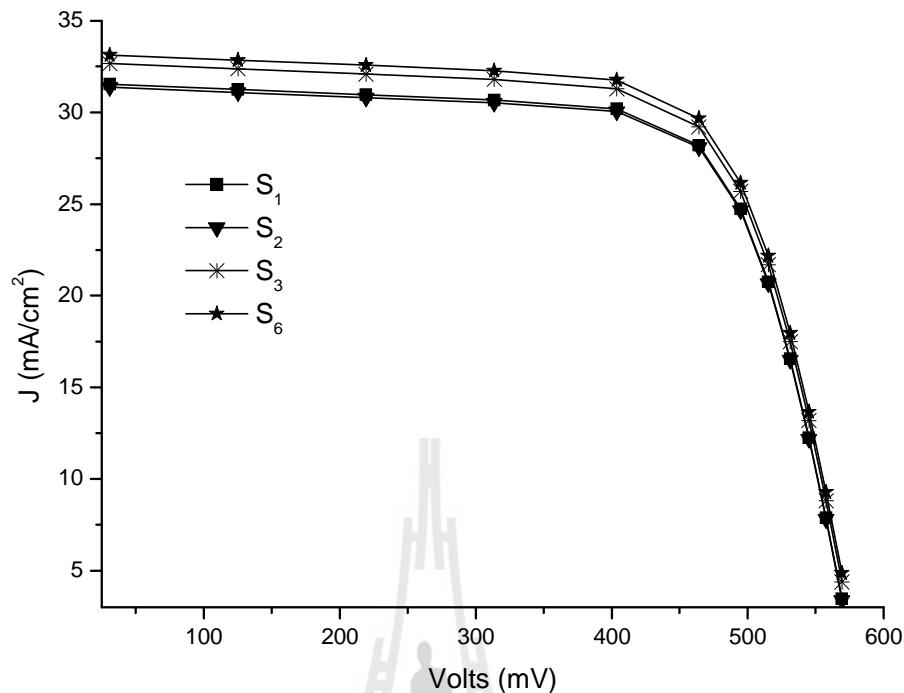
รูปที่ 4.23 หน้าต่างการทำงานของโปรแกรมแบบจำลอง PC1D ของตัวอย่าง S₃



รูปที่ 4.24 หน้าต่างผลที่ได้การทำงานของโปรแกรมแบบจำลอง PCID ของตัวอย่าง S₃

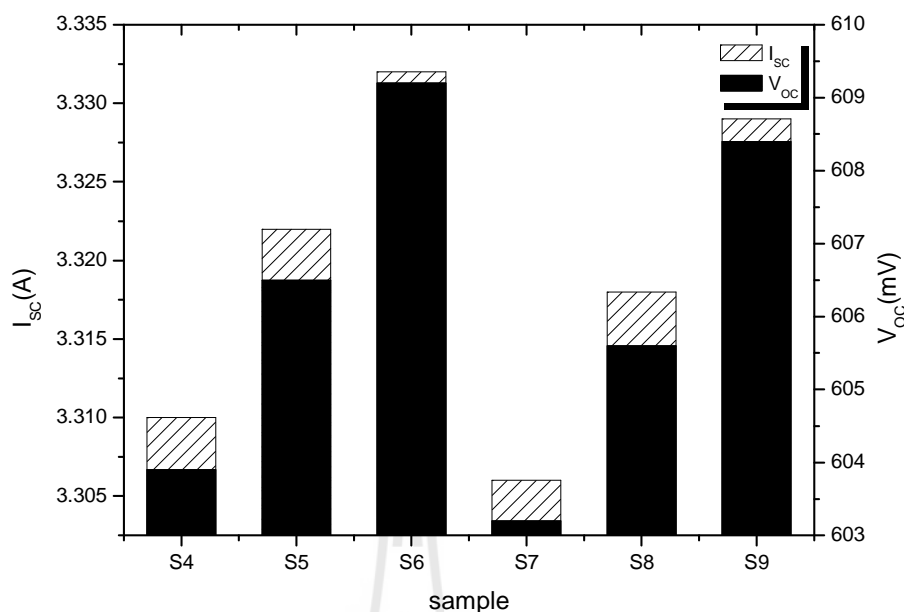
ตารางที่ 4.15 ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 100 cm² โครงสร้างต่าง ๆ จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง PCID

ชื่อชิ้นงาน	กระแส ลัดวงจร I_{sc} (A)	แรงดันเปิด วงจร V_{oc} (mV)	กำลังไฟฟ้า สูงสุด P_{max} (W)	Fill factor (FF)	ประสิทธิภาพ การแปลง พลังงาน η (%)
S ₁ . n ⁺ emitter/p-Si /Al	3.163	577.8	1.309	0.7162	13.09
S ₂ . MIS: n ⁺ emitter/pSi/SiO ₂ /Al	3.146	576.1	1.298	0.7162	12.98
S ₃ . BSF : n ⁺ emitter/pSi/p ⁺ Si/Al	3.283	598.5	1.414	0.7196	14.14
S ₄ . Localized p ⁺ contacts_100 nm -200	3.310	603.9	1.440	0.7204	14.40
S ₅ . Localized p ⁺ contacts_100 nm -500	3.322	606.5	1.452	0.7207	14.52
S ₆ . Localized p ⁺ contacts_100 nm -1000	3.332	609.2	1.464	0.7212	14.64
S ₇ . Localized p ⁺ contacts_150 nm-200	3.306	603.2	1.436	0.7201	14.36
S ₈ . Localized p ⁺ contacts_150 nm-500	3.318	605.6	1.448	0.7206	14.48
S ₉ . Localized p ⁺ contacts_150 nm-1000	3.329	608.4	1.460	0.7209	14.60



รูปที่ 4.25 คุณสมบัติ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลอง PC1D เปรียบเทียบระหว่าง
ชิ้นงานที่ทำชั้นพาสซีเวชัน S₆ กับชิ้นงานโครงสร้าง S₁ S₂ และ S₃

รูปที่ 4.25 แสดงกราฟคุณสมบัติ I-V ที่ได้จากแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม PC1D ภายใต้ความเข้มแสง 0.1 watt/cm² มาตรฐาน AM1.5 เงื่อนไขค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับโครงสร้างที่มีชั้นพาสซีเวชันดังแสดงในตารางที่ 4.16 พบว่าชิ้นงานที่ทำชั้นพาสซีเวชันด้วยเทคนิคการสร้างช่องเปิดชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด ให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่มีโครงสร้างชั้นพาสซีเวชันและยังให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุดที่เงื่อนไขโครงสร้างประกอบด้วยชั้นรอยต่อพี-เอ็น ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนา 100 nm ซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูงที่มีขนาดกว้าง 100 μm และระยะห่าง 780 μm และมีชั้นอลูมิเนียม ($\eta = 14.64\%$) ซึ่งสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่มีโครงสร้างชั้นพาสซีเวชันถึง 1.66% อีกด้วย



รูปที่ 4.26 ผลของการเปิดช่องโคอีเล็กทริกสำหรับชั้นพาสซีเวชันด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ ตัวอย่าง S₄ S₅ S₆ S₇ S₈ และ S₉ ที่มีต่อค่า I_{sc} และ V_{oc}

รูปที่ 4.26 ผลของการเปิดช่องโคอีเล็กทริกสำหรับชั้นพาสซีเวชันด้านหลังของเซลล์ที่มีผลต่อค่า I_{sc} และ V_{oc} ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม PC1D ภายใต้ความเข้มแสง 0.1 watt/cm² เงื่อนไขโครงสร้างที่มีชั้นพาสซีเวชันที่ระยะห่างของช่องเปิดค่าต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.16 พบว่าชั้นงานที่ทำชั้นพาสซีเวชันด้วยเทคนิคการสร้างช่องเปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด ที่ให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงที่สุดในเงื่อนไข โครงสร้างประกอบด้วยชั้นรอยต่อพี-เอ็น ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนา 100 nm ซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูงที่มีขนาดกว้าง 150 μm และระยะห่าง 780 μm และมีชั้นอลูมิเนียม ($\eta = 14.64\%$)

4.8 สรุป

การเปิดช่องในชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด จากลวดลายที่ออกแบบไว้ด้วยขนาดช่องเปิด 100 μm และ 150 μm โดยชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ผลิตจากสารละลายโซล-เจล SiO₂ Solution ด้วยเทคนิค spin-coating และเปิดช่องด้วยการทำละลายของสารอะซีโตนจากการฉีดเครื่องพิมพ์ เมื่อสร้างชั้นอลูมิเนียมทับบนชั้นลวดลายของซิลิคอนไดออกไซด์สร้างขึ้นด้วยเทคนิค screen-printing ผ่านการอบที่อุณหภูมิยูเทกติก (eutectic) ของอลูมิเนียมและซิลิคอนเท่ากับ 577°C

นาน 30 นาที จะได้ p^+ -Si จากการแพร่ซึมของ Al กับ Si ในบริเวณช่องเปิด ซึ่งขนาดของความกว้าง p^+ -Si ที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับขนาดช่องเปิดที่ออกแบบไว้มีความกว้างเฉลี่ย $101 \pm 30 \mu\text{m}$ จากผลดังกล่าวจะได้อายุขัยของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ p -Si ส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าที่รอยสัมผัส p^+/p -Si บริเวณช่องเปิดนั้น ซึ่งเป็นผลให้ได้ค่าช่วงชีวิตของพาหะสูงขึ้น



บทที่ 5

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปงานวิจัย

จากการออกแบบและกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพาสซีเวชันด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการลดทอนชั้นพาสซีเวชันด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด ได้ใช้เครื่องพิมพ์ canon รุ่น IP 1980 มาปรับปรุงเพื่อให้สามารถใช้งานได้ดีกับแผ่นฐานซิลิคอน โดยลดทอนที่สร้างเป็นลดทอนเส้นตรงที่มีขนาดกว้าง 150 μm และระยะห่างที่มีขนาด 190 μm 350 μm และ 780 μm

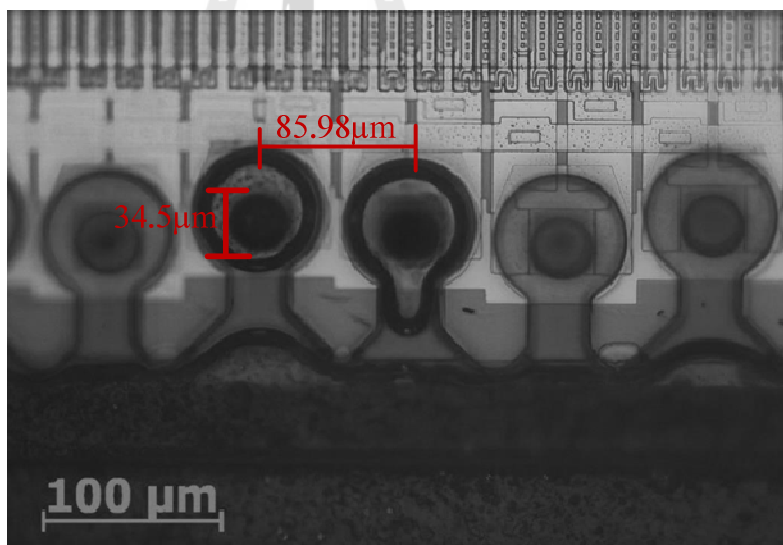
โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ยังคงเป็นรอยต่อพีเอ็น แต่เทคนิคที่ใช้ในการสร้างรอยต่อพีเอ็นของงานวิจัยนี้ได้นำเทคนิค Spin-on doping (SOD) มาใช้ โดยกระบวนการจะเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิและสารเคมีที่เป็นสารเจือฟอสฟอรัส จากผลการทดลองพบว่า ความต้านทานของแผ่นที่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของฟอสฟอรัส อุณหภูมิและเวลาในการแพร่สารเจือ ผลของความต้านทานของการแพร่สารเจือจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย ในการทดลองนี้เลือกใช้แผ่นฐานซิลิคอนที่มีค่าความต้านทานแผ่น 8 $\Omega\cdot\text{cm}$ และค่าความต้านทานแผ่นของสารเจือชั้นเอ็นอยู่ที่ได้ระหว่าง 60-125 Ω/\square

การสร้างชั้นพาสซีเวชันที่ผิวด้านหลังด้วยเทคนิค การแลกเปลี่ยนชั้นเฟสของอลูมิเนียมอินดิวิส (Aluminum Induce layerexchange : ALILE) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่าย และมีต้นทุนต่ำกว่าเทคนิคที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรมอย่างเช่น เทคนิคโฟโตลิโทกราฟี การสร้างชั้นพาสซีเวชันที่ผิวด้านหลังเซลล์ด้วยเทคนิคนี้ได้ทำการสร้างช่องเปิดชั้นออกไซด์ซิลิคอนด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีดภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิการอบที่เหมาะสม และเข้าใกล้อุณหภูมิยูเทกติก (eutectic) ของอลูมิเนียมสำหรับงานวิจัยนี้คือ 577°C นาน 30 นาที (ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์) เป็นผลทำให้เกิดช่องเปิดที่มีขนาดเหมาะสมกว้างเฉลี่ย 101 \pm 30 μm หลังจากนั้นทำการสร้างชั้นอะตอมสารเจือความเข้มข้นสูงชนิดพี (p^+ - Si) ด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนชั้นเฟสระหว่างอะมอर्फัสซิลิคอนกับอลูมิเนียม ซึ่งระยะห่างช่องเปิดที่เหมาะสมที่สุด คือมีอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ส่วนที่ไม่ถูกเปิดช่องตั้งแต่ 1-20 % จากการทดลองได้ใช้เงื่อนไขช่องเปิด SiO₂ ขนาด 150 μm และระยะห่างระหว่างช่องเปิดชั้น SiO₂ นี้ 780 μm ทำให้ได้ค่าช่วงชีวิตของพาหะที่ยาวถึง 98.18 μs

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การปรับปรุงเครื่องพิมพ์แบบที่ใช้สร้างลวดลาย

- 1) ในการเปลี่ยนสารที่ใส่ในคาร์ทริดนั้น ต้องทำให้มีความสะอาดและแห้งเมื่อกำจัดสารปนเปื้อนในสารละลาย
- 2) คาร์ทริดที่บรรจุสารละลาย ควรผลิตจากวัสดุที่ทนต่อสารละลายได้ดี เช่น วัสดุเทปลอน เป็นต้น
- 3) การทดสอบฉีดสารไวแสง(Photoresist) โดยตรงจากคาร์ทริดนั้น ยังไม่สามารถกระทำได้นี้เนื่องจากการทำงานของคาร์ทริดนี้เป็นแบบ Thermal กล่าวคือต้องให้ความร้อนกับสารที่ใช้โดย heater ในการทำให้เกิดไอน้ำซึ่งจะขยายและดันให้น้ำหมึก แตกออกเป็นหยดเล็กๆ และถูกผลักรอกจาก หัวฉีด แต่สารไวแสง เป็นสารที่โดนความร้อนแล้วจะเกิดการแข็งตัว ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการอุดตันที่ หัวฉีดดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ภาพขยายของหัวพิมพ์แบบฉีดด้วยกล้องจุลทรรศน์

5.2.2 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

- 1) เนื่องจากปัญหาเรื่องการทำขั้วโลหะที่ผิวด้านรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าความต้านทานสูง ดังนั้นจึงเลี่ยงปัญหานี้ด้วยการสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณประสิทธิภาพ

2) แนวทางในการแก้ปัญหาเรื่องการทำขี้โลหะที่ผิวด้านรับแสง ต้องหาเงื่อนไขที่เหมาะสม สำหรับการอบขี้โลหะที่สร้างขึ้นจากการสกรีนและความสะอาดของผิวรอยต่อ ก่อนการทำขี้โลหะดังกล่าว



รายการอ้างอิง

- ณัฐพงษ์ ฝิวผา และทิพย์วรรณ ฝิงสุวรรณรักษ์ (1-3 ธันวาคม 2553). “การพัฒนาเครื่อง *Inkjet Printer* ต้นทุนต่ำเพื่อเปิดช่องทางจำหน่ายของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) จ.เชียงใหม่
- Aberle, A. G. (2000). **Surface passivation of crystalline silicon solar cells: a review.** *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 8(5), 473-487.
- Bock, R., Mau, S., Schmidt, J., & Brendel, R. (2010). **Back-junction back-contact n-type silicon solar cells with screen-printed aluminum-alloyed emitter.** *Applied Physics Letters*, 96(26), 263507-263507-263503.
- Cho, H., Parameswaran, M., & Yu, H.-Z. (2007). **Fabrication of microsensors using unmodified office inkjet printers.** *Sensors and Actuators B: Chemical*, 123(2), 749-756.
- Davis, J. R., Jr., Rohatgi, A., Hopkins, R. H., Blais, P. D., Rai-Choudhury, P., McCormick, J. R., & Mollenkopf, H. C. (1980). **Impurities in silicon solar cells.** *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 27(4), 677-687. doi: 10.1109/T-ED.1980.19922
- Eom, S. H., Park, H., Mujawar, S. H., Yoon, S. C., Kim, S.-S., Na, S.-I., . . . Lee, S.-H. (2010). **High efficiency polymer solar cells via sequential inkjet-printing of PEDOT:PSS and P3HT:PCBM inks with additives.** *Organic Electronics*, 11(9), 1516-1522.
- Glunz, S., Preu, R., & Biro, D. .16: **Crystalline Silicon Solar Cells–State-of-the-Art and Future Developments.**
- Green, M. A. (2000). **Photovoltaics: technology overview.** *Energy Policy*, 28(14), 989-998.
- Hebner, T. R., Wu, C. C., Marcy, D., Lu, M. H., & Sturm, J. C. (1998). **Ink-jet printing of doped polymers for organic light emitting devices.** *Applied Physics Letters*, 72(5), 519-521.
- Katsu, T. (2002). **Space solar cell:** Google Patents.
- Kern, W. (1993). *Handbook of semiconductor wafer cleaning technology* (Vol. 623): Noyes Park Ridge, NJ.

- Komatsu, Y., Stassen, A. F., Venema, P., Vlooswijk, A. H., Meyer, C., & Koorn, M. (2010). ***Sophistication of doping profile manipulation-emitter performance improvement without additional process step.*** Paper presented at the Proc. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain.
- Lange, A., Wegener, M., Boeffel, C., Fischer, B., Wedel, A., & Neher, D. (2010). **A new approach to the solvent system for inkjet-printed P3HT:PCBM solar cells and its use in devices with printed passive and active layers.** *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(10), 1816-1821.
- Lee, E. R. (2010). *Microdrop generation* (Vol. 5): CRC press.
- Lennon, A. J., Ho-Baillie, A. W. Y., & Wenham, S. R. (2009). **Direct patterned etching of silicon dioxide and silicon nitride dielectric layers by inkjet printing.** *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(10), 1865-1874.
- Lennon, A. J., Utama, R. Y., Lenio, M. A. T., Ho-Baillie, A. W. Y., Kuepper, N. B., & Wenham, S. R. (2008). **Forming openings to semiconductor layers of silicon solar cells by inkjet printing.** *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(11), 1410-1415.
- Phiwpha, N., & Fangsuwannarak, T. (2013). **Surface Passivation of Point-Contacted Solar Cells by Inkjet Printing.** *Integrated Ferroelectrics*, 149(1), 102-106.
- Ponce-Alcantara, S., del Canizo, C., & Luque, A. (2005, 2-4 Feb. 2005). **PERC structure to improve multicrystalline solar cell performance.** Paper presented at the Electron Devices, 2005 Spanish Conference on.
- Pond, S. F. (2000). ***Inkjet technology and product development strategies: Torrey Pines Research Carlsbad, CA.***
- Shafiee, A., Salleh, M. M., & Yahaya, M. (2008, 25-27 Nov. 2008). ***Fabrication of organic solar cells based on a blend of donor-acceptor molecules by inkjet printing technique.*** Paper presented at the Semiconductor Electronics, 2008. ICSE 2008. IEEE International Conference on.
- Shockley, W., & Read Jr, W. (1952). **Statistics of the recombinations of holes and electrons.** *Physical Review*, 87(5), 835.

- Sinton, R. A., Cuevas, A., & Stuckings, M. (1996, 13-17 May 1996). ***Quasi-steady-state photoconductance, a new method for solar cell material and device characterization.*** Paper presented at the Photovoltaic Specialists Conference, 1996., Conference Record of the Twenty Fifth IEEE.
- Tang, Y., Wang, G., Hu, Z., Qin, X., Du, G., & Shi, W. (2012). **Preparation of n+ emitter on p-type silicon wafer using the spin-on doping method.** *Materials Science in Semiconductor Processing*, 15(4), 359-363.
- Teng, K. F., & Wu, P. (1989). **Metallo-organic decomposition for superconductive YBa/sub 2/Cu/sub 3/O/sub 7-x/ film.** *Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on*, 12(1), 96-98.
- Teranishi, R., Fujiwara, T., Watanabe, T., & Yoshimura, M. (2002). **Direct fabrication of patterned PbS and CdS on organic sheets at ambient temperature by on-site reaction using inkjet printer.** *Solid State Ionics*, 151(1-4), 97-103.
- Urrejola, E., Peter, K., Plagwitz, H., & Schubert, G. (2011). **Silicon diffusion in aluminum for rear passivated solar cells.** *Applied Physics Letters*, 98(15)
- Utama, R. Y. (2009). ***Inkjet Printing for Commercial High-Efficiency Silicon Solar Cells.*** *The University of New South Wales PhD thesis, Sydney.*
- Vetter, M., Orpella, A., Puigdollers, J., Cuevas, A., & Alcubilla, R. (2001). **Surface passivation of crystalline Si by plasma enhanced chemical vapor deposited amorphous films.** *Applied Physics Letters*, 79(14), 2199-2201.
- Wang, Z., Wu, W., Yang, Q., Li, Y., & Noh, C.-H. (2009). **In-situ fabrication of flexible vertically integrated electronic circuits by inkjet printing.** *Journal of Alloys and Compounds*, 486(1-2), 706-710.
- Xia, Y., & Friend, R. H. (2007). **Nonlithographic patterning through inkjet printing via holes.** *Applied Physics Letters*, 90(25)
- Zhao, J., Wang, A., Altermatt, P., & Green, M. A. (1995). **Twenty-four percent efficient silicon solar cells with double layer antireflection coatings and reduced resistance loss.** *Applied Physics Letters*, 66(26), 3636-363



ภาคผนวก ก

การคำนวณความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลายตั้งต้น

การคำนวณหาความเข้มข้นของสารเจือฟอสฟอรัสใน H_3PO_4

โดย นายณัฐพงศ์ ศิวพา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ.2556

แสดงรายละเอียดการคำนวณหาความเข้มข้นสารเจือฟอสฟอรัสใน H_3PO_4 ในบทที่ 4 หัวข้อ

4.2

การคำนวณหาความเข้มข้นของสารเจือฟอสฟอรัส H_3PO_4 กรณี $TEOS:H_3PO_4 = 4:1$

อัตราส่วน โดยปริมาตรของสารที่ใช้ดังนี้

$TEOS : C_2H_5OH : H_2O : H_3PO_4 = 5 : 1.5 : 10 : 1.25ml$

การคำนวณปริมาตรสารที่อยู่ในสารละลายที่เตรียมเพื่อหาความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดที่เตรียม

สารละลายที่ใช้เตรียมสารตั้งต้นมีดังนี้

$$TEOS \rightarrow MW = 208.33 \frac{g}{mol}$$

$$C_2H_5OH \rightarrow MW = 46.07 \frac{g}{mol}$$

$$H_3PO_4 \rightarrow MW = 98 \frac{g}{mol}$$

$$H_2O \rightarrow MW = 18 \frac{g}{mol}$$

เมื่อ MW คือมวลจากสูตรของสารละลาย

- คำนวณหาจำนวน โมลของกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4 85%)

สารละลายกรด H_3PO_4 100g มีเนื้อกรดอยู่ 85g นั่นคือมีน้ำ $100g - 85g = 15g$

H_3PO_4 ปริมาตร 1.25 ml หามวลของ H_3PO_4 ได้จาก $D = \frac{m}{v}$ หรือ $m = D \times v$

โดยที่ D = ความหนาแน่น มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร (g/ml)

m = มวลของ H_3PO_4 มีหน่วยเป็นกรัม (g)

v = ปริมาตรของ H_3PO_4 มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร (ml)

จะได้ว่ามวลของ H_3PO_4 คือ $m_{H_3PO_4} = 1.69 \frac{g}{ml} \times 1.25 ml = 2.1125 g$

นั่นคือ มีเนื้อกรด $H_3PO_4 = \frac{2.115 g \times 85 g}{100 g} = 1.7956 g$

และมีน้ำในกรด $H_3PO_4 = \frac{2.115 g \times 15 g}{100 g} = 0.3169 g$

ดังนั้น มีจำนวน โมลของกรด $H_3PO_4 = \frac{1.7956 g}{98 \frac{g}{mol}} = 0.0183 mol$

และจำนวน โมลของน้ำ $H_2O = \frac{[(10 ml \times 1 \frac{g}{ml}) + 0.3169 g]}{18 \frac{g}{mol}} = 0.5732 mol$

- คำนวณหาจำนวน โมลของเอทานอล (C_2H_5OH)

มวลของ C_2H_5OH คือ $m_{C_2H_5OH} = 0.79 \frac{g}{ml} \times 1.5 ml = 1.185 g$

ดังนั้น มีจำนวน โมลของกรด $C_2H_5OH = \frac{1.185 g}{46.07 \frac{g}{mol}} = 0.0257 mol$

สามารถแพร่สารเจือที่ผิวเข้าไปได้สูงสุดที่อุณหภูมิการแพร่สารคือ $N_{phosphorus} = 1.2 \times 10^{21} atom$

จึงใช้ค่าความหนาแน่นในการแพร่สารเจือที่ได้จากการคำนวณ

- คำนวณหาจำนวน โมลของเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต ($TEOS$)

มวลของ $TEOS$ คือ $m_{TEOS} = 0.933 \frac{g}{ml} \times 5 ml = 4.665 g$

$$\text{ดังนั้น มีจำนวน โมลของกรด } TEOS = \frac{4.665}{208.33 \text{ g/mol}} = 0.0224 \text{ mol}$$

ดังนั้นจะได้อัตราส่วนสารตั้งต้นดังตาราง

ตารางแสดงอัตราส่วนที่ใช้ในการเตรียม SOD ของการเติมสารเจือฟอสฟอรัส

	$TEOS : H_2O : C_2H_5OH : H_3PO_4$ (ml)				ปริมาตรสุทธิ
อัตราส่วนโดยปริมาตร	5	10	1.5	1.25	17.75ml
อัตราส่วนโดยโมล(mol)	0.0224	0.5732	0.0257	0.0183	

หาความหนาแน่น (N) ของฟอสฟอรัส (P) ได้จาก $N = \text{mol} \times 6.02 \times 10^{23} \text{ atom/mol}$

โดยที่ N คือ ความหนาแน่นของสารมีหน่วยเป็นอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (atom/cm^3)

Avogadro's number มีค่าเท่ากับ $6.02 \times 10^{23} \text{ atom/mol}$

ความหนาแน่นของฟอสฟอรัส $N_{\text{phosphorus}} = \frac{0.0183 \text{ mol} \times 6.02 \times 10^{23} \text{ atom/mol}}{17.75 \text{ ml}}$

ดังนั้น จะได้ความหนาแน่นของฟอสฟอรัสในสารละลาย 17.75ml คือ

$$N_{\text{phosphorus}} = 1.102 \times 10^{22} \text{ atom}$$

$$\text{หรือ } N_{\text{phosphorus}} = \frac{1.102 \times 10^{22} \text{ atom}}{17.75 \text{ cm}^3} = 6.2085 \times 10^{20} \text{ atom/cm}^3$$

การคำนวณหาความเข้มข้นของสารเจือฟอสฟอรัส H_3PO_4 กรณี $TEOS:H_3PO_4 = 5:1$

อัตราส่วน โดยปริมาตรของสารที่ใช้ดังนี้ $TEOS : C_2H_5OH : H_2O : H_3PO_4 = 5:1.5:10:1ml$

การคำนวณปริมาตรสารที่อยู่ในสารละลายที่เตรียมเพื่อหาความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดที่เตรียม

สารละลายที่ใช้เตรียมสารตั้งต้นมีดังนี้

$$TEOS \rightarrow MW = 208.33 \text{ g/mol}$$

$$C_2H_5OH \rightarrow MW = 46.07 \text{ g/mol}$$

$$H_3PO_4 \rightarrow MW = 98 \text{ g/mol}$$

$$H_2O \rightarrow MW = 18 \text{ g/mol}$$

เมื่อ MW คือมวลจากสูตรของสารละลาย

- คำนวณหาจำนวน โมลของกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4 85%)

สารละลายกรด H_3PO_4 100g มีเนื้อกรดอยู่ 85g นั่นคือมีน้ำ $100g - 85g = 15g$

H_3PO_4 ปริมาตร 1.25 ml หามวลของ H_3PO_4 ได้จาก $D = \frac{m}{v}$ หรือ $m = D \times v$

โดยที่ D = ความหนาแน่น มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร (g/ml)

m = มวลของ H_3PO_4 มีหน่วยเป็นกรัม (g)

v = ปริมาตรของ H_3PO_4 มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร (ml)

จะได้ว่ามวลของ H_3PO_4 คือ $m_{H_3PO_4} = 1.69 \frac{\text{g}}{\text{ml}} \times 1 \text{ml} = 1.69 \text{g}$

นั่นคือ มีเนื้อกรด $H_3PO_4 = \frac{1.69 \text{g} \times 85}{100 \text{g}} = 1.4365 \text{g}$

$$\text{และมีน้ำในกรด } H_3PO_4 = \frac{1.69g \times 15g}{100g} = 0.2535g$$

$$\text{ดังนั้น มีจำนวน โมลของกรด } H_3PO_4 = \frac{1.4365g}{98 \frac{g}{mol}} = 0.0146mol$$

$$\text{และจำนวน โมลของน้ำ } H_2O = \frac{[(10ml \times 1 \frac{g}{ml}) + 0.3169g]}{18 \frac{g}{mol}} = 0.5732mol$$

- คำนวณหาจำนวน โมลของเอทานอล (C_2H_5OH)

$$\text{มวลของ } C_2H_5OH \text{ คือ } m_{C_2H_5OH} = 0.79 \frac{g}{ml} \times 1.5ml = 1.185g$$

$$\text{ดังนั้น มีจำนวน โมลของกรด } C_2H_5OH = \frac{1.185g}{46.07 \frac{g}{mol}} = 0.0257mol$$

- คำนวณหาจำนวน โมลของเตตระเอทิลอซิเลท ($TEOS$)

$$\text{มวลของ } TEOS \text{ คือ } m_{TEOS} = 0.933 \frac{g}{ml} \times 5ml = 4.665g$$

$$\text{ดังนั้น มีจำนวน โมลของกรด } TEOS = \frac{4.665}{208.33 \frac{g}{mol}} = 0.0224mol$$

ดังนั้นจะได้อัตราส่วนสารตั้งต้นดังตาราง

ตารางแสดงอัตราส่วนที่ใช้ในการเตรียม SOD ของการเติมสารเจือฟอสฟอรัส

	$TEOS : H_2O : C_2H_5OH : H_3PO_4$ (ml)				ปริมาตรสุทธิ
อัตราส่วนโดยปริมาตร	5	10	1.5	1	17.5ml
อัตราส่วนโดยโมล(mol)	0.0224	0.5732	0.0257	0.0146	

หาความหนาแน่น (N) ของฟอสฟอรัส (P) ได้จาก $N = mol \times 6.02 \times 10^{23} \frac{atom}{mol}$

โดยที่ N คือ ความหนาแน่นของสารมีหน่วยเป็นอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ($\frac{atom}{cm^3}$)

Avogadro's number มีค่าเท่ากับ $6.02 \times 10^{23} \text{ atom/mol}$

$$\text{ความหนาแน่นของฟอสฟอรัส } N_{\text{phosphorus}} = \frac{0.0146 \text{ mol} \times 6.02 \times 10^{23} \text{ atom/mol}}{17.5 \text{ ml}}$$

ดังนั้น จะได้ความหนาแน่นของฟอสฟอรัสในสารละลาย 17.5 ml คือ

$$N_{\text{phosphorus}} = 8.789 \times 10^{21} \text{ atom}$$

$$\text{หรือ } N_{\text{phosphorus}} = \frac{8.789 \times 10^{21} \text{ atom}}{17.5 \text{ cm}^3} = 5.022 \times 10^{20} \text{ atom/cm}^3$$

การคำนวณหาความเข้มข้นของสารเจือฟอสฟอรัส H_3PO_4 กรณี $\text{TEOS}:\text{H}_3\text{PO}_4 = 6:1$

อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารที่ใช้ดังนี้

$$\text{TEOS} : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} : \text{H}_2\text{O} : \text{H}_3\text{PO}_4 = 5 : 1.5 : 10 : 0.83 \text{ ml}$$

การคำนวณปริมาตรสารที่อยู่ในสารละลายที่เตรียมเพื่อหาความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดที่เตรียม

สารละลายที่ใช้เตรียมสารตั้งต้นมีดังนี้

$$\text{TEOS} \rightarrow \text{MW} = 208.33 \text{ g/mol}$$

$$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \rightarrow \text{MW} = 46.07 \text{ g/mol}$$

$$\text{H}_3\text{PO}_4 \rightarrow \text{MW} = 98 \text{ g/mol}$$

$$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MW} = 18 \text{ g/mol}$$

เมื่อ MW คือมวลจากสูตรของสารละลาย

- คำนวณหาจำนวนโมลของกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4 85%)

สารละลายกรด H_3PO_4 100g มีเนื้อกรดอยู่ 85g นั่นคือมีน้ำ $100 \text{ g} - 85 \text{ g} = 15 \text{ g}$

H_3PO_4 ปริมาตร 1.25 ml หามวลของ H_3PO_4 ได้จาก $D = \frac{m}{v}$ หรือ $m = D \times v$

โดยที่ D = ความหนาแน่น มีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร ($\frac{g}{ml}$)

m = มวลของ H_3PO_4 มีหน่วยเป็นกรัม (g)

v = ปริมาตรของ H_3PO_4 มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร (ml)

จะได้ว่ามวลของ H_3PO_4 คือ $m_{H_3PO_4} = 1.69 \frac{g}{ml} \times 0.83 ml = 1.4027 g$

นั่นคือ มีเนื้อกรด $H_3PO_4 = \frac{1.4027 g \times 85 g}{100 g} = 1.1922 g$

และมีน้ำในกรด $H_3PO_4 = \frac{1.4027 g \times 15 g}{100 g} = 0.2104 g$

ดังนั้น มีจำนวน โมลของกรด $H_3PO_4 = \frac{1.1922 g}{98 \frac{g}{mol}} = 0.0122 mol$

และจำนวน โมลของน้ำ $H_2O = \frac{[(10 ml \times 1 \frac{g}{ml}) + 0.3169 g]}{18 \frac{g}{mol}} = 0.5732 mol$

- คำนวณหาจำนวน โมลของเอทานอล (C_2H_5OH)

มวลของ C_2H_5OH คือ $m_{C_2H_5OH} = 0.79 \frac{g}{ml} \times 1.5 ml = 1.185 g$

ดังนั้น มีจำนวน โมลของกรด $C_2H_5OH = \frac{1.185 g}{46.07 \frac{g}{mol}} = 0.0257 mol$

- คำนวณหาจำนวน โมลของเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (TEOS)

มวลของ TEOS คือ $m_{TEOS} = 0.933 \frac{g}{ml} \times 5 ml = 4.665 g$

ดังนั้น มีจำนวน โมลของกรด TEOS = $\frac{4.665}{208.33 \frac{g}{mol}} = 0.0224 mol$

ดังนั้นจะได้อัตราส่วนสารตั้งต้นดังตาราง

ตารางแสดงอัตราส่วนที่ใช้ในการเตรียม SOD ของการเติมสารเจือฟอสฟอรัส

	TEOS : H ₂ O : C ₂ H ₅ OH : H ₃ PO ₄ (ml)				ปริมาตรสุทธิ
อัตราส่วนโดยปริมาตร	5	10	1.5	0.83	17.33 ml
อัตราส่วนโดยโมล(mol)	0.0224	0.5732	0.0257	0.0122	

หาความหนาแน่น (N) ของฟอสฟอรัส (P) ได้จาก $N = mol \times 6.02 \times 10^{23} \text{ atom/mol}$

โดยที่ N คือ ความหนาแน่นของสารมีหน่วยเป็นอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (atom/cm^3)

Avogadro's number มีค่าเท่ากับ $6.02 \times 10^{23} \text{ atom/mol}$

ความหนาแน่นของฟอสฟอรัส $N_{\text{phosphorus}} = \frac{0.0122 \text{ mol} \times 6.02 \times 10^{23} \text{ atom/mol}}{17.33 \text{ ml}}$

ดังนั้น จะได้ความหนาแน่นของฟอสฟอรัสในสารละลาย 17.33ml คือ

$$N_{\text{phosphorus}} = 7.344 \times 10^{21} \text{ atom}$$

$$\text{หรือ } N_{\text{phosphorus}} = \frac{7.344 \times 10^{21} \text{ atom}}{17.33 \text{ cm}^3} = 4.2379 \times 10^{20} \text{ atom/cm}^3$$

ภาคผนวก ข

การคำนวณความลึกของอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การคำนวณความลึกของอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

โดย นายณัฐพงศ์ ผิวผา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ.2556

แสดงรายละเอียดการคำนวณความลึกของอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสในบทที่ 4 หัวข้อ 4.3

เนื่องจากความหนาแน่นของฟอสฟอรัสจากการคำนวณ แต่ละอัตราความเข้มข้นของ TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 4:1 5:1 และ 6:1 จะมีความหนาแน่นของสารเจือฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน แสดงได้ดังตาราง นำค่าความหนาแน่นที่ได้นี้มาคำนวณหาความหนาแน่นของชั้นเอ็นดังต่อไปนี้

ตารางความหนาแน่นอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสที่อัตราความเข้มข้นของ TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 4:1 5:1 และ 6:1

อัตราความเข้มข้นของ TEOS : H ₃ PO ₄	ความหนาแน่นสารเจือของชั้นเอ็น(N _{phosphorus}) (cm ⁻³)
4 : 1	6.2085x10 ²⁰
5 : 1	5.022x10 ²⁰
6 : 1	4.2379x10 ²⁰

จากสมการตามกฎของฟิก

$$\frac{N(x,t)}{N_0} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x_j}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

โดยที่ N_0 คือ ความหนาแน่นของสารเจือที่ผิวมีหน่วยเป็น atom/cm^3

$N(x,t)$ คือ ความหนาแน่นของสารเจือที่ตำแหน่ง x ใด ๆ และเวลาที่ใช้ในการแพร่ t ใด ๆ มีหน่วยเป็น atom/cm^3

x_j คือระยะความลึกในเนื้อสาร มีหน่วยเป็นเซนติเมตร (cm)

t คือเวลาที่ใช้ในการแพร่สารเจือ มีหน่วยเป็นวินาที (s)

D คือสัมประสิทธิ์การแพร่ (*diffusivity*) ที่อุณหภูมิการแพร่จำเพาะมีหน่วยเป็น cm^2/s

เพื่อความสะดวกต่อการนำไปใช้งานสมการ $\frac{N(x,t)}{N_0} = erfc\left(\frac{x_j}{2\sqrt{Dt}}\right)$ อาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{N(x,t)}{N_0} = erfc.z$$

โดยที่ $z = \frac{x_j}{2\sqrt{Dt}}$ และ $erfc.z$ หมายความว่า เป็น complementary error function ของ z เมื่อ

$$erfc.z = 1 - erf.z$$

ในการคำนวณมีพารามิเตอร์ดังนี้

กรณีอัตราความเข้มข้นของ TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 4:1

$N_0 = N_{phosphorus} = 6.2085 \times 10^{20} \text{ atom/cm}^3$ เป็นความหนาแน่นของสารเจือที่จะแพร่ได้

$N(x,t) = 1.47 \times 10^{16} \text{ atom}$ กรณีตำแหน่งที่ลึกที่สุดที่จะแพร่สารเจือได้จะมีค่าความหนาแน่นของอะตอมเท่ากับค่าความหนาแน่นของแผ่นฐานซิลิคอนชนิดพี

จะได้ว่า

$$erfc.z = \frac{N(x,t)}{N_0} = \frac{1.4700 \times 10^{16}}{6.2085 \times 10^{20}} = 2.368 \times 10^{-5}$$

$$erf.z = 1 - erfc.z = 1 - 2.368 \times 10^{-5} = 0.99997632$$

นำค่าที่ได้มาทำการประมาณค่าจากตารางค่า function error ดังนี้

ที่ $erf.z = 0.99997632$ จะได้ว่า $z_j = 2.99$

หาค่าความลึก (x_j) จากการแพร่สารเจือได้จาก $z_j = \frac{x_j}{2\sqrt{Dt}}$ จะได้ว่า $x_j = 2z_j\sqrt{Dt}$

โดยที่ $z_j = 2.99$

$$t = 60 \text{ min} = 3600 \text{ s}$$

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_A}{kT}\right) \text{ เมื่อ } D_0 \text{ คือค่าคงที่การแพร่ (diffusion Constant) มีหน่วยเป็น } (cm^2/s)$$

$$D_0 \text{ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีค่าเท่ากับ } 10.5 \text{ cm}^2/s$$

$$E_A \text{ คือค่าพลังงานที่ใช้ในการแพร่มีหน่วยเป็น (eV)}$$

$$k \text{ คือค่าคงตัวของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ } 8.62 \times 10^{-5} \text{ (eV/K)}$$

$$T \text{ คืออุณหภูมิในหน่วย } (^{\circ}K) \text{ และ } T = 273 + t_C; t_C \text{ คืออุณหภูมิในหน่วย } (^{\circ}C)$$

ในกรณีแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ $1000^{\circ}C$ เป็นเวลานาน 60 นาที จะสามารถคำนวณความหนา (x_j) ได้จาก

$$D = 10.5 \text{ cm}^2/s \exp\left(\frac{-3.69 \text{ eV}}{0.1097 \text{ eV}}\right) = 2.612 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/s$$

โดยที่ N_0 คือความหนาแน่นของสารเจือที่ผิวของซิลิคอน (atom/cm^3)

$N(x, t)$ คือความหนาแน่นของสารเจือปน ณ ระยะห่าง x_j จากผิวของสารกึ่งตัวนำ ณ เวลา t

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่สารเจือ (cm^2/s) จากการคำนวณที่อุณหภูมิการเจือสาร

x คือระยะทางการแพร่ในเนื้อสาร (μm)

t คือช่วงเวลาในการแพร่ (s)

แทนค่าพารามิเตอร์ลงในสมการข้างต้นเพื่อหาความหนาของชั้นเอนิน

$$x_j = 2z_j\sqrt{Dt} = 2(2.99)\sqrt{2.612 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s} (3600)} = 5.800 \times 10^{-5} \text{ cm} = 0.58 \mu\text{m}$$

สามารถแสดงผลการคำนวณแต่ละอัตราความเข้มข้นของ TEOS:H₃PO₄ ในการแพร่สารเจือดังตารางต่อไปนี้

ตารางผลการคำนวณความหนาของชั้นเอนินตามเงื่อนไขการแพร่สารเจือที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 4:1 5:1 และ 6:1 ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 800°C - 1000°C เป็นเวลา 60 นาที

Diffusion temperature (°C)	Condition Diffusion time(minute) = 60 minute		
	TEOS:H ₃ PO ₄ = 4 : 1	TEOS:H ₃ PO ₄ = 5 : 1	TEOS:H ₃ PO ₄ = 6 : 1
	X _j (μm) คำนวณ	X _j (μm) คำนวณ	X _j (μm) คำนวณ
800°C	0.0253	0.0249	0.0247
850°C	0.0614	0.0606	0.0599
900°C	0.1383	0.1365	0.1351
950°C	0.2917	0.2877	0.2848
1000°C	0.5800	0.5722	0.5664

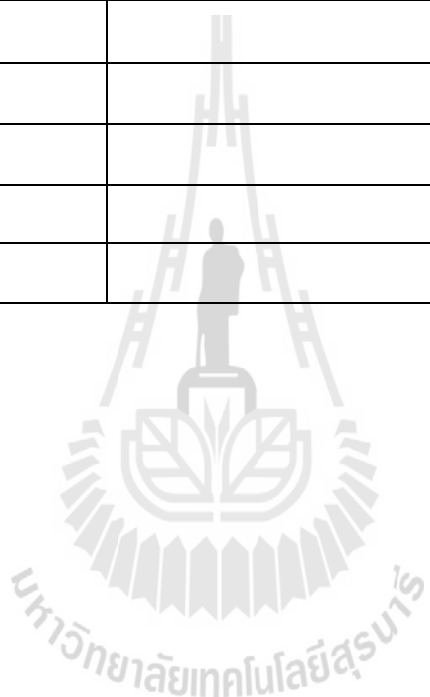
ในกรณีแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลานาน 20 นาที จะสามารถคำนวณความหนา(x_j) ได้จาก

$$x_j = 2z_j\sqrt{Dt} = 2(2.99)\sqrt{2.612 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s} (1200)} = 3.348 \times 10^{-5} \text{ cm} = 0.33 \mu\text{m}$$

สามารถแสดงผลการคำนวณแต่ละเงื่อนไขเวลา ภายใต้อัตราความเข้มข้นของ TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 4:1 และอุณหภูมิ 1000°C ในการแพร่สารเจือดังตารางต่อไปนี้

ตารางผลการคำนวณความหนาของชั้นเอนตามเงื่อนไขเวลาในการแพร่สารเจือที่ต่างกัน โดยที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 4:1 ภายใต้อุณหภูมิ 1000°C

Diffusion time (minute)	Condition Diffusion temperature (°C) = 1000°C TEOS:H ₃ PO ₄ = 4 : 1 $N_0 = 6.2085 \times 10^{20} \text{ atom/cm}^3$
	X _i (μm) คำนวณ
20	0.3348
30	0.4101
40	0.4735
60	0.5800
80	0.6697
90	0.7103





ภาคผนวก ค

การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้สร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์

การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้สร้างชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์

โดย นายณัฐพงศ์ ผิวผา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ.2556

แสดงรายละเอียดการคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้สร้างชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์ ใน
บทที่ 4 หัวข้อ 4.4

นำแผ่นฐานที่ผ่านการสร้างรอยต่อพีเอ็นจากข้อ 4.4.1 มาทำการสร้างชั้นฟิล์มซิลิกอนได
ออกไซด์เพื่อเป็นชั้นพาสซีเวชันด้านหลังของเซลล์ ด้วยการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงจากการเตรียม
สารละลายตั้งต้นและขั้นตอนการเตรียม SOD ของซิลิกอนไดออกไซด์มีดังต่อไปนี้

1. การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการสร้างชั้นฟิล์มซิลิกอนไดออกไซด์
ในการเตรียมสารตั้งต้นของซิลิกอนไดออกไซด์ต้องใช้อัตราส่วนโมลของ

$TEOS : C_2H_5OH : H_2O_2 = 1 : 2 : 2$, 0.0009 M CTAB, 0.1M HCL ผสมในสารละลายทั้งหมด
20 ml จะต้องใช้สารแต่ละชนิดโดยคำนวณดังต่อไปนี้

$TEOS \rightarrow MW = 208.33 \frac{g}{mol} \rightarrow density = 0.933 \frac{g}{ml}$ ความเข้มข้น 98% (%v/v)

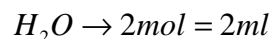
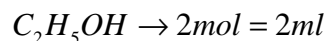
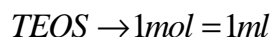
$C_2H_5OH \rightarrow MW = 46.07 \frac{g}{mol} \rightarrow density = 0.79 \frac{g}{ml}$ ความเข้มข้น 99.9%

$H_2O \rightarrow MW = 18 \frac{g}{mol} \rightarrow density = 1 \frac{g}{ml}$

$HCL \rightarrow MW = 36.5 \frac{g}{mol} \rightarrow density = 1.19 \frac{g}{ml}$ ความเข้มข้น 37% (%w/v)

$CTAB \rightarrow MW = 364.5 \frac{g}{mol}$ ความเข้มข้น 98%

เนื่องจากสารตั้งต้นที่ผลิตเจลซิลิกอนไดออกไซด์ คือ TEOS และ C_2H_5OH ซึ่งมีความ
บริสุทธิ์มากกว่า 98% ดังนั้นในการเตรียมสารละลายด้วยอัตราส่วนโมล (mole ratio) จะเทียบเท่า
อัตราส่วนปริมาตร (Volume ratio) ดังนี้



ถ้าหากต้องการเตรียมสารปริมาณ 20 ml จะต้องใช้ $TEOS = 4ml$ และ $C_2H_5OH = 8ml$ ซึ่งจะได้ปริมาณสารตั้งต้นทั้งสิ้น 12 ml ส่วนน้ำไม่นำไปรวมกับสารตั้งต้น เนื่องจากน้ำจะถูกเติมเข้าไปในรูปของกรด (HCL, catalyst) และสารลดแรงตึงผิว (surfactant, CTAB) สารละลายกรดไฮโดรคลอริกจำนวน 0.1M มี $MW = 36.5 \text{ g/mol} \rightarrow \text{density} = 1.19 \text{ g/ml}$ ความเข้มข้น 37% (%w/v)

$$\text{ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร} = \frac{\text{มวลของตัวถูกละลาย}}{\text{ปริมาตรของสารละลาย}} \times 100$$

ดังนั้น
$$HCL 37\% = \frac{HCL \text{ g}}{100ml} \times 100$$

หมายความว่า สารละลาย 100 ml มีตัวถูกละลาย (HCl) 37 g

หาความเข้มข้นของกรด HCl ในหน่วย M

สารละลายกรด 100 ml มีเนื้อกรด 37 g

$$\text{สารละลายกรด 1000 ml มีเนื้อกรด} \frac{37 \text{ g} \times 1000 \text{ ml}}{100 \text{ ml}} = 370$$

ดังนั้น สารละลายกรด 1000 ml มีความเข้มข้น $\frac{370 \text{ g}}{36.5 \text{ g/mol}} = 10.14 \text{ mol}$

ถ้าต้องการเตรียมสารละลาย 0.1M HCl จำนวน 20 ml คำนวณได้จาก

$$C_1V_1 = C_2V_2 \text{ จะได้ว่า } 10.14M \times V_1 = 0.01M \times 20ml$$

ดังนั้น
$$V_1 = V_{HCL} = \frac{0.01M \times 20ml}{10.14M} = 0.197ml \approx 0.02ml$$

หมายความว่า จะต้องใช้กรด HCl เข้มข้น 37% มีปริมาตร 0.02 ml ผสมในสารละลาย 20 ml

ขณะนี้มีการละลายถูกผสมทั้งสิ้น $12 + 0.02 = 12.02$ ml และจะเหลือสารที่ต้องถูกเติมเพิ่มอีกซึ่ง
เป็นสารลดแรงตึงผิว $20 - 12.2 = 7.98$ ml

ถ้าต้องการเตรียมสารละลาย 0.0009 M CTAB จำนวน 7.98 ml คำนวณได้จาก

$$C_1V_1 = C_2V_2 \text{ จะได้ว่า } C_1 \times 7.98 \text{ ml} = 0.0009 \text{ M} \times 20 \text{ ml}$$

$$\text{ดังนั้น } C_1 = C_{CTAB} = \frac{0.0009 \text{ M} \times 20 \text{ ml}}{7.98 \text{ ml}} = 0.000226 \text{ M} = 0.000226 \text{ mol}$$

CTAB มี $MW = 364.5 \text{ g/mol}$ ความเข้มข้น 99% (%w/v)

จะต้องใช้ CTAB จำนวน $m = n \times MW = 0.000226 \text{ mol} \times 364.5 \text{ g/mol} = 0.0824 \text{ g}$

หมายความว่าชั่ง CTAB มา 0.0841 g (โดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง) แล้วผสมกับน้ำกลั่นบริสุทธิ์อีก
 7.98 ml

$$\text{ดังนั้น } TAB = 0.0824 \text{ g} \times \frac{50 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} = 0.0041 \text{ g}$$

หมายความว่านำ CTAB มา 0.0841 g แล้วผสมกับน้ำกลั่นบริสุทธิ์อีก 7.98 ml (โดยใช้เครื่องชั่ง 4
ตำแหน่ง)



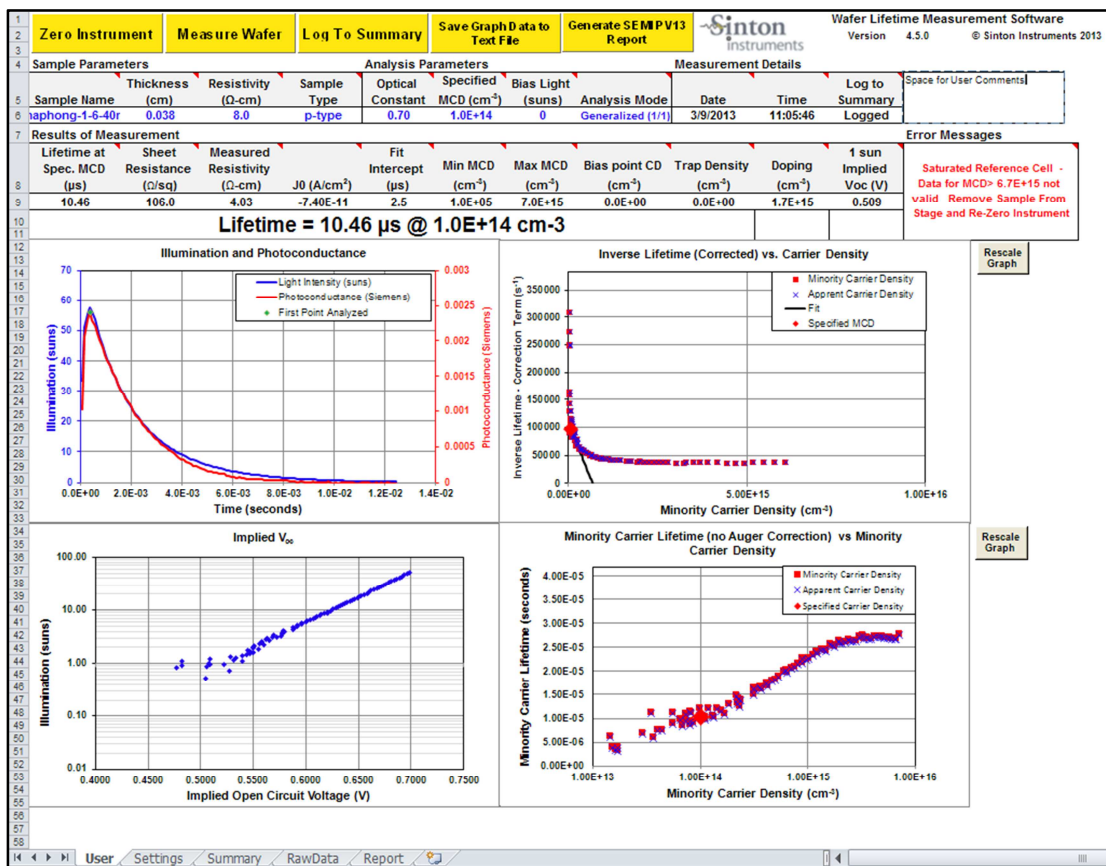
ภาคผนวก ง

ผลการวัดค่าช่วงชีวิตพาหะที่ได้จากเครื่อง WCT-120 Sinton

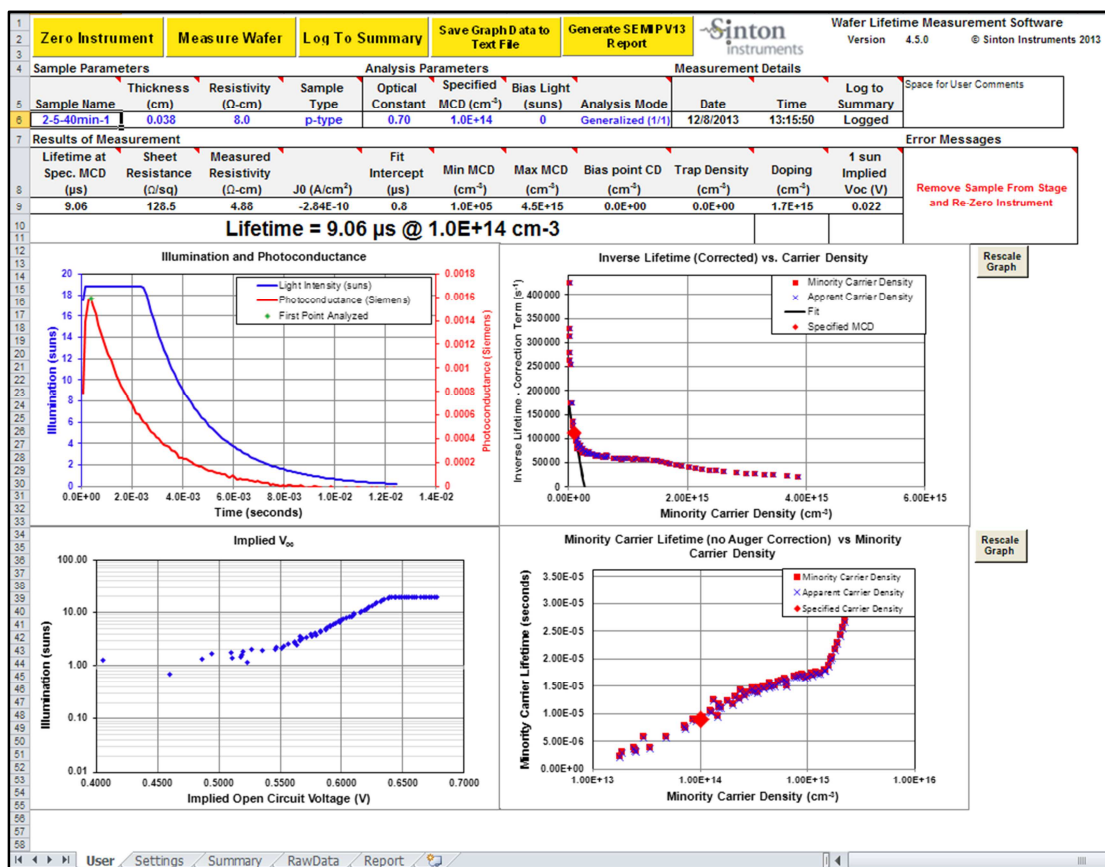
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

แสดงรายละเอียดผลการวัดค่าช่วงชีวิตพาหะที่ได้จากเครื่อง WCT-120 Sinton
 ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.6.3 ตารางที่ 4.11

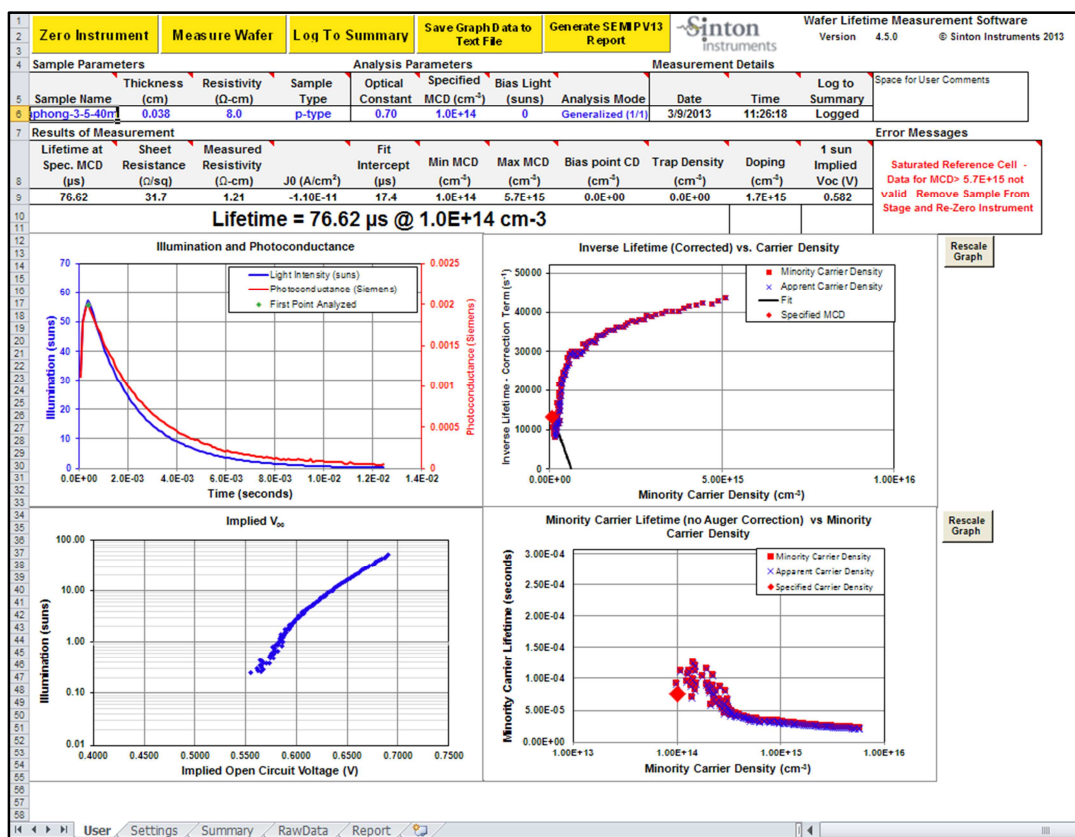
ตัวอย่างผลการวัดตัวอย่าง โครงสร้าง n⁺ emitter/p-Si /Al แสดง โครงสร้างผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น
 ที่ใช้เทคนิคการแพร่ซึมแบบ SOD และชั้นอุมิเนียมเคลือบด้านหลังจากเครื่อง WCT-120 Sinton



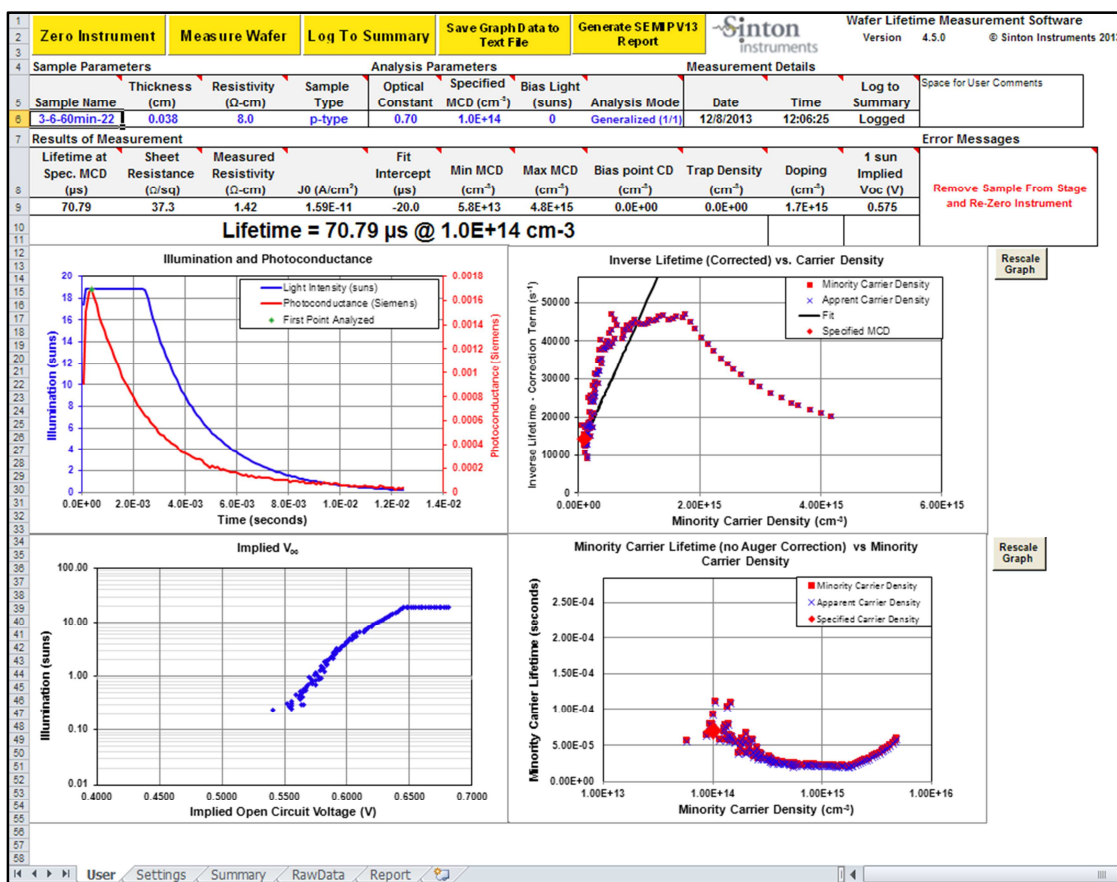
ตัวอย่างผลการวัดตัวอย่างโครงสร้าง n^+ emitter/p-Si/SiO₂/Al อาจเรียกว่าโครงสร้าง MIS เป็น
 โครงสร้างของผลึกซิลิคอนชั้นรอยต่อพี-เอ็น และชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนา 100 nm และ
 ชั้นอลูมิเนียมเคลือบด้านหลังจากเครื่อง WCT-120 Sinton




ตัวอย่างผลการวัดตัวอย่างโครงสร้าง Localized p⁺ contacts_100 nm -350 เป็นโครงสร้างของพลิกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 100 nm เคลือบแผ่นด้านหลังมีขนาดกว้างของช่องเปิด 100 μm เมื่อผ่านการอบที่ความร้อนระดับ eutectic แล้วจะมีบริเวณ p⁺-Si เกิดในช่องเปิดขนาดกว้างเฉลี่ย 101 \pm 30 μm และระยะห่างของช่องเปิด 350 μm และมีชั้นอลูมิเนียมเคลือบด้านหลังหลังจากเครื่อง WCT-120 Sinton



ตัวอย่างผลการวัดตัวอย่างโครงสร้าง Localized p⁺ contacts_150 nm -350 เป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 150 nm เคลือบแผ่นด้านหลังมีขนาดกว้างของช่องเปิด 100 μm เมื่อผ่านการอบที่ความร้อนระดับ eutectic แล้วจะมีบริเวณ p⁺-Si เกิดในช่องเปิดขนาดกว้างเฉลี่ย 101 \pm 30 μm และระยะห่างของช่องเปิด 350 μm และมีชั้นอนุภาคนิยมเคลือบด้านหลังจากเครื่อง WCT-120 Sinton





ภาคผนวก จ

สารไวแสงโฟโตลีส (PR) และสารละลายอะซิโตนที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้

SUMIRESIST PFI-34



รูปที่ ๓ สารไวแสง แบบ Positive

1. เงื่อนไขในการใช้งาน

แผ่นฐานที่ใช้ : แผ่นฐานซิลิคอนขนาด 4 นิ้ว

การทำ HDMS ; ปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง ครึ่งนาที

หลังจากนั้นทำความละลายที่มุม 50 °C (น้ำบริสุทธิ์)

Prebaking : ที่อุณหภูมิ 90°C นาน 1 นาที (DHP cf.) prebaking = Soft baking

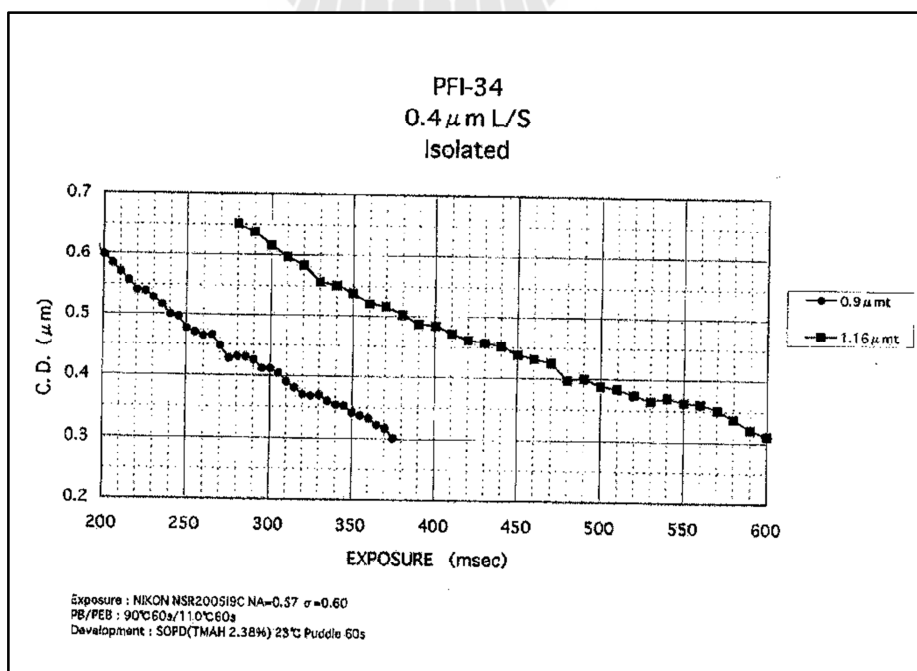
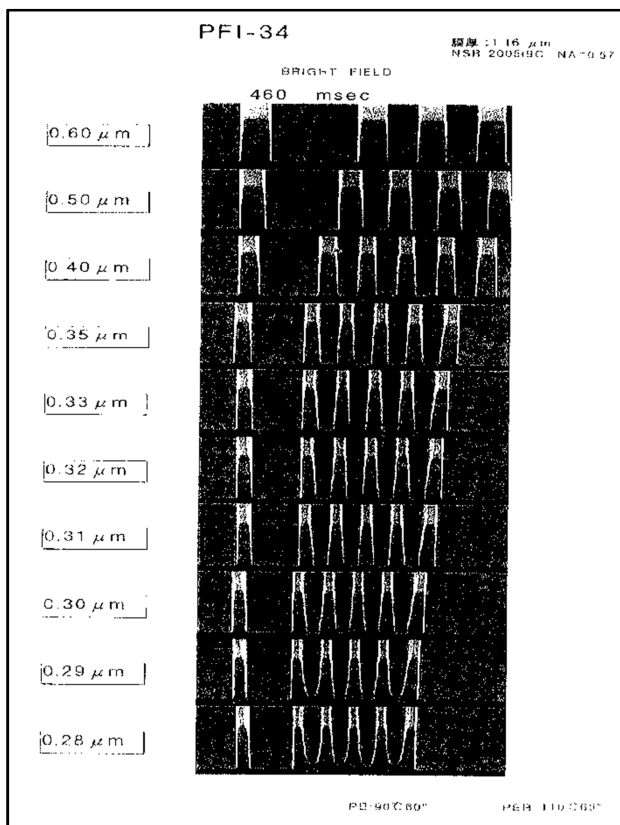
ความบางของฟิล์มที่ทำได้ : 0.9 μm (Bottom of swing curve of silicon)

1.16 μm (top of swing curve of silicon)

Exposure ที่ใช้ : NIKON NSR-2005i9c (NA=0.57, $\sigma = 0.6$)

PEB : 110 °C นาน 1 นาที Development : SOPD (2.38 wt %TMAH)

ภาพแสดงลักษณะความหนาต่าง ๆ ที่ทำได้ของ Sumiresist PFI-34



อะซีโตน : Acetone

ชื่อเรียกอื่น	Dimethyl ketone; beta-ketopropane; pyroacetic ether; 2-propanone.
CAS No.	67-64-1
สูตร โมเลกุล	C ₃ H ₆ O
น้ำหนัก โมเลกุล	58.08
จุดเดือด	56.5 องศาเซลเซียส
คุณสมบัติ	เป็นของเหลวไม่มีสี ระเหยได้ มีรสหวาน มีกลิ่นเฉพาะตัว
การใช้ที่ผิดกฎหมาย	ใช้เป็นตัวทำละลายในการสกัดฝิ่น(opium) และใบ โคลคา (coca leaf) เพื่อการผลิต heroin และ cocaine ใช้เป็นตัวทำละลายในการสังเคราะห์ amphetamine และ LSD
การใช้ที่ถูกกฎหมาย	ใช้เป็นตัวทำละลายทั่วไปในอุตสาหกรรมเคมี และอุตสาหกรรมผลิตยา ใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่น Chloroform พลาสติก น้ำมันชักเงา และเครื่องสำอาง ฯลฯ
การควบคุม	<p>ในขนาดบรรจุมากกว่า 550 มิลลิลิตร จัดเป็นวัตถุอันตรายชนิดที่ 3 ตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535</p> <ul style="list-style-type: none"> • การผลิต นำเข้า ส่งออก หรือการมีไว้ในครอบครองซึ่งวัตถุอันตรายชนิดที่ 3 ต้องได้รับใบอนุญาต • ผู้ใดผลิต นำเข้า ส่งออกหรือมีไว้ในครอบครองซึ่งวัตถุอันตรายชนิดที่ 3 โดยมีได้รับอนุญาต ต้องระวางโทษจำคุกไม่เกินสองปี หรือปรับไม่เกินสองแสนบาท หรือทั้งจำทั้งปรับ <p>ในขนาดบรรจุไม่เกิน 550 มิลลิลิตร จัดเป็นสารระเหย ตามพระราชกำหนดป้องกันการใช้สารระเหย พ.ศ. 2533</p> <ul style="list-style-type: none"> • ผู้ผลิตหรือผู้นำเข้าซึ่งสารระเหย ก่อนนำออกจำหน่ายจะต้องทำฉลากข้อความ คำเตือน ที่ภาษาหรือบ่อนบรรจุ • ผู้ผลิต ผู้นำเข้า หรือผู้ขายสารระเหย ไม่จัดให้มีฉลากข้อความ คำเตือน ที่ภาษาหรือบ่อนบรรจุ



ภาคผนวก ฉ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ณัฐพงษ์ ฝิวผา และทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์ (1-3 ธันวาคม 2553). “การพัฒนาเครื่อง *Inkjet Printer* ต้นทุนต่ำเพื่อเปิดช่องชั้นสารกึ่งตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) จ.เชียงใหม่

Phiwpha, N., & Fangsuwannarak, T. (2013). **Surface Passivation of Point-Contacted Solar Cells by Inkjet Printing**. *Integrated Ferroelectrics*, 149(1), 102-106.



กลับสู่สารบัญหมวด

การพัฒนาเครื่อง Inkjet Printer ต้นทุนต่ำเพื่อเปิดช่องชั้นสารกึ่งตัวนำ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน

Study and development of inkjet printer for forming opening semiconductor layers of silicon solar cells.

ฉัฐพงศ์ ผิวหา¹ และ กิษัรธรรม พิงสุวรรณรัมย์²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 อ.มหาวิทยาลัย ค.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์: 087-869-3580 E-mail: phong_jarr@hotmail.com

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 อ.มหาวิทยาลัย ค.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์: 044-22-4582 E-mail: thipwan@g.sut.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาและพัฒนาเครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีด (Inkjet printer) เพื่อเปิดช่องชั้นสารกึ่งตัวนำสำหรับการประยุกต์ใช้งานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน จุดประสงค์ของการใช้เทคนิคการฉีดด้วยเครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีด คือสามารถสร้างลวดลายขนาดเล็กระดับไมครอน เพื่อทำช่องเปิดสำหรับกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเทคนิคการฉีดด้วยเครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีด นี้จะถูกนำมาใช้แทนเทคนิคการสร้างลวดลายด้วยแสง (Photolithography) เพื่อลดต้นทุนการผลิต และขั้นตอนการผลิตที่ซับซ้อนลง โครงการนี้ได้นำเครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดที่เป็นเทคโนโลยีแบบเชิงความร้อน (Thermal) นำมาพัฒนาต่อให้สามารถฉีดสารละลายในแนวระนาบได้ และฉีดสารละลายอะซิโตนซึ่งเป็นตัวทำละลายของสารไวแสง (Photoresist) ได้ โดยทำการฉีดลงบนฟิล์มที่เคลือบด้วยสารไวแสงด้วยเทคนิคการเคลือบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) เพื่อให้เกิดช่องเปิดตามที่ต้องการ

คำสำคัญ: เครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีด, สารไวแสง, เซลล์แสงอาทิตย์

Abstract

The study and development of inkjet printer for formation of small openings of semiconductor layers in silicon solar cell applications. The objective of this study is to fabricate a small-area opening mask for electronic device by avoiding photolithography technique. This significant aim is to reduce the complexity of production process. The thermal inkjet printer was modified in this project. Acetone solution was exploited as ink that was sprayed onto the horizontal silicon wafer which was coated by the photo resist.

Keywords: inkjet printer, photo resist, solar cell

1. บทนำ

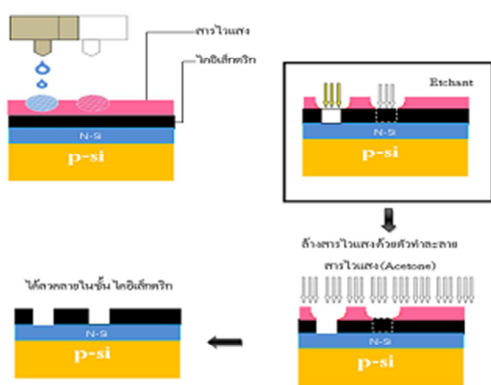
ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า 20% ได้ใช้การสร้างลวดลายโลหะขนาดเล็กด้วยเทคนิคการถ่ายเทลวดลายด้วยแสง [1] ซึ่งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและมีต้นทุนสูง สำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับอุตสาหกรรมนั้นการพิมพ์ลายด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์หลาย(Screen printing) หรือเทคโนโลยีการชุบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless plating) ที่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดเส้นที่ไม่สม่ำเสมอ และอัตราส่วนสูงต่อความกว้างของลายเส้นมีค่าต่ำ ส่งผลกระทบถึงประสิทธิภาพที่ต่ำลงของเซลล์ อีกทั้งยังเป็นเทคนิคที่ต้องใช้เวลา ส่วนการเคลือบโลหะที่มีขนาดเส้นขนาดเล็กมาก (Micro-patterning) นิยมใช้เทคโนโลยีการสร้างฟิล์มบาง (Thin-film evaporation) ซึ่งมีข้อเสียคือต้นทุนสูงเพราะต้องใช้ระบบสุญญากาศประสิทธิภาพสูงและใช้วัสดุโลหะปริมาณมาก ดังนั้นเทคนิคการสร้างลวดลายโลหะด้วยเครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีด จึงเป็นเทคนิคที่ถือว่าเป็นทางเลือกใหม่ ซึ่งนอกจากจะเป็นเทคนิคที่มีต้นทุนต่ำและใช้เวลาน้อย และยังสามารถพัฒนาจนได้ลวดลายที่คมชัด สม่ำเสมอ สะดวก รวดเร็ว และใช้วัสดุโลหะปริมาณน้อยกว่า อีกทั้งยังมีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถบูรณาการองค์ความรู้ของการใช้เครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดไปสู่กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ฟิล์มบางในระดับเชิงพาณิชย์ได้ในอนาคต [2] สำหรับประวัติในระบับห้องปฏิบัติการมีงานวิจัยไม่มากนักที่ได้ศึกษา และนำเครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดมาพัฒนาเพื่อใช้สำหรับการผลิตอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ [3-4] อุปกรณ์โครงสร้างอิสระขนาดเล็ก [5-6] โครโมเปล่งแสงชนิดพอลิเมอร์ฟิล์มบาง [7-8] และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดพอลิเมอร์ [9] อีกทั้งเทคนิคการฉีดยังสามารถนำไปใช้ในกระบวนการทำลวดลายด้วยการเปิดช่องของชั้นสารกึ่งตัวนำในกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ [10]

เครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีด ที่นำมาดัดแปลงในโครงการนี้เป็นเทคโนโลยีเชิงความร้อน (Thermal) สามารถฉีดสารละลายเป็นหยดออกจากหัวฉีด ดังนั้นในโครงการนี้นอกจากจะได้รับความรู้ในการพัฒนาดัดแปลงเครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดสำหรับงานพิมพ์ทั่วไป มาประยุกต์ใช้ในการทำลวดลายขนาดเล็กต้นทุนต่ำของเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อลดความซับซ้อนของ



การผลิตด้วยเทคนิคการสร้างลวดลายด้วยแสงแล้วยังสามารถต่อยอดไปสู่การประยุกต์ใช้สารละลายชนิดอื่นๆ เช่น สารละลายโลหะเงิน หรือสังกะสีออกไซด์ (ZnO) และสารละลายอื่นๆ ประเภทออร์แกนิก(Organic) ซึ่งอาจมาแทนที่เทคโนโลยีการสร้างลวดลายด้วยแสงซึ่งมีขั้นตอนที่ยุ่งยากได้ในอนาคต

สำหรับโครงการวิจัยนี้ ผู้เสนอโครงการมีความมุ่งมั่นศึกษาวิธีการเปิดช่องชั้นสารกึ่งตัวนำโดยการกัดด้วยลวดลายลงบนฟิล์มบางสารไวแสง (Photoresist) ที่ทำให้เกิดช่องเปิดตามขนาดที่ต้องการด้วยเครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีด ที่ทำการคัดแปลงให้เหมาะสมกับแผ่นฐานซิลิคอน โดยมีจุดประสงค์เพื่อสร้างช่องเปิดขนาดเล็ก โดยไม่อาศัยเทคโนโลยีการสร้างลวดลายด้วยแสงและหาแนวทางประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนให้ได้ลวดลายตามต้องการ เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ อีกทั้งการศึกษานี้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญเพื่อนำไปสู่การพัฒนาใช้งานในเชิงพาณิชย์ โดยมีแนวทางการสร้างลวดลายในชั้นไดอิเล็กทริกของแผ่นฐานซิลิคอนดังรูปที่



รูปที่ 1 ขั้นตอนการใช้เครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดในการสร้างลวดลายในชั้นไดอิเล็กทริก ปรับปรุงจาก [10]

2 การทดลอง

2.1 การคัดแปลงเครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีด

การออกแบบ และคัดแปลงเครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีด สำหรับใช้ในการเปิดช่องชั้นสารกึ่งตัวนำ ในโครงการนี้ใช้เครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดชื่อ canon รุ่น IP1980 ซึ่งได้นำอุปกรณ์เดิมของเครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดมาใช้บางส่วน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานที่มีความแตกต่างไปจากการพิมพ์หมึกพิมพ์ลง บนกระดาษ โดยส่วนที่ออกแบบและสร้างขึ้นใหม่ได้เน้นการทำงานที่เป็นแนวระนาบกับชิ้นงานที่เป็นแผ่นฐานซิลิคอน หรือแผ่นฐานชนิดอื่นๆ ที่มีลักษณะแข็งไม่อ่อนตัว อุปกรณ์ที่นำมาใช้จากเครื่องพิมพ์เดิมได้แก่ โครงยึดและเลื่อนหัวพิมพ์ , แสงวงจรรักษา

การทำงาน , คลับหมึกพิมพ์ , ชุดกลไกการเริ่มทำงาน , แกนขับเคลื่อนชุดกลไกเริ่มทำงาน , ชุดขับเคลื่อนก่อนการพิมพ์ , ฐานรองชุดกลไกดึงแผ่นฐานรอง และชุดดูดหมึกก่อนการพิมพ์

ส่วนที่เพิ่มเติมได้แก่ ฐานรองอุปกรณ์ เครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดที่เลือกมาคัดแปลงมีความกว้างของโครง สร้าง 40 เซนติเมตร จึงได้ออกแบบฐานรองอุปกรณ์ให้มีความกว้าง และความยาว 50 เซนติเมตร สำหรับ ขาดังของโครงเลื่อนหัวพิมพ์ด้านละ 5 เซนติเมตร ฐานรองอุปกรณ์นี้เป็นชิ้นส่วนที่รองรับอุปกรณ์ทั้งหมดที่ออกแบบไว้

ฐานรองชิ้นงาน เป็นส่วนที่อยู่ติดกับชิ้นงาน การออกแบบต้องให้เลื่อนได้ทดแทนการเคลื่อนที่ของกระดาษจากการใช้งานเดิม และเนื่องจากการคัดแปลงนี้ต้องใช้พื้นที่ของช่องทางเดินชิ้นงานเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นความกว้างของช่องทางเดินชิ้นงานจะแคบลงเท่ากับ ความกว้างของชุดกลไกดึงการเริ่มทำงาน ดังนั้นการออกแบบสั่งการทำงานในคอมพิวเตอร์ต้องเว้นพื้นที่การทำงานบริเวณที่เป็นชุดกลไกดึงกระดาษ ฐานรองชิ้นงานนี้ต้องสามารถเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นจึงได้เชื่อมต่อฐานรองชิ้นงานกับรางเลื่อน และวัสดุที่ทำให้เคลื่อนที่ได้ดีคือด้านล่างของฐานรองชิ้นงานซึ่งสัมผัสกับแกนขับเคลื่อน

รางเลื่อนฐานรองชิ้นงาน เป็นชิ้นส่วนที่อยู่ติดกับฐานรองชิ้นงาน อุปกรณ์ที่นำมาใช้ในโครงการนี้มีความยาวขนาด 48 เซนติเมตร รางเลื่อนฐานรองชิ้นงานนี้มีความเรียบลื่นและแข็งแรงเพื่อสามารถรองรับน้ำหนักของฐานรองได้

มอเตอร์เกียร์ เป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมการเริ่มทำงานของฐานรองชิ้นงาน ได้ออกแบบติดตั้งเพิ่มเติมเพื่อเป็นตัวปล่อยฐานรองชิ้นงาน ให้เริ่มทำงานหลังจากการสั่งงานจากคอมพิวเตอร์ ในโครงการนี้ใช้มอเตอร์ขนาดแรงดัน 12 โวลต์ความเร็วของแกนหมุน 150 รอบต่อนาที ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ด้วยสวิทช์สั่งให้หยุดทำงานเมื่อฐานรองชิ้นงานถูกปล่อยออกไป

ไมโครสวิทช์ เป็นอุปกรณ์ที่ควบคุมการทำงานของมอเตอร์เกียร์ มอเตอร์เกียร์จะทำงานเมื่อกลไกการเริ่มทำงานสั่งทำงาน โดยมีไมโครสวิทช์เป็นตัว คัดต่อการทำงานของมอเตอร์เกียร์และจะสั่งหยุดการทำงานเมื่อฐานรองชิ้นงานถูกปล่อยออกไป

จากอุปกรณ์ข้างต้นต้องปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถประกอบเข้ากับส่วนที่มากับตัวเครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดได้ หลังจากนั้นส่วนประกอบของอุปกรณ์ต่าง ๆ มาประกอบจะได้เครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดที่ออกแบบไว้และคัดแปลงแสดงดังรูปที่ 2

2.2 การเตรียมแผ่นฐานและสารละลาย

2.2.1 การเตรียมแผ่นฐาน

การ เตรียมแผ่นฐานสำหรับการทดลองกัดด้วยลวดลายสารไวแสงมีขั้นตอนการดังนี้ นำแผ่นฐานที่ใช้ในการทดลองในการทดลองนี้ใช้แผ่นฐานซิลิคอนทำความสะอาดด้วยวิธี RCA1 และ RCA2



จากนั้นทำให้แห้งสนิทด้วยไนโตรเจนบริสุทธิ์เมื่อได้แผ่นฐานสะอาดแล้วนำไปเคลือบผิวหน้าด้วยสารไวแสง (Sumiresist PFI-34) โดยใช้การเคลือบหมุนเหวี่ยง ด้วยความเร็วรอบ 500 rpm นาน 5 วินาที จากนั้นใช้ความเร็วรอบ 3000 rpm นาน 8 วินาที และอบด้วยอุณหภูมิ 90°C นาน 20 นาที เพื่อรอการใช้งานต่อไป

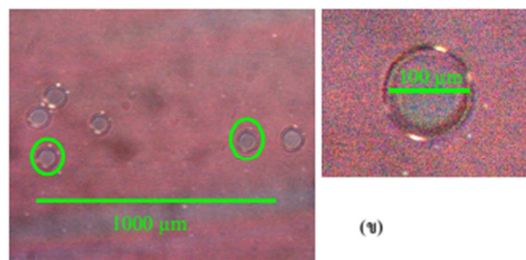
2.2.2 การเตรียมสารละลาย

การเตรียมสารละลายสำหรับฉีดด้วยเครื่องพิมพ์เพื่อสร้างลวดลายใช้สารตัวทำละลายสารไวแสงในการทำลวดลายนี้ใช้สารอะซิโตนเพื่อให้ตัวทำละลายสารไวแสงทำปฏิกิริยากับสารไวแสงโดยการทำลายพันธะยึดเหนี่ยวของสารไวแสงและเกิดเป็นลวดลายตามต้องการในการใช้งานจะเติมตัวทำละลายสารไวแสงลงในถาดพิมพ์ที่ทำความสะอาดแล้วและปิดฝักเพื่อไม่ให้ตัวทำละลายระเหยออกมา หลังจากนั้นก็ส่งการทำงานเครื่องพิมพ์ด้วยคอมพิวเตอร์ก็จะได้ลวดลายที่ต้องการบนแผ่นฐานที่เตรียมไว้เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป



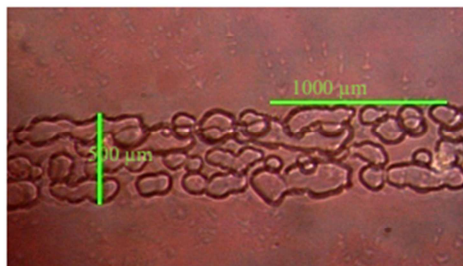
รูปที่ 2 เครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดที่ดัดแปลง

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์



รูปที่ 3 (ก) ผลการทดลองที่ออกแบบเป็นวงกลมวัดด้วยกล้องสเตอริโอ ไมโครสโคปกำลังขยาย 60 เท่า

(ข) ภาพขยายผลการทดลองที่ออกแบบเป็นวงกลมวัดด้วยกล้องสเตอริโอ ไมโครสโคปกำลังขยาย 75 เท่า



รูปที่ 4 ผลการทดลองที่ออกแบบเป็นเส้นตรงวัดด้วยกล้องสเตอริโอ ไมโครสโคปกำลังขยาย 75 เท่า

ในรูปที่ 3 ลักษณะของวงกลมที่ได้เป็นหลุมลงไปบนเนื้อของสารไวแสงที่เคลือบบนแผ่นฐาน และเนื้อสารไวแสงนั้นจะออกมาอยู่ที่ขอบของขนาดหยดที่ทำได้ แสดงให้เห็นว่า ตัวทำละลายสารไวแสง ที่หยดลงไปก็สารไวแสงนั้นทำปฏิกิริยากับสารไวแสงบริเวณนั้นและรวมตัวที่ขอบของหลุมที่เกิดขึ้น

ในรูปที่ 4 เป็นการสร้างเส้นตรงขนาดเล็กจากการตัวทำละลายสารไวแสง ลงบนสารไวแสงที่เคลือบผิวของแผ่นฐานซิลิคอน ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบสร้างเส้นตรงที่มีขนาดความกว้างของเส้น 500 ไมครอนเครื่องนี้สามารถฉีดเส้นตรงที่มีขนาด 500 ไมครอนตามที่ต้องการแบบได้ แต่เส้นมีลักษณะเป็นหยดขนาดไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยผสมกัน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากหัวฉีดมีจำนวนมากถึง 320 หัว ฉีดสารออกมาในลักษณะหยดสารรวมกันเกิดเป็นเส้น จากผลที่ได้นี้สามารถนำไปพัฒนาเพื่อหาทางลดความไม่ต่อเนื่องของสารที่ฉีดออกมา

4. สรุป

ความสำเร็จขั้นต้น ของการพัฒนาเครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดให้สามารถใช้งานได้กับแผ่นฐานซิลิคอน คือทำงานได้เองหลังจากสั่งการจากคอมพิวเตอร์ที่ออกแบบลวดลายไว้แล้ว ใช้งานได้ดีกับการฉีดแบบหยดมากกว่าการฉีดเป็นแนวเส้นตรง ลดขั้นตอนการสร้างลวดลายของฟิล์มบางที่ใช้อยู่ทั่วไป สามารถใช้งานในการฉีดตัวทำละลายสารไวแสงได้ดี แต่ก็มีส่วนที่ไม่ต้องการเป็นหยดของตัวทำละลายสารไวแสงเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการที่เครื่องพิมพ์มีจำนวนหัวฉีดมากถึง 320 หัว (Nozzles) ดังนั้นหัวที่ไม่ถูกสั่งให้ทำงานจะมีตัวทำละลายสารไวแสงหยดออกมาระหว่างการทำงานด้วยและสามารถนำผลการทดลองที่ได้มาหาทางปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ



ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุน ในการทำโครงการให้โครงการสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Zhao, A. Wang and M.A. Green, 24.5% Efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24.7% efficiency PERL cells on FZ substrates, *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 7 (1999), p. 471.
- [2] F. C. Krebs, Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, (2009) 93, p. 394
- [3] H.Sirringhaus, T. Kawase, and R.H Friend, High-resolution ink-jet printing of all-polymer transistor circuits, *MRS Bull.* 26 (2001), p.539.
- [4] K.F. Teng and R.W. Vest, Liquid Ink Jet Printing with MOD Inks for Hybrid Microcircuits, *IEEE Trans. Components Hybrids Manuf. Technol.* CHMT-12 (1987), p. 545.
- [5] X.L. Zhao, J.R.G. Evans, M.J. Edirisinghe and J.H. Song, Direct ink-jet printing of vertical walls, *J. Am. Ceram. Soc.* 85 (2002), p. 2113.
- [6] R. Noguera, M. Lejeune and T. Chartier, 3D fine scale ceramic components formed by ink-jet prototyping process, *J. Eur. Ceram. Soc.* 25 (2005), p. 2055.
- [7] T. R. Hebner, C. C. Wu, D. Marcy, M. H. Lu, and J. C. Sturm, Ink-jet printing of doped polymers for organic light emitting devices, *Applied Physics Letters*, 72,(1998) p. 519.
- [8] S. Magdassi, and M. B. Moshe, Patterning of Organic Nanoparticles by Ink-jet Printing of Microemulsions, *MRS Bulletin*, Volume 26, Issue 7, (2001) p.539-543.
- [9] S. H. Eom, S. Senthilarasu, P. Uthirakumar, C. H. Hong, Y. S. k Lee, J. Lim, S. C. Yoon, C. Lee, S. H. Lee, Preparation and characterization of nano-scale ZnO as a buffer layer for inkjet printing of silver cathode in polymer solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, (2008) 92, p. 564.
- [10] 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*, (2008) 92, p. 1140.



ประวัติผู้เขียน

นายณัฐพงศ์ ศิวผา เกิดเมื่อวันที่ 20 พฤษภาคม พ.ศ. 2530 ที่บ้านเลขที่ 86 หมู่ที่ 1 ตำบลทุ่งสว่าง อำเภอประทาย จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2552 และ ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะศึกษาได้ทำงานวิจัยทางด้านกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งการสร้างรอยต่อพี-เอ็นเทคนิค SOD ด้วยวิธีการเตรียมแหล่งสารเจือแบบ sol-gel การสร้างชั้นฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) การปรับปรุงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานและการลดต้นทุนการผลิต ด้วยการนำเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์แบบฉีดมาประยุกต์ใช้ในการสร้างช่องเปิดชั้นพาสซีเวชันด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ การทำหน้ากากโลหะ (Hard mask) สำหรับลวดลายกริดโลหะที่ผลิตด้วยกระบวนการสปีดเตอร์ริงด้วยเทคนิคโฟโตลิโทกราฟีโดยใช้แหล่งแสง UV และแสงซินโครตรอน การเตรียมชั้นฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์และขั้วโลหะด้านหน้าและด้านหลังด้วยกระบวนการสปีดเตอร์ริง ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย ประเภทบัณฑิตศึกษาประจำปี 2555 กลุ่มเรื่อง การบริหารจัดการพลังงานและสร้างพลังงานทดแทน เรื่องการศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากการสร้างลวดลายชั้นพาสซีเวชันด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 2 บทความ ดังรายชื่อที่ปรากฏในภาคผนวก จ ปัจจุบันเป็นวิศวกรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี