



รายงานการวิจัย

เทคนิคต้นทุนต่ำด้วยการฉีดสารละลายเพื่อสร้างชั้นรอยต่อพาสซีเวชัน
คุณภาพสูงที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน

Low-Cost Ink-Jetting Technique for High Quality Passivation
Rear Contacts in Silicon Photovoltaic Cells

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

เทคนิคต้นทุนต่ำด้วยการฉีดสารละลายเพื่อสร้างชั้นรอยต่อพาสซีเวชัน
คุณภาพสูงที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน

Low-Cost Ink-Jetting Technique for High Quality Passivation
Rear Contacts in Silicon Photovoltaic Cells

ผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผศ.ดร. ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2553

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ธันวาคม 2557

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปี
งบประมาณ 2554 ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร.ศิริรัตน์ ทับสูงเนิน รัตน์จันทร์ และดร.อรรถพล มณีแดง สำหรับ
คำแนะนำที่เป็นประโยชน์กับการสังเคราะห์สาร

ผศ.ดร. ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์

2557



บทคัดย่อ

เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Local back surface field (LBSF) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้ประสิทธิภาพสูงจากการปรับปรุงค่าแรงดันเปิดวงจรและกระแสไฟฟ้าลัดวงจรให้สูงขึ้น เมื่อเทียบกับโครงสร้างของ Back surface field (BSF) โครงสร้างของ LBSF ประกอบด้วยชั้นออกไซด์พาสซีเวชันที่เปิดช่องบางส่วนที่ด้านหลังของเซลล์ แต่เนื่องจากข้อจำกัดด้านขั้นตอนและกระบวนการผลิตมีความซับซ้อนหลายขั้นตอน จึงไม่เหมาะกับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ในเชิงพาณิชย์ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาเครื่องพิมพ์แบบฉีดแบบความร้อนให้สามารถสร้างช่องเปิดของชั้นออกไซด์ที่ด้านหลังของแผ่นฐานซิลิคอนสำหรับ เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ทำให้กระบวนการผลิตนั้นง่ายขึ้น และพร้อมพัฒนาสู่อุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์ต่อไป

รอยต่อชั้น n-emitter ของเซลล์แสงอาทิตย์ LBSF ที่ผลิตขึ้นใช้วิธีการแพร่ซึมด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 60 นาที และใช้เทคนิค Spin on doping (SOD) ในการสร้างฟิล์มฟอสฟอรัสซิลิเกตเพื่อเป็นแหล่งสารเจือ ซึ่งความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น n ที่ได้มีค่าประมาณ 128 Ω/square ชั้นออกไซด์พาสซีเวชันผลิตด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating method) และอบที่อุณหภูมิ 500 °C เครื่องพิมพ์แบบฉีดที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถสร้างช่องเปิดแบบเส้นตรงที่ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ด้วยการใช้สารไวแสงชนิดบวกเป็นหน้ากากให้กับชั้น SiO_2 และการส่งการให้เครื่องพิมพ์ฉีดสารละลายอะซิโตนไปทำลายในบริเวณที่ต้องการเปิดช่อง ความกว้างของช่องเปิด SiO_2 มีขนาดแคบสุดประมาณ 105 μm สามารถผลิตเซลล์ LBSF ที่มีเงื่อนไขอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ส่วนที่ไม่เปิดช่องต่าง ๆ กัน ประกอบด้วย 12.95% 28.86% และ 50.50% และความหนาของออกไซด์ที่ 100 nm และ 150nm การสร้างบริเวณ p^+ ภายในช่องเปิดเพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ผิวด้านหลังในบริเวณช่องเปิดนั้นด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่าง Al-Si เป็น Al-Si อลลอยในบริเวณช่องเปิด SiO_2 ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิที่ 577 °C นาน 30 นาที

ผลการวิเคราะห์ทางโครงสร้างด้วยเทคนิค Field emission scanning electron microscopy (FESEM) นั้นแสดงถึงบริเวณรอยสัมผัสของแถบ p^+ Si หรือ BSF จากอัลลอย Si-1%Al มีความหนาประมาณ 5 μm อีกทั้งผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ LBSF ในเงื่อนไขต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าเซลล์ LBSF ที่มีความหนาของออกไซด์ที่ 100 nm และระยะช่องเปิดของชั้นพาสซีเวชันออกไซด์ที่ 105 μm ที่มีค่าอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ส่วนที่ไม่เปิดช่องเท่ากับ 12.95% นั้นให้ค่าช่วงชีวิตของพาหะสูงกว่าตัวอย่างอื่น ๆ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 98.18 sec. ส่งผลให้การผลิต V_{oc} และ I_{sc} มีค่าสูงสุดเท่ากับ 600 mV และ 3.72 A ตามลำดับ เพิ่มขึ้น 0.5% และ 1.5% ตามลำดับเมื่อเทียบกับเซลล์โครงสร้าง BSF เซลล์ LBSF นี้มีค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจากการจำลองผลด้วย PC1D มีค่า η ประมาณ 18.01% ภายใต้แสง AM1.5

Abstract

Local back surface field solar cell (LBSF solar cell) is able to obtain the higher efficiency due to the improvements of open circuit voltage and short circuit current than back surface field solar cell (BSF solar cell). The structure of LBSF solar cell is composed mainly of oxide passivation pattern as some opened grooves at the rear side. However, the drawbacks of many production process steps and complexities are not suitable for industrial production. In this research, inkjet printer was developed in order to produce opened oxide patterns for LBSF solar cell by using the simple fabrication process.

The n-emitter Si layer LBSF solar cells in this work were fabricated by thermal diffusion process. Dopant source as phosphorus silicate glass film was produced by using a spin on doping technique. The sheet resistance was obtained of 128 Ω /square. In addition, silicon dioxide (SiO_2) passivation layer on rear cell was formed by spin coating method and subsequently annealed at 500 $^\circ\text{C}$. The inkjet printer was developed for producing the opened SiO_2 patterns with positive photoresist mask. The photoresist solvent as acetone was injected on SiO_2 layer in the pattern designed from the developed printer. The least width of 105 μm of the opened SiO_2 groove was obtained. The samples were studied on the various conditions of the aperture SiO_2 ratio values including 12.95% 28.86% and 50.50%. The SiO_2 thickness values of 100 nm and 150nm was interested in this passivation study. When aluminum layer was coated on the opened SiO_2 layer and annealed at 577 $^\circ\text{C}$ for 30 min, p^+ region within the opened interface between Al and Si was induced due to Al-Si phase exchange. Therefore, local back surface field (LBSF) was performed at the opened SiO_2 area.

The structure of samples was studied by field emission scanning electron microscopy (FESEM) to illustrate the local p^+ Si as BSF region from the alloy of Si-1%Al. p^+ Si band is around of 5 μm . Furthermore, the carrier life-time of LBSF cell with various values of aperture SiO_2 ratio resulted that LBSF cell with 100 nm SiO_2 thickness and the openings of 105 μm as 12.95% aperture ratio value is able to provide the higher carrier life-time than others. The measured carrier life-time is 98.18 sec resulting to V_{oc} and I_{sc} of 600 mV and 3.72 A, respectively. To compare with BFS solar cell, the electrical results of LBSF solar cell shown the V_{oc} and I_{sc} enhancement by 0.5% and 1.5%, respectively. The conversion efficiency (η) by PC1D simulation is 18.01% under AM1.5 illumination.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	5
บทที่ 2 การปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยชั้นพาสซีเวชัน	
2.1 บทนำ	6
2.2 คุณสมบัติของวัสดุที่มีผลต่อการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์	6
2.2.1 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์	7
2.2.2 อัตราการผลิตคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Generation Rate)	8
2.2.3 อัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะข้างน้อย (Recombination Rate)	10
2.2.4 ค่าช่วงชีวิตของพาหะ (Lifetime of Carriers)	14
2.2.5 ความยาวการแพร่ของพาหะ (Diffusion Length)	16
2.2.6 การรวมตัวใหม่ที่ผิว (Surface Recombination)	17
2.3 การผลิตกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าเมื่อแสงตกกระทบบเซลล์แสงอาทิตย์	19
2.3.1 คุณสมบัติกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-n เชิงอุดมคติ	20
2.3.2 ตัวแปรต่าง ๆ ทางเออร์ทพุทของเซลล์แสงอาทิตย์	23
2.4 การสูญเสียของกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าจากกลไกการรวมตัวใหม่	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
2.4.1	สารเจือในแผ่นฐานเซลล์แสงอาทิตย์	26
2.4.2	การสูญเสียกระแสไฟฟ้าจากกลไกการรวมตัวใหม่	27
2.4.3	การสูญเสียแรงดันไฟฟ้าจากกลไกการรวมตัวใหม่	28
2.5	ชั้นพาสซีเวชันของเซลล์แสงอาทิตย์ (Passivating layers)	30
2.5.1	ชั้นพาสซีเวชันกับสนามไฟฟ้าด้านหลังในบางส่วนแบบ LBSF.....	32
2.5.2	การสร้างชั้นพาสซีเวชันด้านหลังกับบริเวณการแพร่ p^+ Si ด้วยวิธี Al Pining	35
2.5.3	การสร้างลวดลายช่องเปิดซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการฉีดด้วย เครื่องพิมพ์	36
2.6	สรุป	37
บทที่ 3	การดัดแปลงเครื่องพิมพ์แบบฉีดเพื่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF	
3.1	บทนำ	39
3.2	หลักการของเครื่องพิมพ์แบบฉีด	39
3.2.1	หลักการของเครื่องพิมพ์แบบฉีดชนิดทำงานต่อเนื่อง	39
3.2.2	หลักการของเครื่องพิมพ์แบบฉีดชนิดหยุดตามคำสั่ง	40
3.3	การดัดแปลงเครื่องพิมพ์แบบฉีดเพื่อใช้กับแผ่นฐานซิลิคอน	41
3.4	การสร้างลวดลายช่องเปิดชั้นออกไซด์สำหรับเป็นชั้นพาสซีเวชันด้วยเทคนิค แบบฉีด	44
3.4.1	การออกแบบลวดลายและขั้นตอนการผลิตช่องเปิดพาสซีเวชัน	44
3.4.2	ผลของการฉีดซ้ำของสารละลายที่มีต่อการเปิดช่องชั้น SiO_2	48
3.5	สรุป	52
บทที่ 4	กระบวนการผลิตชั้นพาสซีเวชันแบบ LBSF ด้วยวิธีการฉีดสารละลาย	
4.1	บทนำ	53
4.2	การผลิตชั้น n-emitter ด้วยวิธี Spin on dopant	53
4.2.1	การสังเคราะห์สารละลายฟอสฟอรัสสำหรับฟิล์ม PSG	53
4.2.2	การผลิตฟิล์ม PSG ด้วยวิธี Spin coating	56
4.3	การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น n-emitter	59

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 การคำนวณหาความหนาของชั้นเอ็น (X)	65
4.5 การสร้างชั้นไดโอดีเล็กทริกซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย Sol-gel	67
4.5.1 การเตรียมสารละลายตั้งต้นสำหรับสร้างฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ ...	67
4.5.2 ฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยเทคนิคเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง	67
4.5.3 การสร้างชั้นพาสซีเวชันด้านหลังบางส่วนด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด	69
4.6 การสร้างชั้นซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูง ด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนเฟส ระหว่าง Si กับ Al	71
4.7 สรุป	73
บทที่ 5 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ชั้นพาสซีเวชันแบบ LBSF	
5.1 บทนำ	74
5.2 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างของ LBSF	74
5.3 การวิเคราะห์ค่าช่วงเวลาชีวิตของพาหะ (Carrier lifetime)	75
5.4 การวิเคราะห์การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จากพารามิเตอร์ที่ได้จากการ ทดลองด้วยแบบจำลอง PC1D	83
5.5 สรุป	87
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	
6.1 ผลลัพธ์จากการดัดแปลงเครื่องพิมพ์แบบฉีดสำหรับการสร้างชั้น LBSF	88
6.2 ผลลัพธ์จากการสร้างรอยต่อ p-n ด้วยเทคนิค Spin-on-doping (SOD) ...	88
6.3 ผลลัพธ์จากการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ด้วยวิธีการฉีด	89
6.4 ข้อเสนอแนะ	89
บรรณานุกรม	91
ภาคผนวก	
ก การคำนวณความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลายตั้งต้น	96
ข การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้สร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์	98
ค ผลการวัดค่าช่วงเวลาชีวิตพาหะที่ได้จากเครื่อง WCT-120 Sinton	100

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ง สารไวแสง และสารละลายอะซีไตน	104
ประวัติผู้วิจัย	107



สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบต่าง ๆ ที่นำชั้นพาสซีเวชันที่ผิวด้านหลัง (LBSF) มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน	33
ตารางที่ 3.1	ข้อมูลของลวดลายช่องเปิดเส้นตรงยาวและค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ระยะห่างของเส้นช่องเปิด	46
ตารางที่ 3.2	ข้อมูลของลวดลายช่องเปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ระยะห่าง	46
ตารางที่ 4.1	เงื่อนไขการเตรียมสารละลายสำหรับฟิล์มฟอสฟอซิลิเกต	55
ตารางที่ 4.2	ผลการวัดความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น n ในเงื่อนไขสัดส่วนความเข้มข้น TEOS:H ₃ PO ₄ ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 800 °C - 1000 °C เป็นเวลา 60 นาที	63
ตารางที่ 4.3	ผลการวัดความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้นเอ็นเงื่อนไขเวลาการแพร่สารเจือที่ต่างกัน โดยที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H ₃ PO ₄ เท่ากับ 4:1 ภายใต้อุณหภูมิ 1000 °C	64
ตารางที่ 4.4	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสในเงื่อนไขของค่าสัดส่วนของ TEOS:H ₃ PO ₄	65
ตารางที่ 4.5	ผลการคำนวณความลึกของชั้นเอ็นตามเงื่อนไขการแพร่สารเจือที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H ₃ PO ₄ เท่ากับ 4:1 5:1 และ 6:1 ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 800 °C - 1000 °C เป็นเวลา 60 นาที	66
ตารางที่ 4.6	ผลการคำนวณความลึกของชั้นเอ็นตามเงื่อนไขเวลาในการแพร่สารเจือที่ต่างกัน โดยที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H ₃ PO ₄ เท่ากับ 4:1 ภายใต้อุณหภูมิ 1000 °C	66
ตารางที่ 4.7	เงื่อนไขการทดลองและผลของความหนาจากการวัดด้วยกล้อง optical profiler	68
ตารางที่ 5.1	เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อพี-เอ็นในเงื่อนไขที่มีความหนาและระยะห่างของช่องเปิดที่ต่างกันเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่ไม่มีช่องชั้นพาสซีเวชัน	79
ตารางที่ 5.2	ค่าช่วงชีวิตและอัตราความเร็วของการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิวของชั้นงานในเงื่อนไขโครงสร้างพาสซีเวชันที่แตกต่างกัน	82
ตารางที่ 5.3	พารามิเตอร์ที่สำคัญในการกำหนดในแบบจำลอง PC1D เพื่อนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานในเซลล์แสงอาทิตย์	84
ตารางที่ 5.4	ค่าทางไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างต่าง ๆ ด้วยการจำลองจาก PC1D	86

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 1.1	โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ PERL	1
รูปที่ 1.2	กฎของ Liebig สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน	2
รูปที่ 2.1	ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงต่าง ๆ ของวัสดุสารกึ่งตัวนำต่างชนิด	7
รูปที่ 2.2	การดูดกลืนแสงสีน้ำเงินที่เกิดขึ้นใกล้ผิวเซลล์ ส่วนแสงสีแดงเกิดขึ้นที่ระยะลึกลงไปภายในเซลล์	8
รูปที่ 2.3	อัตราการผลิตพาหะอิเล็กตรอน-โฮลในวัสดุซิลิคอนที่อยู่ในฟังก์ชันของระยะความลึกจากผิวของเซลล์แสงอาทิตย์	10
รูปที่ 2.4	การรวมตัวใหม่แบบเปล่งแสงของสารกึ่งตัวนำแบบ direct band gap	11
รูปที่ 2.5	กลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นที่ Mid-gap	12
รูปที่ 2.6	กลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะด้วยปรากฏการณ์ของ Auger Recombination	13
รูปที่ 2.7	ค่าช่วงชีวิตของพาหะชนิด Minority ก่อนเกิดการรวมตัวใหม่ในผลึกซิลิคอนคุณภาพสูง (a) p-type Si และ (b) n-type Si	13
รูปที่ 2.8	ระดับของอะตอมสารเจือในแผ่นฐานซิลิคอนที่มีผลช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อย โดยพิจารณากระบวนการรวมตัวใหม่ทั้ง 3 แบบ	15
รูปที่ 2.9	แถบสีของของเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกซิลิคอนหลายรูปแบบ PERL กับค่าเปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนปริมาณพาหะที่ได้รับการกระตุ้น และรวบรวมได้เทียบกับค่าที่แตกต่างกันจากบริเวณอื่น ๆ	17
รูปที่ 2.10	พันธะแขวนขาดที่ผิวของวัสดุ	18
รูปที่ 2.11	เทคนิคการลดผลของการรวมตัวใหม่ที่ผิวของพาหะข้างน้อยในเซลล์แสงอาทิตย์	19
รูปที่ 2.12	การกระจายตัวของปริมาณพาหะในสภาวะมีพลังงานแสงมากระตุ้น	21
รูปที่ 2.13	คุณลักษณะ I-V ของไดโอดรอยต่อ p-n ภายใต้สภาวะมืด และสภาวะได้รับแสงกระแสโฟตอน (I_L)	23
รูปที่ 2.14	กราฟ I-V ในควอดแดนต์ที่ 1 แสดงจุดกระแสลัดวงจร (I_{sc}) และแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) รวมถึงเส้นกราฟของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{mp})	24
รูปที่ 2.15	วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่พิจารณาความต้านทานไฟฟ้าแฝงภายใน	25
รูปที่ 2.16	ผลของปริมาณสารเจือแผ่นฐานซิลิคอนชนิด p ที่มีต่อตัวแปรสำคัญของเซลล์ (a) ไม่มีสนามไฟฟ้าที่ผิวด้านหลัง (b) มีสนามไฟฟ้าที่ผิวด้านหลัง	27

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 2.17	ผลกระทบของการสูญเสียทางแสงและทางกลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะที่มีต่อประสิทธิภาพทางควอนตัมทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ในแบบอุดมคติและแบบเป็นจริง	28
รูปที่ 2.18	ผลของปริมาณสารเจือ (N_D) ที่มีต่อค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์	
รูปที่ 2.19	เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่ทำพาสซีเวชันด้านรับแสงกับการทำร่องแคบขนาดไมคอน เรียกว่า PESC solar cell	30
รูปที่ 2.20	เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERC ที่มีชั้นพาสซีเวชันด้านบน และด้านล่าง	31
รูปที่ 2.21	เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERL กับชั้นพาสซีเวชันด้านบนและด้านหลังกับบริเวณ การแพร่ p^+	31
รูปที่ 2.22	เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบ PERT	32
รูปที่ 2.23	เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบ PERF	32
รูปที่ 2.24	รูปแบบของพื้นที่ช่องเปิดกับระยะห่างของช่องเปิดในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ LBSF	34
รูปที่ 2.25	สัดส่วนของการเปิดช่อง SiO_2 ด้านหลังที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	34
รูปที่ 2.26	ไดอะแกรมของกระบวนการแรกเพื่อให้เกิดช่องเปิดด้วย Al spiking ในชั้น SiO_2	35
รูปที่ 2.27	ไดอะแกรมของกระบวนการที่ 2 เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่าง Al กับ a-Si	36
รูปที่ 2.28	ขั้นตอนการสร้างช่องเปิดออกไซด์ด้วยวิธี Inkjet printing	37
รูปที่ 3.1	กลไกการทำงานของเครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดแบบทำงานต่อเนื่อง	40
รูปที่ 3.2	โครงสร้างการฉีดยาละลายแบบหยดตามคำสั่งด้วยระบบความร้อน	41
รูปที่ 3.3	โหมตทิศทางการฉีดยาละลายของระบบการฉีดชนิดเพียโซอิเล็กทริก	41
รูปที่ 3.4	ส่วนประกอบหลักของเครื่องพิมพ์ที่ดัดแปลงสำหรับในงานวิจัยนี้	42
รูปที่ 3.5	เครื่องพิมพ์แบบฉีดที่ดัดแปลงขึ้นในงานวิจัยนี้	43
รูปที่ 3.6	หัวฉีดที่ใช้ในงานวิจัยนี้	43
รูปที่ 3.7	การเปรียบเทียบของขั้นตอนการเปิดช่องชั้นพาสซีเวชันระหว่างการใช้นาโนเทคนิค โฟโตลิโทกราฟี และเทคนิคการฉีดด้วยเครื่องพิมพ์	45
รูปที่ 3.8	โครงสร้างของชั้นฟิล์ม photoresist/ SiO_2 /p-Si substrate ก่อนทำการเปิดช่อง	47
รูปที่ 3.9	ขั้นตอนการเปิดช่องชั้น SiO_2 ด้วยวิธีการฉีด	47
รูปที่ 3.10	ลวดลายและขนาดที่ออกแบบสำหรับเปิดช่องชั้นสารไวแสง	47

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.11	(ก)-(ข) ภาพถ่ายช่องเปิดแบบเส้นตรงของชั้นไวแสงเมื่อทำการฉีดยาละลายอาซิโตน 1 ครั้ง 2 ครั้ง 3 ครั้ง 4 ครั้ง 5 ครั้ง 6 ครั้ง 8 ครั้ง และ 10 ครั้ง ตามลำดับ 49
รูปที่ 3.12	(ก)-(ค) ลวดลายที่ออกแบบเป็นช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีขนาดและระยะห่างต่างกัน (ซ้าย) ภาพถ่ายช่องเปิดสี่เหลี่ยมของชั้นไวแสงเมื่อทำการฉีดยาละลายอาซิโตน 10 ครั้ง (ขวา) 50
รูปที่ 3.13	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการฉีดซ้ำของสารทำละลายกับขนาดของช่องเปิดที่ได้ 51
รูปที่ 3.14	ภาพด้านบนของช่องเปิดและเส้นโปรไฟล์ที่วัดได้จากกล้อง Optical profiler 51
รูปที่ 4.1	ขั้นตอนการเตรียมสารละลายสำหรับการผลิตฟิล์ม PSG 54
รูปที่ 4.2	(ก) การทวงสารละลาย TEOS:H ₂ O:C ₂ H ₅ O ด้วยหลอดตวงปิเปต (ข) กวนผสมที่อุณหภูมิ 70 °C (ค) หยดสาร H ₃ PO ₄ ตามปริมาณที่กำหนด (ง) กวนส่วนผสมที่อุณหภูมิห้อง นาน 60 นาที 55
รูปที่ 4.3	(ก) วางแผ่น Si บนแท่นหมุนของเครื่อง Spin coater (ข) หยดสารละลายบนแผ่น Si (ค) ขณะที่เครื่อง Spin coater กำลังทำงานและสารละลายกำลังเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงบนชิ้นงาน (ง) อบฟิล์มในเตาอบที่อุณหภูมิ 200 °C นาน 15 นาที 57
รูปที่ 4.4	ลักษณะการกระจายความหนาแน่นของอะตอมสารเจือจากผิวไปยังความลึก x ต่าง ๆ ในแผ่นผลึก 59
รูปที่ 4.5	ภาพจำลองการวัดความต้านทานแบบ 4-point probes 60
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยความถูกต้องของความหนาและ d/s จากการวัด 4-point probes 62
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น n กับค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของ TEOS:H ₃ PO ₄ ที่เงื่อนไข 4:1 5:1 และ 6:1 และเงื่อนไขอุณหภูมิการแพร่ 800 °C - 1000 °C 64
รูปที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นของชั้นเอ็นที่วัดได้ กับเวลาในการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ 1000 °C 65
รูปที่ 4.9	แผนภาพขั้นตอนการเตรียมสารละลาย Sol-gel สำหรับผลิตฟิล์ม SiO ₂ 67
รูปที่ 4.10	ผลการวัดความหนาฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยกล้อง optical profiler 68
รูปที่ 4.11	(ก) ลวดลายช่องเปิดของฟิล์มไวแสง (ข) ลวดลายช่องเปิดของฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ 69

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 4.12	(ก) ลวดลายช่องเปิดของฟิล์มสารไวแสงจากแบบลวดลายขนาด 100 μm ระยะห่าง 200 μm (ข) ลวดลายช่องเปิดของฟิล์ม SiO_2 หลังจากการล้างสารไวแสงออก	70
รูปที่ 4.13	กระบวนการสร้างลวดลายชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นชั้นพาสซีเวชัน	70
รูปที่ 4.14	แผนภาพเฟสไดอะแกรมของ Al-Si	71
รูปที่ 4.15	การสร้างชั้น LBSF ด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่าง Si กับ Al ที่ช่องเปิด	72
รูปที่ 5.1	ภาพตัดขวางของบริเวณ LBSF ที่ได้จากการถ่ายภาพด้วย FE-SEM	74
รูปที่ 5.2	ระบบการทำงานของเครื่อง Photoconductance Lifetime Tester รุ่น WCT-120	77
รูปที่ 5.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพาหะส่วนเกินกับอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ที่เปรียบเทียบระหว่างโครงสร้าง BSF และ LBSF	82
รูปที่ 5.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพาหะส่วนเกินกับอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะในเซลล์ตัวอย่างที่มีชั้นพาสซีเวชันกับระยะห่างช่องเปิดค่าต่าง ๆ	83
รูปที่ 5.5	หน้าตาการทำงานของโปรแกรมแบบจำลอง PC1D สำหรับตัวอย่าง S_6	85
รูปที่ 5.6	การเปรียบเทียบกราฟ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF (S_6) กับ BSF (S_3)	86
รูปที่ 5.7	การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรจากเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีระยะและขนาดช่องเปิด SiO_2 ต่าง ๆ กัน	87

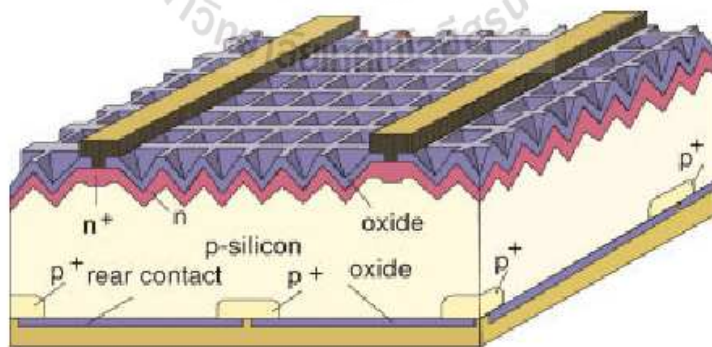
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน (c-Si solar cell) จัดเป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Opto-electronic device) โครงสร้างแบบรอยต่อ p-n มีคุณลักษณะการทำงานที่สามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง พลังงานที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ถือว่าเป็นพลังงานทดแทนที่ไม่มีวันหมดสิ้น (Renewable energy) อีกทั้งเซลล์แสงอาทิตย์นั้นผลิตจากวัสดุซิลิคอนที่ให้คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีเสถียรภาพสูง และเป็นวัสดุที่มีปริมาณมากบนผิวโลก มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อมีการนำไปใช้งาน ซิลิคอนยังเป็นวัสดุที่นำไปแพร่สารเจือชนิดพี หรือเอ็นได้ง่าย อย่างไรก็ตามเมื่อนำซิลิคอนไปผลิตเป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์รอยต่อ p-n เพื่อแปลงพลังงานแสงแดดเป็นพลังงานไฟฟ้าจะได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีราคาสูง เนื่องจากต้องใช้พื้นที่รอยต่อ p-n สำหรับเป็นชั้นหน้าต่างรับแสงขนาดใหญ่เพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) และแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) มีค่าสูง

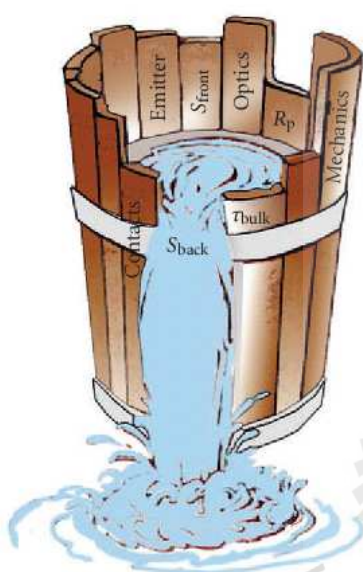
ดังนั้นจึงมีงานวิจัยมากมายมุ่งเน้นการลดการสูญเสียพลังงานภายในเซลล์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูง อย่างไรก็ตามเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงชนิดผลึกซิลิคอนในโครงสร้างแบบ PERL (Passivated Emitter, Rear Locally-diffusion cells) ที่ UNSW ได้พัฒนาให้ประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ $25\pm 5\%$ จากการสร้างชั้นพาสซีเวชันด้านบน และด้านล่างในแบบเปิดช่องเล็ก ๆ เพื่อให้เกิดบริเวณ p^+ เล็ก ๆ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โครงสร้างดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ PERL

แม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบ PERL นั้นจะให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงแต่มีกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนไม่เหมาะกับการผลิตปริมาณมากในเชิงอุตสาหกรรม เช่นกระบวนการทำ

ลวดลายเพื่อสร้างผิวพริมาตรวมตัวกลับที่ด้านบนเซลล์ การเปิดช่องที่บริเวณชั้น SiO_2 พาสซีเวชันเพื่อแพร่สารเจือให้เกิดบริเวณ p^+ Si เล็ก ๆ ที่ด้านหลังของเซลล์ กระบวนการดังกล่าวต้องพึ่งพาเทคนิคการสร้างลวดลายด้วยแสงหรือเรียกว่า Photolithography ซึ่งประกอบด้วยหลายขั้นตอนที่ซับซ้อน การสร้างช่องเปิดบริเวณชั้นพาสซีเวชันและสร้างบริเวณ p^+ Si นั้นสามารถลดพฤติกรรมการสูญเสียทางอิเล็กทรอนิกส์สำคัญคือลดความเร็วของการรวมตัวใหม่ของพาหะข้างน้อยเป็นผลให้ค่า V_{oc} ของเซลล์ดังกล่าวมีค่าสูงขึ้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์สูงขึ้น รูปที่ 1 แสดงการนำกฎของ Liebig มาปรับใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อพิจารณาถึงปัจจัยของการสูญเสียพลังงานในเซลล์ เราพบว่า การสูญเสียมากที่สุดนั้นเนื่องจากเกิดความเร็วของการรวมตัวใหม่สูงที่บริเวณผิวโดยเฉพาะที่ด้านหลังของเซลล์ (rear surface recombination)



รูปที่ 1.2 กฎของ Liebig สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน

เมื่อต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์จำเป็นต้องลดความเร็วของการรวมตัวใหม่ของพาหะข้างน้อย (Minority carriers) ที่ผิวนั้นทำได้โดยหลักการของพาสซีเวชันที่ผิว (Surface passivation) ให้มีประสิทธิภาพสูง ถึงแม้ว่าการทำพาสซีเวชันที่ผิวจะสามารถให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงเข้าใกล้ค่าจำกัดสูงสุดของเซลล์ชนิดซิลิคอนก็ตาม แต่กระบวนการผลิตก็ยังต้องพึ่งพาเทคโนโลยีของ Photolithography และเลเซอร์ ซึ่งมีขั้นตอนซับซ้อนและยุ่งยาก ส่งผลให้มีต้นทุนการผลิตที่สูงมาก แม้ว่าจุดประสงค์หลักของการใช้ Photolithography นั้นไม่ได้มุ่งไปสู่การทำลวดลายที่มีขนาดเล็กก็ตาม

ดังนั้นเทคนิคการฉีดสารละลาย (Ink-jet printing) จึงเป็นเทคนิคทางเลือกใหม่ไม่เพียงเป็นเทคนิคที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ ใช้เวลาน้อย แล้วยังสามารถพัฒนาได้ลวดลายที่คมชัด สม่าเสมอ สะดวก และรวดเร็ว ใช้วัสดุสารละลายที่สามารถสังเคราะห์เองได้ หรือสารละลาย resist ทัวไปปริมาณน้อยกว่า ไม่เหลือทิ้ง อีกทั้งยังมีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถบูรณาการองค์ความรู้ของการพัฒนาใช้เทคนิคการฉีดไปสู่กระบวนการผลิตเซลล์ในเชิงพาณิชย์ได้ในอนาคต เทคนิค ink jetting ยังสามารถฉีดสารละลายสร้างลวดลายได้หลายชั้นซึ่งหลักการใหม่นี้มีความเหมาะสมสำหรับการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ฟิล์มบางให้สะดวก และง่ายขึ้นทั้งในระดับวิจัย และพัฒนาจนสามารถนำไปใช้ได้เชิงพาณิชย์ สำหรับในการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการมี

งานวิจัยไม่มากนัก ยกตัวอย่างเช่นได้มีการวิจัยและพัฒนาเครื่องพิมพ์แบบฉีดสำหรับการผลิตอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ [K.F. Teng, et. al., 1987] [H.Sirringhaus, et. al., 2001] อุปกรณ์โครงสร้างอิสระขนาดเล็ก [X.L. Zhao, et. al., 2002][R. Noguera et. al., 2005] ไดโอดเปล่งแสงชนิดพอลิเมอร์ฟิล์มบาง [T. R. Hebner, et. al., 1998] [S. Magdassi, et. al., 2001] และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดพอลิเมอร์ [S. H. Eom, et. al., 2008] อีกทั้งมีการเริ่มนำเทคนิค ink jetting มาใช้ในกระบวนการทำลวดลายด้วยการเปิดช่องของชั้นสารกึ่งตัวนำในเซลล์แสงอาทิตย์ [A. J. Lennon, et. al., 2008] และมีผลการวิจัยที่นำกระบวนการ ink jetting มาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIGS (Copper Indium Gallium DiSelenide) [V. Kapur, et. al., 2008] อีกด้วย

สำหรับโครงการวิจัยนี้มีแนวคิดนำเครื่องพิมพ์แบบ ink-jet มาดัดแปลงเพื่อสามารถฉีดสารละลายไวแสงลงบนฐานของแข็งเรียบอย่างแผ่นซิลิคอนได้ภายใต้การสั่งงานผ่านระบบการพิมพ์ของคอมพิวเตอร์ และได้ศึกษาการผลิตรอยต่อ p-n จากวิธี Spin on Dopant (SOD) ด้วยการสังเคราะห์สารละลายฟอสฟอรัสในรูปของ sol-gel เพื่อสร้างฟิล์มบางฟอสฟอซิลิเกต (Phosphosilicate, PSG) ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating technique) และผ่านกระบวนการแพร์ซิมที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ได้รอยต่อ p-n ในที่สุด ในส่วนแรกของการวิจัยนี้ได้พิจารณาเทคโนโลยีการฉีดของเครื่องพิมพ์แบบ DOD (Drop on demand) หรือหยดออกจากหัวฉีดได้ตามต้องการ โดยได้มุ่งเน้นการใช้สารละลายไวแสง (resist) แทนน้ำหมึกพิมพ์ทั่วไป ซึ่งจะนำไปเป็นส่วนสำคัญของกระบวนการทำช่องเปิดไดโอดอิเล็กทรอนิกส์เพื่อเป็นพาสซีเวชันที่ผิวในรูปแบบหลักการเฉพาะตัวร่วมกับหลักการสกัดผิวด้วยสารละลาย จากหลักการดังกล่าวจะให้ประโยชน์ในส่วนของการผลิต ที่ง่ายขึ้น และรวดเร็วขึ้น ลดต้นทุนได้มากเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีการผลิตที่ใช้กันในปัจจุบัน อีกทั้งการศึกษานี้จะเป็นองค์ความรู้พื้นฐานที่สำคัญสำหรับวิศวกรรมเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปสู่การพัฒนาใช้งานได้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 สนับสนุนการวิจัยด้านพลังงานหมุนเวียนจากการวิจัยและพัฒนาปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนด้วยเทคนิคที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ เพื่อเพิ่มความเข้มแข็งด้านการวิจัยพลังงานในประเทศ

1.2.2 เพื่อหาแนวทางการนำเทคโนโลยี Ink-jetting ที่ต้นทุนต่ำมาใช้ในกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง

1.2.3 เพิ่มขีดความสามารถการวิจัยด้านเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อก้าวสู่นวัตกรรมทางวิศวกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบแผนใหม่

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษากระบวนการทำลวดลายช่องเปิดไดอิเล็กทริกที่เหมาะสมสำหรับจุดสัมผัสออกไซด์เพื่อสร้างชั้นพาสซีเวชันให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์
- 1.3.2 สร้างชั้นพาสซีเวชันที่ผิวด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิค Ink-jetting
- 1.3.3 ศึกษาวิธีและทำการทดสอบคุณภาพของชั้นพาสซีเวชันที่สร้างขึ้น

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

ศึกษาการดัดแปลงเครื่องพิมพ์แบบฉีด และการสร้างชั้นรอยต่อ p-n ด้วยวิธี Spin on Dopant (SOD)

- 1.4.1 ศึกษาหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติม เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินโครงการจากหนังสือวารสารวิชาการ สิทธิบัตร และเอกสารต่างๆที่เกี่ยวข้อง (literature survey)
- 1.4.2 ศึกษาแบบแผนของการดัดแปลงเครื่องพิมพ์แบบฉีดกับแผ่นฐานรองซิลิคอน เช่นชุดสเตปมอเตอร์ แผ่นรองรับชิ้นงาน เป็นต้น
- 1.4.3 ศึกษาการสังเคราะห์สารละลายฟอสฟอรัสในรูปของ sol-gel เพื่อสร้างฟิล์มบางฟอสฟอซิลิเกต (Phosphosilicate, PSG) ด้วยเทคนิคการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating technique)

สังเคราะห์ P sol-gel และผลิตฟิล์ม PSG สำหรับกระบวนการ Thermal diffusion และทดสอบวัดสมบัติความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น n-Si ที่ได้

- 1.4.4 สังเคราะห์สารละลายฟอสฟอรัสในรูปของ sol-gel ในเงื่อนไขความเข้มข้นของกรด Phosphoric เพื่อควบคุมปริมาณอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสได้ตามต้องการ
- 1.4.5 ผลิตฟิล์มบาง PSG จากสาร P sol-gel ด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง เพื่อให้เป็นแหล่งของสารเจือในกระบวนการแพร่ด้วยความร้อนต่อไป
- 1.4.6 แพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการ Thermal diffusion เพื่อให้ก่อตัวเป็นชั้น n-Si ภายใต้การศึกษาในเงื่อนไข annealing ฟิล์มที่อุณหภูมิต่าง ๆ และระยะเวลาการแพร่ต่างๆ ในสภาวะก๊าซเฉื่อย N_2
- 1.4.7 เมื่อได้ชั้น n-Si ภายใต้การศึกษาในเงื่อนไขข้างต้นแล้วทำการทดสอบวัดสมบัติความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น n-Si ที่ได้ เพื่อหาระดับที่เหมาะสมสำหรับผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

สังเคราะห์ Silica sol-gel และผลิตฟิล์ม SiO_2 เพื่อเป็นชั้นไดอิเล็กทริกพาสซีเวชันด้านหลัง และทดสอบวัดสมบัติโครงสร้างทางเคมี และทางแสง

1.4.8 สังเคราะห์ฟิล์มบาง SiO_2 จากสารตั้งต้นหลักของสาร TEOS และ EtOH ในรูปของ sol-gel และหาเงื่อนไขของ spinning rate เพื่อให้ฟิล์มมีความหนาประมาณ 100 nm และให้โครงสร้างที่ดีภายใต้เงื่อนไขการอบที่เหมาะสม

1.4.9 วัดและวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี และสมบัติทางแสงของฟิล์ม SiO_2

เปิดช่องเล็ก ๆ บนชั้น SiO_2 ด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีดที่ดัดแปลง และทำการแพร์ซึม p^+ selective ที่ด้านหลังเซลล์

1.4.10 เคลือบฟิล์มพอลิเมอร์ไวแสงบนชั้น SiO_2 และทดสอบการฉีดสารละลายอะซิโตนลงบนฟิล์มในเงื่อนไขจำนวนการฉีดซ้ำเพื่อตรวจสอบขนาดของช่องเปิดเพื่อให้เห็นบริเวณผิว SiO_2 และสกัด SiO_2 ในบริเวณดังกล่าว

1.4.11 เมื่อได้ช่องเปิดบนชั้น SiO_2 แล้วทำการแพร์ซึม p^+ selective ด้วยวิธีการ Aluminum alloy เพื่อให้อะตอม Al แพร์ซึมลงบริเวณช่องเปิดไปยังแผ่นฐานชนิด p-Si

ทดสอบประสิทธิภาพ และสรุปผลการทดลอง

1.4.12 ทดสอบวัด Life time ของพาหะในเซลล์ต้นแบบ และนำผลที่วัดได้ไปจำลองผลทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม PC1D เพื่อหาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบที่ประกอบด้วยชั้นพาสซีวเวชันด้านหลัง และ p^+ selective

14.12 สรุปและรวบรวมเขียนรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 ได้องค์ความรู้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบ p^+ Selective ด้วยวิธีผลิตต้นทุนต่ำ ทำให้ก้าวทันต่อเทคโนโลยีที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ เนื่องจากลดกระบวนการผลิตที่ซับซ้อนจาก Photolithography และ Laser processing สามารถนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ได้ และสามารถแข่งขันในตลาดโลกได้

1.5.2 เผยงานในรูปแบบบทความในระดับชาติและวารสารทางวิชาการในระดับนานาชาติ

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

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

บทที่ 2

การปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยชั้นพาสซีเวชัน

2.1 บทนำ

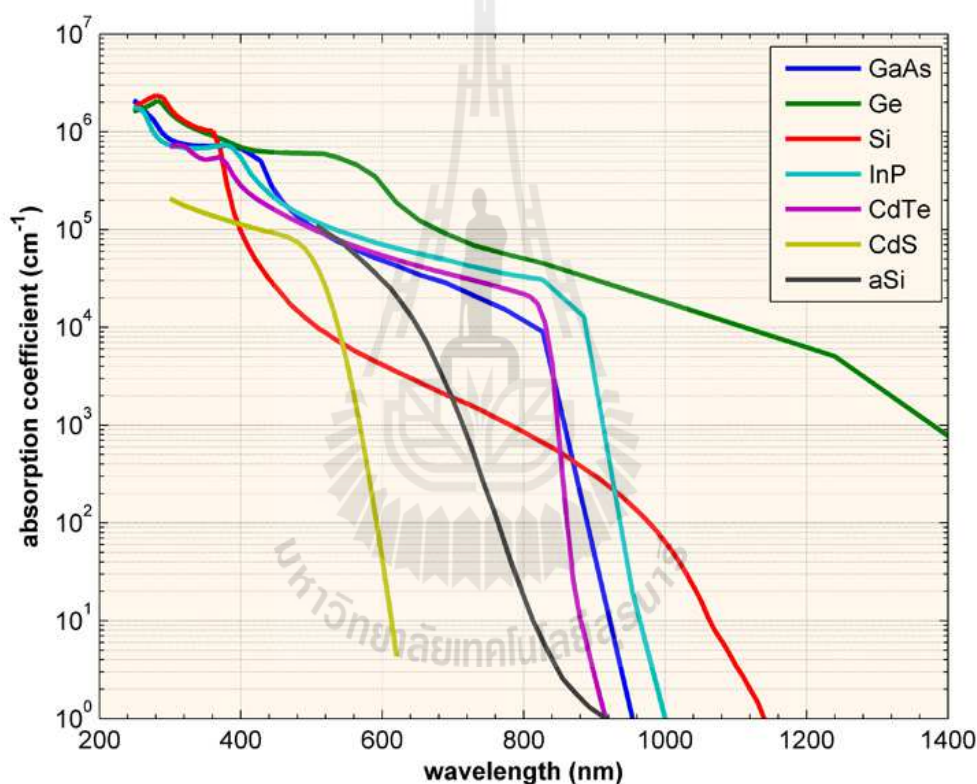
พลังงานโฟตอน (Photon) จากแสง หรือควอนตา (Quanta) มีสมบัติเป็นทั้งคลื่นและอนุภาคนั้นสามารถแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยตรงนั้น เนื่องจากเกิดปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) ที่รอยต่อ p-n ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ ในการศึกษาจะกล่าวถึงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำซิลิคอน ซึ่งเป็นธาตุหมู่ 4 เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีมากบนโลกเรา อย่างไรก็ตามเนื่องจากซิลิคอนยังเป็นวัสดุหลักของวงจรรวมอิเล็กทรอนิกส์ในอุปกรณ์ประมวลผลต่าง ๆ ซึ่งทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในพื้นที่ขนาดเล็ก หรือสามารถจุจำนวนทรานซิสเตอร์ได้มากถึงหลักสิบล้านตัวต่อพื้นที่หนึ่งตารางเซนติเมตร ($10^8/\text{cm}^2$) ในปัจจุบันเรียกว่าเทคโนโลยีวงจรรวมแบบ Ultra large scale integration (ULSI) เป็นเหตุทำให้ IC chip นั้นมีมูลค่าสูงต่อหน่วยปริมาณของซิลิคอน ส่งผลให้เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งที่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนมีราคาต่อวัตต์ที่สูงประมาณ US\$3.50/W หรือราคาประมาณ US\$150/m² ดังนั้นวิธีให้ได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานมีค่าเข้าใกล้ 31% ที่เป็นข้อจำกัดทางทฤษฎีของเซลล์ซิลิคอนหนึ่งรอยต่อจึงมีการศึกษาอย่างกว้างขวาง โดยพิจารณาการสูญเสียที่เกิดขึ้นในโลกการแปลงพลังงานภายในเซลล์แสงอาทิตย์

2.2 คุณสมบัติของวัสดุที่มีผลต่อการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากวัสดุสารกึ่งตัวนำที่โครงสร้างรอยต่อ p-n นั้นมีสมบัติการดูดกลืนพลังงานแสงที่เรียกว่าพลังงานโฟตอน จากการพิสูจน์ทางทฤษฎีของไอส์ไตน์กล่าวว่าสมบัติของแสงเป็นได้ทั้งคลื่น (wave) และอนุภาค (particles) ดังนั้นเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ภายใต้สภาวะได้รับแสงสว่างตกลงที่ผิว แต่จะมีเพียงช่วงแถบของแสงบางช่วงความยาวคลื่นเท่านั้นที่เป็นประโยชน์ต่อการแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ นั่นคือช่วงย่านความยาวคลื่นที่ให้พลังงานโฟตอนมีค่ามากกว่าแถบพลังงานช่องว่าง (Energy band gap, E_g) ของเซลล์สารกึ่งตัวนำชนิดนั้น เซลล์แสงอาทิตย์จึงสามารถดูดกลืนแสงที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับ E_g ได้ และพลังงานนี้จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระเคลื่อนที่ส่งผลให้ได้กระแสไฟฟ้า และขณะเดียวกันที่บริเวณรอยต่อจะมีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้น ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ให้พลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เมื่อนำโพลมาต่อเข้าโดยตรงจะเกิดการจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้กับโหลด เมื่อต้องการให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นจำเป็นต้องเข้าใจกลไกทางไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตพาหะอิเล็กตรอน-โฮลที่กระตุ้นจากแสง กระบวนการผลิตพาหะเหล่านี้ขึ้นอยู่กับสมบัติทางแสง และอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่นำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ เช่นสมบัติการดูดกลืนแสง การผลิตพาหะ การรวมตัวใหม่ของพาหะ เป็นต้น

2.2.1 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบรอยต่อ p-n พื้นที่กว้าง และมีบริเวณรอยต่อชั้นในระดับไมโครเกิน 1 μm เพื่อให้แสงที่ตกกระทบผิวเซลล์ได้ถูกดูดกลืนไปถึงบริเวณรอยต่อ p-n และแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ตามกลไกอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุสารกึ่งตัวนำ ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์ในเบื้องต้นย่อมเกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient, α) ที่ช่วงความยาวคลื่นแสงต่าง ๆ ของวัสดุสารกึ่งตัวนำต่างชนิด แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.1 [ข้อมูลจาก <http://pveducation.org/pvcdrom>]



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ช่วงความยาวคลื่นแสงต่าง ๆ ของวัสดุสารกึ่งตัวนำต่างชนิด

จากกราฟบนแสดงให้เห็นว่าวัสดุสารกึ่งตัวนำจะสามารถดูดกลืนแสงที่พลังงานโฟตอนของแสงระดับใด ๆ จำเป็นต้องมีค่ามากกว่าแถบพลังงานช่องว่าง (band gap, E_g) ของวัสดุนั้น และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจะไม่ใช่ค่าคงที่แต่จะเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นของแสง เมื่อโฟตอนแสงที่ระดับพลังงานเข้าใกล้ E_g ของวัสดุนั้นจะเกิดการดูดกลืนแสงต่ำ เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ขอบพลังงานวาเลนซ์ได้รับ

การกระตุ้นจากโฟตอนที่มีค่าใกล้เคียงกับ E_g เป็นเหตุให้เกิดการดูดกลืนแสง ดังนั้นที่ขอบค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ตัดบนแกน y นั้นสามารถบ่งบอกถึงความยาวคลื่นแสงที่แถบพลังงาน E_g ของวัสดุนั้น ๆ

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของวัสดุนั้นสัมพันธ์โดยตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การสูญหายของแสง (k) แสดงดังสมการที่ (2.1)

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2.1)$$

โดยที่ λ คือความยาวคลื่นแสง หน่วย m ถ้า λ เป็นหน่วย nm ต้องนำ 10^7 ไปคูณกับพจน์ด้านขวา

k คือค่าสัมประสิทธิ์การสูญหายของแสง (Extinction coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงนอกจากสัมพันธ์กับความยาวคลื่นและค่าสัมประสิทธิ์การสูญหายทางแสงแล้วยังมีความเกี่ยวข้องกับระยะความลึกของวัสดุด้วย ในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นคลื่นแสงสีน้ำเงินมีพลังงานโฟตอนสูง ความยาวคลื่นสั้นกว่าแสงสีแดงจึงสามารถดูดกลืนแสงได้บริเวณผิวหรือความลึกระยะสั้นไม่เกิน $1 \mu\text{m}$ ก็ไม่โครเมตรจากผิวเท่านั้น ตรงข้ามกับคลื่นแสงสีแดงมีพลังงานโฟตอนต่ำ ความยาวคลื่นยาวสามารถดูดกลืนแสงตลอดความลึกของแผ่นเซลล์ได้ในระดับถึงหลักร้อยไมโครเมตร ค่าพลังงานโฟตอน ในหน่วย eV มีความสัมพันธ์ผกผันกับค่าความยาวคลื่น λ ในหน่วย μm แสดงดังสมการที่ (2.2)

$$E(\text{eV}) = \frac{1.24}{\lambda(\mu\text{m})} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.2 การดูดกลืนแสงสีน้ำเงินที่เกิดขึ้นใกล้ผิวเซลล์ ส่วนแสงสีแดงเกิดขึ้นที่ระยะลึกลงไป

2.2.2 อัตราการผลิตคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล (Generation Rate)

จากการดูดกลืนแสงของวัสดุในบริเวณต่าง ๆ นั้นจะเกิดอัตราการผลิตคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล (Generation rate, G) ขึ้นซึ่งบ่งบอกถึงการให้คู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล ต่อหน่วยปริมาตร ที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณของเซลล์แสงอาทิตย์ การผลิตพาหะนี้เป็นปัจจัยที่สำคัญมากอย่างหนึ่งสำหรับการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้ายังไม่พิจารณาผลของการสะท้อนกลับ (Reflection) แล้วปริมาณของแสงที่ถูกดูดกลืนในวัสดุใด ๆ จะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (α หน่วย cm^{-1}) และความหนาของวัสดุบริเวณที่ดูดกลืนได้ ความเข้มแสง (Light intensity, I) ที่วัสดุดูดกลืนได้ที่ระยะใด ๆ (X) ย่อมมีค่าน้อยในพจน์ของเอกโปเนนเชียลเมื่อเทียบกับความเข้มแสงที่ผิววัสดุ (I_0) แสดงดังสมการที่ (2.3)

$$I = I_0 e^{-\alpha X} \quad (2.3)$$

โดยที่ α คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสงใด ๆ หน่วย cm^{-1}

I_0 คือความเข้มแสงบนผิววัสดุ

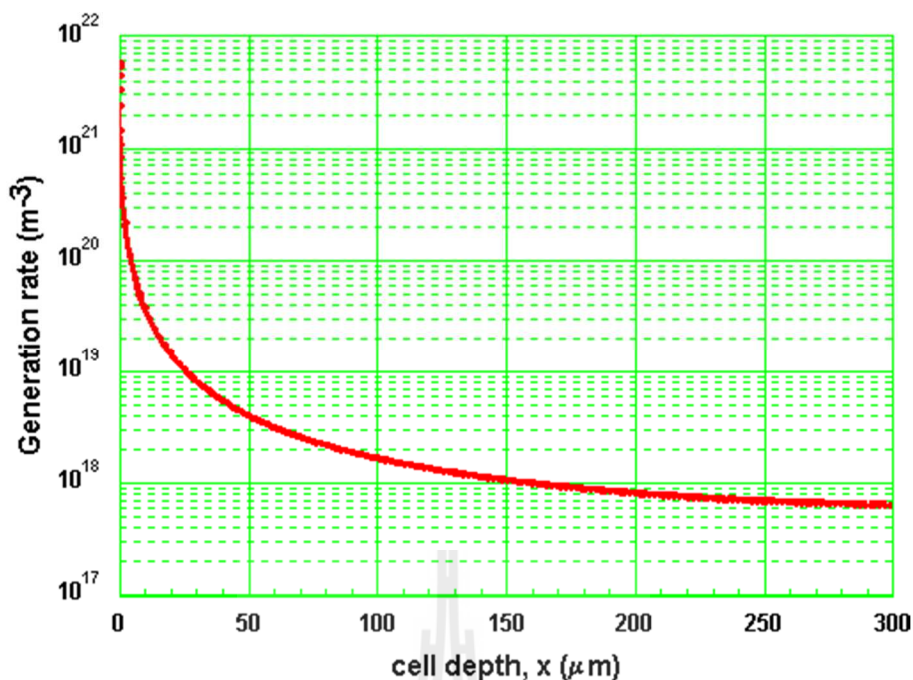
X คือระยะความลึกของวัสดุที่พิจารณาหาค่าความเข้มแสง (I)

สมการที่ (2.3) สามารถนำไปคำนวณหาจำนวนพาหะอิเล็กตรอน-โฮลที่ผลิตขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าสมมติให้การสูญเสียของความเข้มแสงเป็นเหตุโดยตรงต่อการผลิตพาหะ แล้วอัตราการผลิตพาหะ G ในแผ่นซิลิคอนบาง ๆ หาได้จากการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ดังนั้นทำ differentiating ในสมการที่ (2.3) จะได้สมการความสัมพันธ์ของค่า G ที่จุดใด ๆ ดังสมการที่ (2.4)

$$G = \alpha N_0 e^{-\alpha X} \quad (2.4)$$

โดยที่ N_0 คือโฟตอนฟลักซ์ที่ตกกระทบผิว หน่วย photons/unit-area/sec.)

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่าอัตราการผลิตพาหะ G นั้นมีค่าสูงสุดที่ผิวของวัสดุ และจะลดลงในพจน์ของเอกโปเนนเชียลและมีค่าต่างกันที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน สำหรับกรณีเซลล์แสงอาทิตย์นั้นแสงที่ตกกระทบลงมาจะประกอบไปด้วยการรวมกันของความยาวคลื่นต่าง ๆ และอัตราการผลิตพาหะที่แต่ละความยาวคลื่นก็จะให้ค่าที่ต่าง ๆ กัน ดังนั้นค่าสุทธิของอัตราการผลิตพาหะคือผลรวมของการผลิตพาหะในแต่ละความยาวคลื่นและอยู่ในฟังก์ชันของระยะความลึกจากผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยผิวด้านบนของเซลล์ที่ $0 \mu\text{m}$ เป็นบริเวณที่แสงสีน้ำเงินพลังงานสูงสามารถถูกดูดกลืนได้ ดังนั้นความหนาของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนจึงไม่จำเป็นต้องเกิน $300 \mu\text{m}$ มากนัก แสดงกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปที่



รูปที่ 2.3 อัตราการผลิตพาหะอิเล็กตรอน-โฮลในวัสดุซิลิคอนที่อยู่ในฟังก์ชันของระยะความลึกจากผิวของเซลล์แสงอาทิตย์

2.2.3 อัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะข้างน้อย (Recombination Rate)

เมื่อพาหะที่ได้รับการกระตุ้นนั้นเคลื่อนที่ได้อิสระในสถานะ Meta-stable แต่สภาวะแวดล้อมนั้นย่อมมีปัจจัยต่าง ๆ ส่งผลให้เกิดสภาวะไม่สมดุลทำให้อิเล็กตรอนที่ได้รับการกระตุ้นเหล่านี้ตกกลับลงไปในระดับพลังงานวาเลนซ์ที่ต่ำกว่าซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ให้สภาวะเสถียรภาพที่สุด และไปแทนที่พาหะโฮลเป็นอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ กระบวนการนี้เรียกว่าการรวมตัวใหม่ของพาหะ (Recombination) ค่าอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะ (R) และอัตราการผลิตพาหะมีความสัมพันธ์ที่แสดงในสมการที่ (2.5) เซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถให้กระแสไฟฟ้าที่สูงจำเป็นต้องรวบรวมพาหะอิเล็กตรอน-โฮลที่ผลิตได้ไปยังขั้วไฟฟ้าแอโนด และคาโทดให้มากที่สุดก่อนจะเกิดการรวมตัวใหม่ของพาหะขึ้น

$$R = 1 - G \quad (2.5)$$

การเกิดกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะจัดว่าเป็นการสูญเสียการผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลให้เกิดกลไกการรวมตัวใหม่ที่แตกต่างกันได้ในวัสดุผลึกเดี่ยวสารกึ่งตัวนำ สามารถแบ่งเป็น 3 ชนิดดังนี้

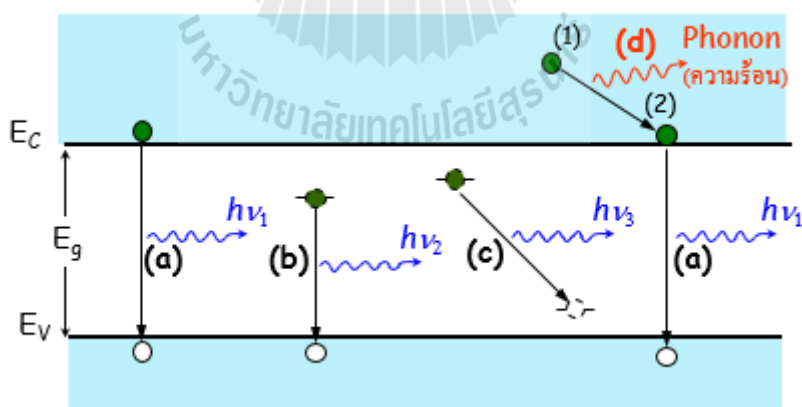
1. การรวมตัวใหม่แบบเปล่งแสง (Radiative recombination) หรือเรียกว่า Band-to-band recombination เป็นกลไกหลักของการรวมตัวที่เกิดขึ้นในวัสดุผลึกสารกึ่งตัวนำแบบตรง (direct band gap semiconductor) กระบวนการนี้มี 2 ขั้นตอนหลัก ๆ คือ

- เมื่ออิเล็กตรอนที่ได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอกและขึ้นไปอยู่บนระดับพลังงานคอนดักชัน และสามารถเคลื่อนที่ได้ในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ จะเกิดความไม่เสถียรภาพขึ้นจึงเกิดการรวมตัวโดยตรงกับพาหะโฮลที่ระดับพลังงานต่ำกว่าที่วาเลนซ์

- ขณะที่อิเล็กตรอนตกกลับมารวมตัวกับโฮลที่ระดับวาเลนซ์ อิเล็กตรอนจะปล่อยโฟตอนออกมาที่มีระดับพลังงานเท่ากับความแตกต่างของพลังงานระหว่างระดับคอนดักชันกับวาเลนซ์ หรือเท่ากับ E_g นั้นเอง

Band-to-band recombination เป็นกระบวนการทำงานหลักของไดโอดเปล่งแสง (Light emitting diode, LED) แสดงกลไกดังรูปที่ 2.4 (a) แต่จะเป็นกระบวนการสูญเสียหลักของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่ใช้ในอวกาศ หรือชนิดรวมแสง เนื่องจากเซลล์ผลิตจากวัสดุผลึกสารกึ่งตัวนำแบบตรง เช่น GaAs ในทางตรงข้าม Radiative recombination สามารถหลีกเลี่ยงได้เมื่อพิจารณาถึงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้บนโลก เนื่องจากเป็นชนิดผลึกสารกึ่งตัวนำแบบไม่ตรง (Indirect band gap semiconductor) เช่น Si

Radiative recombination เป็นการเปล่งแสงที่มีพลังงานโฟตอนปล่อยออกมาเท่ากับผลต่างของระดับอิเล็กตรอนกับระดับโฮล ในกรณีที่เกิดแบบ (a)-(c) มีชื่อเรียกสั้น ๆ ว่า Luminescence ในกรณีของ สิ่งประดิษฐ์ LED ที่ใช้ไฟฟ้าเป็นแหล่งกระตุ้นเพื่อให้เกิด luminescence เราเรียกว่า Electro-Luminescence กระบวนการรวมตัวแบบเปล่งแสงมีลักษณะตรงข้ามกับการดูดกลืนแสงทุกประการ



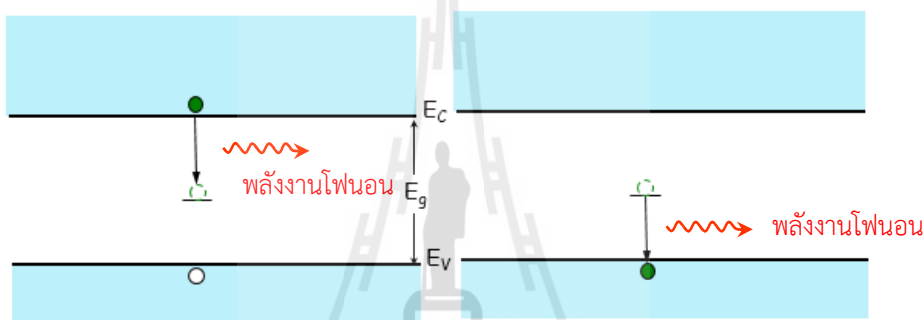
รูปที่ 2.4 การรวมตัวใหม่แบบเปล่งแสงของสารกึ่งตัวนำแบบ direct band gap

2. การรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นที่จุดบกพร่อง (Recombination through defects) หรือเรียกว่า Shockley-Read-Hall (SRH) จะพบได้กับวัสดุที่มีโครงสร้างไม่สมบูรณ์พบได้ทั้งภายในวัสดุและที่บริเวณผิวสัมผัส กรณีดังกล่าวจะเกิดเป็นสถานะดักจับ (Trapping level) เกิดขึ้นในระหว่างกลาง (Mid-gap) ของ

ย่านพลังงานปลอดพาหะ (Forbidden region) ซึ่งเกิดมาจากการมีจุดบกพร่อง (Defects) ในโครงผลึก (Crystal lattice) ทั้งที่เกิดขึ้นอย่างไม่ตั้งใจ หรือเกิดจากการเติมอะตอมสารเจือปนในวัสดุ สถานะดักจับนี้จะดักจับพาหะอิเล็กตรอนในชั้นคอนดักชันขณะเกิดการรวมตัวใหม่ หรือดักจับอิเล็กตรอนชั้นวาเลนซ์ที่จะขึ้นไปยังระดับพลังงานที่สูงกว่า รูปที่ 2.5 แสดง กระบวนการ SRH Recombination เกิดขึ้นได้ 2 ขั้นตอนคือ

- อิเล็กตรอนในชั้นพลังงานคอนดักชันตกกลับไปยังสถานะดักจับ (Trapping level) และปล่อยคายพลังงานอาจอยู่ในรูปของโฟตอน หรือโฟนอนความร้อน การปล่อยพลังงานชนิดโฟตอนที่จะเป็นประโยชน์ต่อเซลล์แสงอาทิตย์นำไปใช้มีประสิทธิภาพในรูปโฟตอนจะเกิดเมื่อสถานะดักจับอยู่บริเวณกึ่งกลางของ Forbidden band

- อิเล็กตรอนถูกดักจับในบริเวณ Forbidden band เคลื่อนที่ไปรวมตัวกับโฮลที่ชั้นพลังงานวาเลนซ์ และปล่อยคายพลังงานอีกครั้งซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับเท่ากับค่าความต่างของระดับขอบพลังงานทั้งสอง

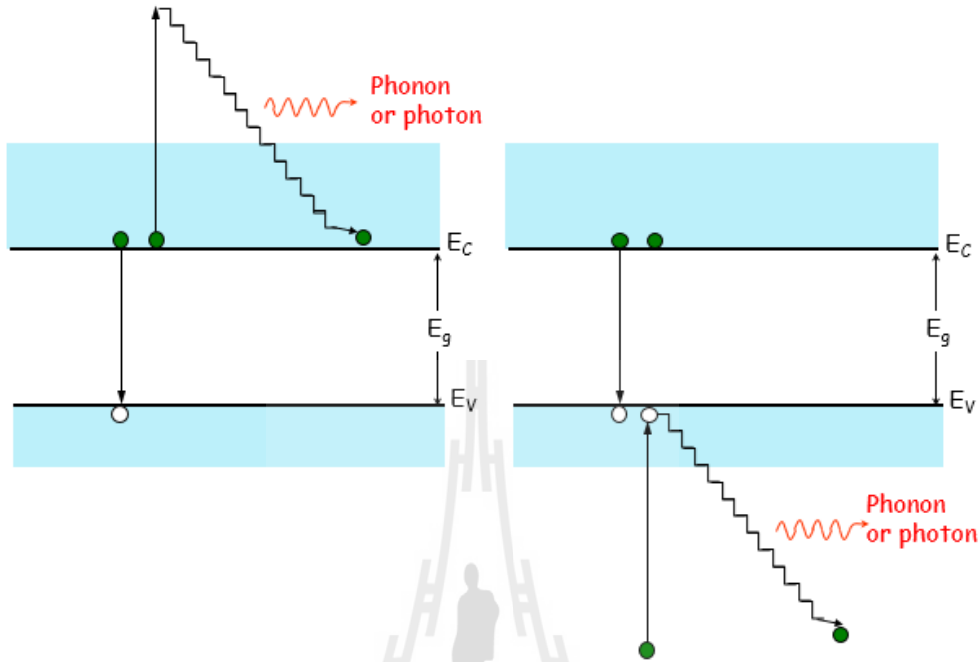


รูปที่ 2.5 กลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นที่ Mid-gap

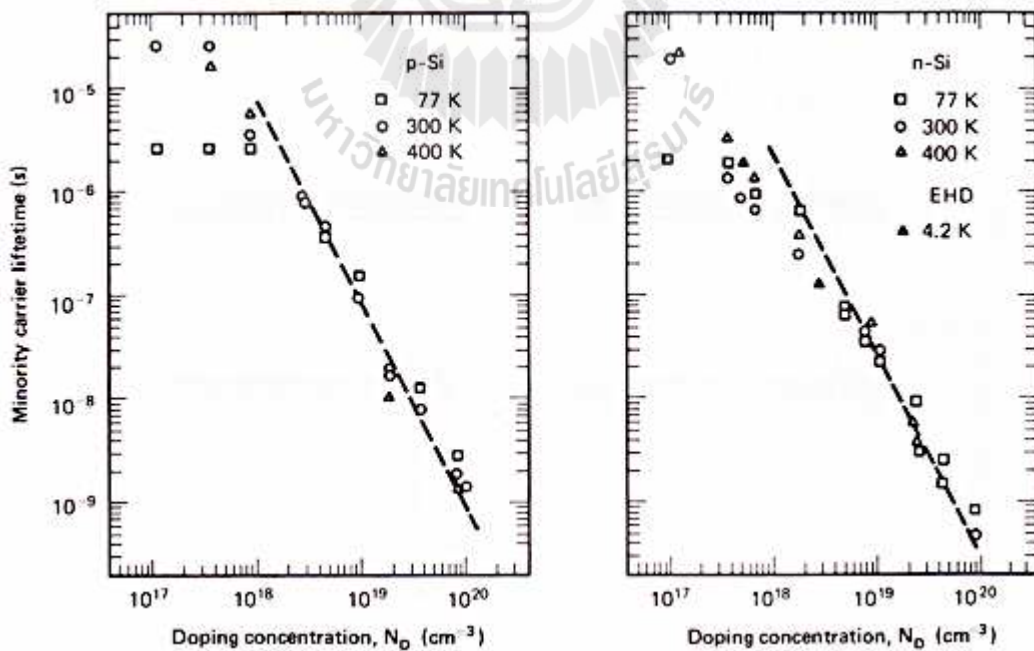
3. การรวมตัวใหม่แบบ Auger (Auger Recombination) ที่เรียกว่า “อ-เซ” ซึ่งเกี่ยวข้องกับพาหะ 3 ตัวโดยที่อิเล็กตรอนตัวหนึ่งที่ชั้นพลังงานคอนดักชันเกิดการรวมตัวใหม่กับโฮลที่ชั้นพลังงานวาเลนซ์ พลังงานที่ปล่อยออกมาในกระบวนการแทนที่จะเป็นการปล่อยแสง (Emitting light) กลับเป็นพลังงานส่วนเกิน (Excess energy) ไปกระตุ้นให้พาหะข้างเคียงที่สามารถเกิดได้ทั้งกรณีอิเล็กตรอนตัวที่สองข้างเคียง หรือโฮลตัวที่สองข้างเคียงที่จะได้พลังงานส่วนเกินนี้ ทำให้พาหะนี้เคลื่อนที่ไปยังระดับพลังงานชั้นในของคอนดักชัน และของวาเลนซ์ หลังจากนั้นจะคายพลังงานความร้อนหรือโฟตอนกลับไปยังขอบพลังงานเริ่มแรก กลไกดังกล่าวแสดงรูปที่ 2.6

Auger recombination มีอิทธิพลมากที่สุดกับวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีความหนาแน่นของสารเจือสูงเนื่องจากการเติมอะตอมสารเจือสูงมาก (Heavy doping) หรือเกิดการฉีดพาหะในระดับปริมาณสูงภายใต้ความเข้มแสงสูง ๆ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน Auger recombination มีส่วนเกี่ยวข้องโดยจะไปจำกัดค่าช่วงชีวิต (Lifetime) ของพาหะในวัสดุนั้นเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่น ๆ จากข้อมูลของ J. Dziewior และ W. Schmid (1977) ที่ได้จากการทดลองแสดงในรูปที่ 2.7 บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของค่า Lifetime กับการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสารเจือในวัสดุซิลิคอนคุณภาพสูง ซึ่งพบว่า

Lifetime มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วที่ความเข้มข้นสูง ๆ เนื่องจากผลของ Auger recombination ดังรูปกราฟที่ 2.7



รูปที่ 2.6 กลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะด้วยปรากฏการณ์ของ Auger Recombination



รูปที่ 2.7 ค่าช่วงชีวิตของพาหะชนิด Minority ก่อนเกิดการรวมตัวใหม่ในผลึกซิลิคอนคุณภาพสูง (a) p-type Si และ (b) n-type Si

2.2.4 ค่าช่วงชีวิตของพาหะ (Lifetime of Carriers)

กรณีที่มีพลังงานแสงเป็นพลังงานภายนอกตกกระทบผิวเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้บริเวณที่สามารถดูดกลืนแสงนั้นเกิดการกระตุ้นให้มีปริมาณของพาหะข้างน้อย (Minority carrier) มีค่าสูงขึ้นเกินกว่าระดับสมดุล พาหะข้างน้อยส่วนเกินเหล่านี้ (Excess minority carriers) จะเสื่อมกลับไปยังระดับสมดุลที่ระดับความเข้มข้นพาหะเดิมด้วยกระบวนการรวมตัวใหม่ ค่าอัตราการรวมตัวใหม่ (R) จึงเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และขึ้นอยู่กับปริมาณของพาหะส่วนเกินนั้น เช่นถ้าไม่มีพาหะส่วนเกินขึ้นแสดงว่าค่า R จะต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ ขณะเดียวกันค่าช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยและความยาวในการแพร่ของพาหะข้างน้อย (Minority carrier diffusion length) ก็ยังเป็นตัวแปรสองตัวที่มีความสำคัญต่อค่าอัตราการรวมตัวใหม่ ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดของตัวแปรทั้งสองดังนี้

ค่าช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อยนั้นของวัสดุชนิดหนึ่งได้นิยามด้วยสัญลักษณ์ τ_n หรือ τ_p แสดงถึงค่าเวลาเฉลี่ยที่พาหะตัวหนึ่งที่ได้รับการกระตุ้นและใช้เวลาอยู่ที่สถานะกระตุ้นหลังการผลิต electron-hole จนกระทั่งมันกลับไปรวมตัวใหม่ ส่วนใหญ่เราอาจจะเรียกสั้น ๆ ว่า “ค่าช่วงชีวิต (lifetime)” ซิลิคอนเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มี lifetime ที่ยาวซึ่งแสดงว่าพาหะข้างน้อยที่ผลิตในเนื้อวัสดุ (bulk) ด้วยพลังงานแสงหรืออื่น ๆ นั้นจะยังอยู่ในระยะเวลาหนึ่งก่อนจะกลับไปรวมตัวใหม่ ค่า Lifetime นี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัสดุ ถ้าแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ทำจากวัสดุที่มีค่า Lifetime ที่ยาวหรือสูงเท่าใด ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์นั้นก็จะมีมากขึ้น

วัสดุที่มีระดับการฉีดต่ำ (Low level injected material) หมายถึงการเกิดจำนวนพาหะข้างน้อยซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าพาหะจากสารเจือ (พาหะข้างมาก) ในวัสดุนั้นแล้วค่า Lifetime สามารถแสดงความสัมพันธ์กับอัตราการรวมตัวใหม่ได้ดังสมการที่

$$\tau = \frac{\Delta n}{R} \quad (2.6)$$

โดยที่ τ คือค่าช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อย

Δn คือความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยส่วนเกิน

R คืออัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะ

ค่า Lifetime สุทธิของเนื้อวัสดุ (τ_{Bulk}) ประกอบด้วย Lifetime ชนิดต่าง ๆ กันตามลักษณะที่แตกต่างกันของกระบวนการรวมตัวใหม่ทั้ง 3 ชนิด ดังนั้น τ_{Bulk} สามารถแสดงในสมการที่ (2.7)

$$\frac{1}{\tau_{Bulk}} = \frac{1}{\tau_{Band}} + \frac{1}{\tau_{SHR}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} \quad (2.7)$$

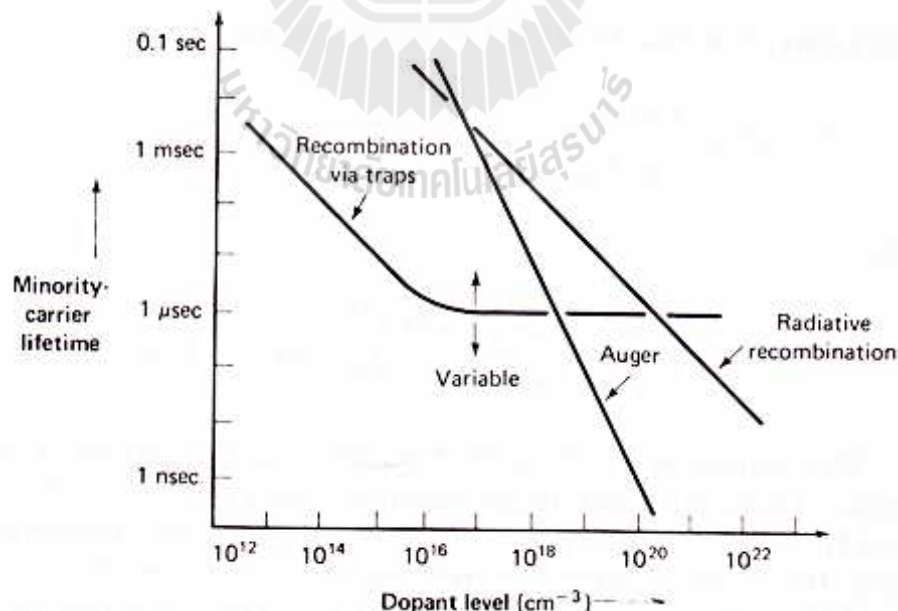
โดยที่ τ_{Band} คือ Lifetime ของพาหะข้างน้อยที่ก่อนเกิด Band-band recombination
 τ_{SHR} คือ lifetime ของพาหะข้างน้อยที่ก่อนเกิด Recombination through traps
 τ_{Auger} คือ lifetime ของพาหะข้างน้อยที่ก่อนเกิด Auger recombination

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

$$\tau_{\text{Auger}} = \frac{1}{CN_A^2} \quad (2.8)$$

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

ในการพิจารณาเลือกวัสดุสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ ค่า Lifetime ที่สูงของวัสดุนั้นจะเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพที่ดีของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากวัสดุนั้น จากการทดลองของ J. Dziewior และ W. Schmid (1977) จะเห็นว่าระดับสารเจือสูงเกินกว่า 10^{17} cm^{-3} จะเกิดอัตราการรวมตัวใหม่สูงมากขึ้นในแผ่นวัสดุผลึกซิลิคอนคุณภาพดี ดังนั้นการเลือกใช้แผ่นฐานซิลิคอนชนิด p หรือ n ควรให้สารเจือไม่สูงมีค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะระหว่าง $1 - 10 \ \Omega \cdot \text{cm}$



รูปที่ 2.8 ระดับของอะตอมสารเจือในแผ่นฐานซิลิคอนที่มีผลช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อย โดยพิจารณากระบวนการรวมตัวใหม่ทั้ง 3 แบบ

2.2.5 ความยาวการแพร่ของพาหะ (Diffusion Length)

แผ่นฐานเซลล์แสงอาทิตย์เป็นวัสดุซิลิคอนที่มีปริมาณแพร่สารเจืออย่างสม่ำเสมอจากกระบวนการหลอมละลาย ระดับการแพร่สารเจือที่ใช้ต้องพิจารณาให้เหมาะสมมีมาตรฐาน เพื่อให้ได้กระแสลัดวงจร (I_{sc}) จากเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงสุดที่ระดับความลึกของรอยต่อค่าหนึ่ง ตัวแปรของวัสดุที่มีความสำคัญอีกค่าหนึ่งคือความยาวในการแพร่ (Diffusion Length) ของพาหะข้างน้อยในวัสดุแผ่นฐาน หมายถึงระยะการเดินทางเฉลี่ยของพาหะตั้งแต่มีการผลิตขึ้นจนกระทั่งเกิดการรวมตัวใหม่ ซึ่งค่า Diffusion Length นั้นมีความเกี่ยวข้องใกล้เคียงกับค่าความน่าจะเป็นในการรวบรวมพาหะ (Collection probability) ในการหาค่าอย่างเบื้องต้นจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าช่วงชีวิตแสดงในสมการที่ (2.9)

$$L_e = \sqrt{D_e \tau_e} \quad , \quad L_h = \sqrt{D_h \tau_h} \quad (2.9)$$

โดยที่ L_e และ L_h คือความยาวในการแพร่ของพาหะอิเล็กตรอนที่ได้รับการกระตุ้น และโฮลที่เกิดขึ้นตามลำดับ

D_e และ D_h คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะอิเล็กตรอน และโฮล ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $0.02586\mu_e$ และ $0.02586\mu_h$ ตามลำดับ

μ_e และ μ_h คือความคล่องตัวของพาหะอิเล็กตรอน และโฮล ตามลำดับ ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

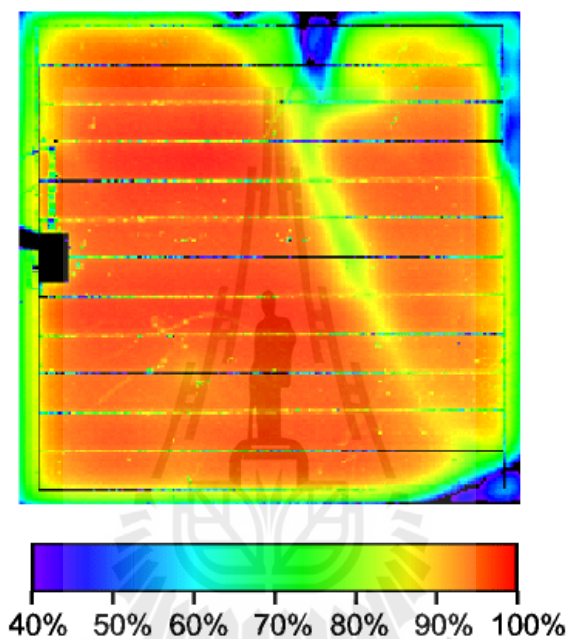
$$\mu_e = 65 + \frac{1265}{1 + (N/8.5 \times 10^{16})^{0.72}} \quad \text{cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s} \quad (2.10)$$

$$\mu_h = 47.7 + \frac{447.3}{1 + (N/6.3 \times 10^{16})^{0.72}} \quad \text{cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$$

โดยที่ N คือระดับของความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ หน่วย cm^{-3}

โดยทั่วไปในซิลิคอนค่า $\mu_e \leq 1350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ และ $\mu_h \leq 480 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ สำหรับสารกึ่งนำใด ๆ ที่มีปริมาณสารเจือสูงขึ้นแล้วระยะการแพร่ของพาหะจะสั้นลงเช่นกัน ในกรณีวัสดุเป็นผลึกเดี่ยว ค่า Diffusion Length ของพาหะที่ผลิตจากพลังงานแสงจะมีค่าเกือบคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง แต่ถ้าเซลล์แสงอาทิตย์จากผลึกหลายรูป (Multi-crystalline solar cell) จะมีค่า Diffusion Length ที่แตกต่างกันในบริเวณพื้นที่ต่าง ๆ เพราะมีพื้นที่ของขอบเขตของเกรนผลึก (Grain boundaries) ในเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกหลายรูป รูปที่ 2.9 แสดงแถบสีของเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกซิลิคอนหลายรูปแบบ PERL [ภาพจาก <http://pveducation.org/>] ซึ่งโครงสร้างได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ค่าเปอร์เซ็นต์แสดงถึงสัดส่วนของพาหะที่ได้รับการกระตุ้น (Light-generated carrier) ที่รวบรวมได้เทียบกับค่าที่แตกต่างจากบริเวณอื่น ๆ ทั้งค่า Lifetime และ Diffusion Length ต่างก็มีความสัมพันธ์ต่อชนิดและขนาดของอัตราการรวมใหม่ของ

พาหะ ในกรณีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่าง ๆ การเกิด SHR recombination จัดว่าเป็นกลไกหลักที่เกิดขึ้นในเซลล์ อัตราการรวมตัวใหม่ชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับจำนวนจุดบกพร่อง (Defect) ที่มีอยู่ในวัสดุ ดังนั้นการเติมสารเจือในวัสดุสารกึ่งตัวนำก็เป็นผลต่อการเพิ่มขึ้นของจุดบกพร่องในเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเช่นกัน แม้กระนั้นการเติมสารเจือสูงมากกลไกหลักของการรวมตัวใหม่จะเป็น Auger recombination จะเห็นได้ว่าวิธีที่ใช้ในการผลิตแผ่นสารกึ่งตัวนำ และกระบวนการผลิตนั้นก่อให้เกิดผลกระทบหลักต่อ Diffusion Length ดังนั้นการเลือกชนิดของวัสดุแผ่นฐานและปริมาณสารเจือของแผ่นฐานเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมนั้นเป็นสิ่งสำคัญต่อประสิทธิภาพเซลล์



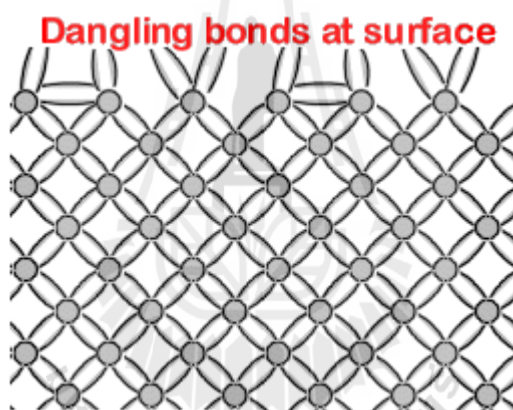
รูปที่ 2.9 แถบสีของของเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกซิลิคอนหลายรูปแบบ PERC กับค่าเปอร์เซ็นต์ของสัดส่วนปริมาณพาหะที่ได้รับการกระตุ้น และรวบรวมได้เทียบกับค่าที่แตกต่างกันจากบริเวณอื่น ๆ

2.2.6 การรวมตัวใหม่ที่ผิว (Surface Recombination)

นอกเหนือจากกลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะและสาเหตุของการเกิดกลไกที่ต่างกันไปแล้ว ดังที่กล่าวไว้ในตอนที่ 2.2.2 โดยประกอบด้วยเหตุของการมีสารเจือ และจุดบกพร่องเป็นหลักจากทำให้โครงสร้างการเกาะเกี่ยวพันธะเสียรูปทรงในโครงผลึก (Disrupted crystal lattice) บริเวณจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นที่มีผลอย่างมากต่อการรวมตัวใหม่ของพาหะคือที่บริเวณผิวเพราะเซลล์แสงอาทิตย์ โดยผิวของเซลล์ที่เกิดจุดบกพร่องสูงเกิดได้ทั้งที่ผิวด้านบนเซลล์ที่เรียกว่าชั้นอิมิตเตอร์ (Emitter layer) และด้านหลังเซลล์ อย่างไรก็ตามที่แผ่นฐานรองหรือเรียกว่าชั้นเบส (Base layer) ก็สามารถเกิดการรวมตัวใหม่ของพาหะในเนื้อสาร (Bulk recombination) ได้เช่นกันถ้าเลือกใช้วัสดุแผ่นฐานที่ไม่มีคุณภาพ

อัตราการรวมตัวใหม่ที่ผิวสามารถจำกัดค่าได้จากการลดอัตราการเคลื่อนที่ของพาหะที่จะเดินทางไปยังผิวของวัสดุ ตัวแปรอีกตัวที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์คือ ค่าความเร็วในการรวมตัวใหม่ (Surface recombination velocity) ในหน่วย cm/sec ซึ่งใช้เป็นตัวกำหนดพาหะที่เกิดการรวมตัวใหม่ที่ผิว ถ้าไม่เกิดการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิวเลย นั้นแสดงว่าการเคลื่อนที่ของพาหะข้างน้อยไปยังผิวเป็นศูนย์ และทำให้ค่าความเร็วในการรวมตัวใหม่ก็จะมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่กรณีทั่วไปของวัสดุสารกึ่งตัวนำแล้วการเคลื่อนที่ของพาหะไปยังผิวจะถูกจำกัดด้วยค่าความเร็วของพาหะที่สูงที่สุดที่ทำได้มีค่าประมาณ 1×10^7 cm/sec.

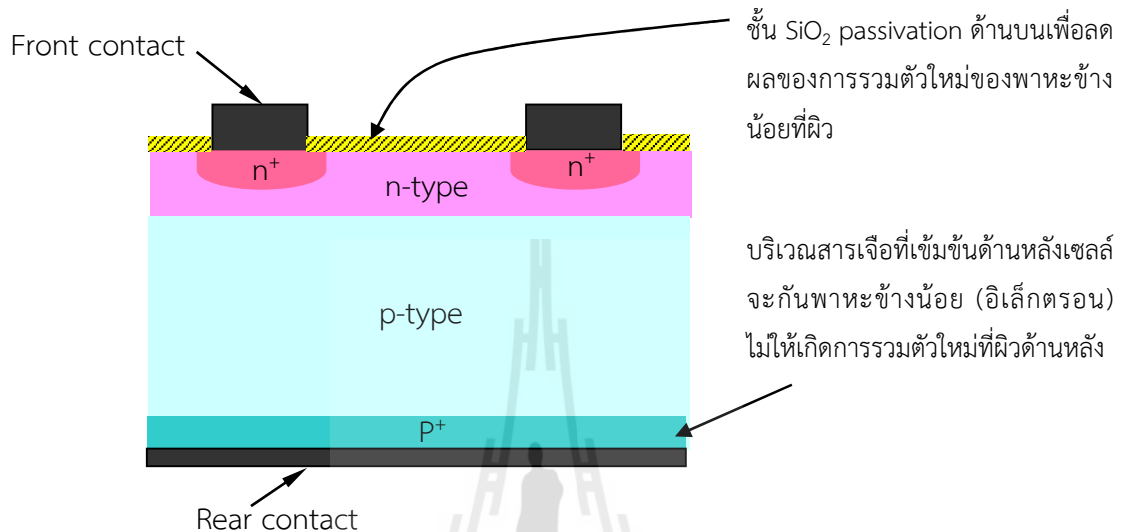
จุดบกพร่องที่ผิวของสารกึ่งตัวนำเป็นผลมาจากการขัดจังหวะการเรียงลำดับของโครงผลึก ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดพันธะแขวนขาด (Dangling bond) ที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ แสดงดังรูปที่ 2.10 [ภาพจาก <http://pveducation.org/>] การลดลงของพันธะแขวนขาดก็จะทำให้การรวมตัวใหม่ที่ผิวลดลงด้วย สามารถทำได้โดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางที่ผิวให้เกิดการผูกต่อกับพันธะแขวนขาดที่ผิว การทำให้พันธะแขวนขาดลดลงนั้นเรียกว่าวิธีการพาสซีเวชันที่ผิว (Surface passivation) หรือการมี Passivating layer



รูปที่ 2.10 พันธะแขวนขาดที่ผิวของวัสดุ

ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นิยมผลิตชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ด้วยกระบวนการออกซิเดชันทางความร้อนเพื่อเป็น Passivating layer ลดสถานะจุดบกพร่อง (Defect state) ที่รอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำกับโลหะ แต่การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในอุตสาหกรรมทั่วไปนิยมใช้ชั้นไดอิเล็กทริกอย่างซิลิคอนไนไตรด์ (Silicon nitride) แต่ในบริเวณใด ๆ ที่ต้องการให้รอยสัมผัสมีสมบัติแบบโอห์มมิก (Ohmic contact) จะไม่มีส่วนของ SiO_2 แม้กระนั้นที่บริเวณใต้ขั้วไฟฟ้าด้านบนนั้นเราสามารถลดผลของการรวมตัวใหม่ที่ผิวของพาหะข้างน้อยได้โดยให้บริเวณดังกล่าวมีการเพิ่มสารเจือที่สูงขึ้นไปกว่าบริเวณอื่น จากที่เราทราบว่าบริเวณใดที่มีสารเจือเข้มข้นสูงจะทำให้ค่า Diffusion length ของพาหะข้างน้อยสั้นลง แต่บริเวณดังกล่าวอยู่ใต้ขั้วไฟฟ้าจะไม่มีพาหะที่ผลิตจากแสงตกกระทบบริเวณนั้น ดังนั้นจึงไม่เกิดผลกระทบต่อกระบวนการรวมพาหะมากนัก โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นไดอิเล็กทริกพาสซีเวชันด้านบนได้แสดงดังรูปที่

2.11 และการให้สารเจือที่เข้มข้นด้านหลังเซลล์จะกันพาหะข้างน้อย (อิเล็กตรอน) ไม่ให้เกิดการรวมตัวใหม่ที่ผิวด้านหลัง หรือเดินทางมายังด้านหลังเซลล์ได้เนื่องจากผลของความแตกต่างของการเติมสารเจือยอมทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ด้านหลัง (Back surface field, BSF) ขึ้น ซึ่งบริเวณรอยต่อ p/p⁺ จะเกิดอิทธิพลของประจุลบมากกว่าจึงผลักอิเล็กตรอนที่เป็นพาหะข้างน้อย



รูปที่ 2.11 เทคนิคการลดผลของการรวมตัวใหม่ที่ผิวของพาหะข้างน้อยในเซลล์แสงอาทิตย์

สนามไฟฟ้าด้านหลัง (BSF) ในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เกิดขึ้นจากความแตกต่างของสารเจือในบริเวณชั้น p พื้นฐาน บริเวณ BSF จะมีสารเจือที่เข้มข้นสูงกว่าในบริเวณบาง ๆ ที่ด้านหลังทำให้ทั้ง I_{sc} และ V_{oc} มีค่าเพิ่มขึ้นทั้งคู่จากแสงความยาวคลื่นยาวเกิดพาหะอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.3 การผลิตกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าเมื่อแสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์

กลไกการเกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าภายใต้แสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารกึ่งตัวนำรอยต่อ p-n ได้อธิบายในทอมของคณิตศาสตร์ซึ่งเกี่ยวข้องกับตัวแปรต่าง ๆ ในสมบัติของวัสดุตั้งที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2 เงื่อนไขทางคณิตศาสตร์ได้พิจารณาในกรณีอุดมคติที่เกิดอัตราการผลิตคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล มาจากแสงที่กระทบอย่างทั่วถึงตลอดเซลล์ และแสงที่ตกกระทบก็ให้สอดคล้องกับค่าจำเพาะทางฟิสิกส์ของเซลล์ โดยแสงที่ตกกระทบนั้นมีความยาวคลื่นยาวที่ประกอบด้วยพลังงานโฟตอนมีค่าเข้าใกล้กับค่า E_g ของสารกึ่งตัวนำนั้น อีกทั้งปริมาณการผลิตคู่พาหะประมาณให้คงที่ตลอดระยะทางที่มีการดูดกลืนแสงในวัสดุ อย่างไรก็ตามกรณีของการผลิตพาหะอย่างสม่ำเสมอจะไม่ถูกต้องทั้งหมดกับกรณีของ

การแปลงพลังงานได้จริงจากเซลล์แสงอาทิตย์ กรณีที่มีความถูกต้องมากขึ้นจำเป็นต้องใช้วิธีที่แตกต่างกัน และเพิ่มปัจจัยหรือตัวแปรอื่น ๆ ที่มาเกี่ยวข้องซึ่งจะกล่าวไว้ในหัวข้อต่อไป

2.3.1 คุณสมบัติกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-n เชิงอุดมคติ

เมื่อพิจารณาไดโอดกับคุณลักษณะของกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำรอยต่อ p-n ทางอุดมคติ ในกรณีที่มีแสงตกกระทบ และมีอัตราการผลิตพาหะ G คงที่เท่ากันตลอดในอุปกรณ์ เมื่อพิจารณาว่ากระแสไฟฟ้าไหลในย่านปลอดพาหะที่รอยต่อเป็นอย่างทฤษฎีของสมการต่อเนื่อง (Continuity equations) ดังสมการ

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_e}{dx'} = R - G = -\frac{1}{q} \frac{dJ_h}{dx} \quad (2.11)$$

ด้าน p ระยะ x' ด้าน n ระยะ x

โดยที่ J_e คือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสุทธิจากพาหะอิเล็กตรอนทั้งหมดในด้าน p

J_h คือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสุทธิจากพาหะโฮลทั้งหมดในด้าน n

พิจารณาสมการต่อเนื่องในรูปของพาหะส่วนเกินแล้ว สมการที่ (2.11) แสดงได้ดัง (2.12) ส่วนด้าน p พิจารณาในทำนองเดียวกันที่ระยะ x'

$$\text{ด้าน } n\text{-type:} \quad \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} = \frac{\Delta p}{L_h^2} - \frac{G}{D_h} \quad (2.12)$$

โดยที่ Δp คือความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยส่วนเกิน ในกรณีด้าน n คือพาหะโฮล

G/D_h คือค่าคงที่ค่าหนึ่ง ภายใต้ภาวะส่องสว่าง

E_{Fn} คือระดับพลังงานกึ่งเฟอร์มี (quasi-Fermi level) ด้าน n

E_{Fp} คือระดับพลังงานกึ่งเฟอร์มีด้าน p

L_e คือระยะการแพร่ของพาหะข้างน้อย (Diffusion length) อิเล็กตรอน

L_h คือระยะการแพร่ของพาหะข้างน้อย (Diffusion length) โฮล

D_e คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะข้างน้อย (Diffusion coefficient) อิเล็กตรอน

D_h คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะข้างน้อย (Diffusion coefficient) โฮล

ค่า Δp ในกรณีที่มีผลของอัตราการเกิดคู่พาหะ (G) จะมีสมการเชิงอนุพันธ์อันดับ 2 คือ

$$\Delta p = G\tau_h + Ce^{x/L_h} + De^{-x/L_h} \quad (2.13)$$

โดยที่ $L_e = \sqrt{D_e\tau_e}$ $L_h = \sqrt{D_h\tau_h}$
 τ_e และ τ_h คือช่วงอายุพาหะข้างน้อย (life time) ของอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากแสงตกกระทบ
 จากสมการเงื่อนไขขอบเขตจะได้

$$\Delta p = G\tau_h + [p_{n0}(e^{qV/kT} - 1) - G\tau_h] \cdot e^{-x/L_h} \quad (2.14)$$

ดังนั้น

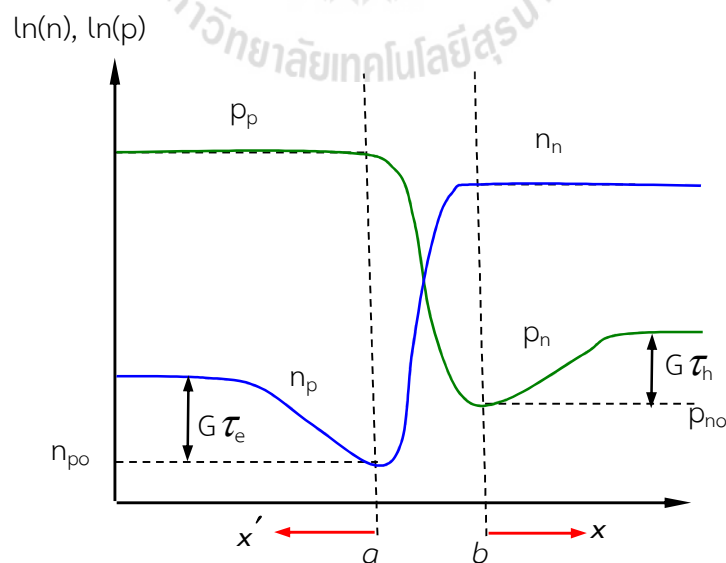
$$p_n(x) = p_{n0} + G\tau_h + [p_{n0}(e^{qV/kT} - 1) - G\tau_h] \cdot e^{-x/L_h} \quad (2.15)$$

ในทำนองเดียวกัน ทางด้าน p

$$n_p(x') = n_{p0} + G\tau_e + [n_{p0}(e^{qV/kT} - 1) - G\tau_e] \cdot e^{-x'/L_e} \quad (2.16)$$

โดยที่ $p_n(x)$ คือปริมาณพาหะข้างน้อยโฮลที่อยู่ด้าน n ที่ระยะ x ใด ๆ
 p_{n0} คือปริมาณพาหะข้างน้อยโฮลที่อยู่ด้าน n ที่สภาวะสมดุล
 $n_p(x)$ คือปริมาณพาหะข้างน้อยอิเล็กตรอนที่อยู่ด้าน p ที่ระยะ x ใด ๆ
 n_{p0} คือปริมาณพาหะข้างน้อยอิเล็กตรอนที่อยู่ด้าน p ที่สภาวะสมดุล

ในทำนองเดียวกันพาหะข้างน้อยอิเล็กตรอนทางด้าน p มีค่า $n_p(x')$ แสดงการหาสมการในลักษณะเดียวกันกับข้างต้นในสมการที่ (2.16) ซึ่งสมการทั้งสองแสดงความสัมพันธ์ด้วยกราฟ semi-log ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การกระจายตัวของปริมาณพาหะในสภาวะมีพลังงานแสงมากระตุ้น

จากสมการความสัมพันธ์ข้างต้น สมการค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลที่ด้าน n เนื่องจากพาหะโฮลแสดงสมการได้ดังนี้

$$J_h(x) = \frac{qD_n p_{n0}}{L_h} (e^{qV/kT} - 1) \cdot e^{-x/L_h} - qG\tau_h e^{-x/L_h} \quad (2.17)$$

ในทำนองเดียวกัน กระแสเนื่องจากพาหะอิเล็กตรอน $J_e(x')$ แสดงการหาสมการในลักษณะเดียวกัน

เมื่อตัดผลของการรวมตัวใหม่ในบริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อ p-n หรือ บริเวณ space charge แล้วพิจารณาเพียงผลของการผลิตพาหะในบริเวณดังกล่าว จากกรณีนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านบริเวณปลอดพาหะนี้แสดงดังสมการที่ (2.18) ที่ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ W คงที่แล้วผลของกระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของ G

$$|\delta J_e| = |\delta J_h| = qGW \quad (2.18)$$

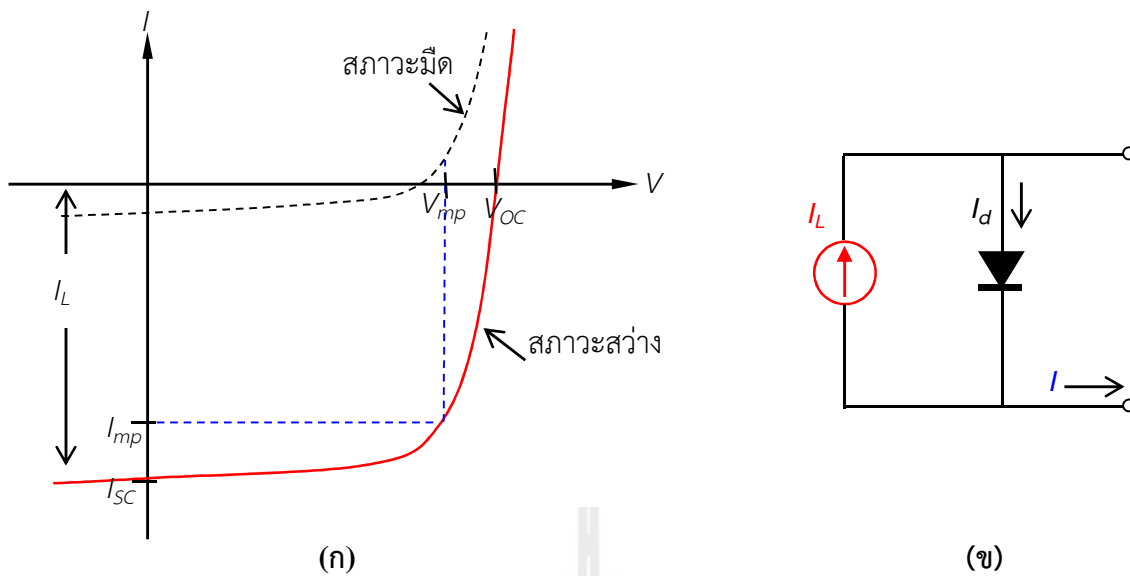
จากสมการ (2.17) กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-n ที่ได้รับแสงนั้น ประกอบไปด้วยกระแสไฟฟ้า 2 ส่วนคือกระแสเรกติไฟ์ลจากรอยต่อไดโอด และกระแสโฟตอน ดังนั้นสมการดังกล่าวเราสามารถแสดงลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันตกคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V characteristic) ได้ดังสมการที่ (2.19) และแสดงความสัมพันธ์ I-V ในควอดแดนท์ที่ 4 ของรูปที่ 2.13 (ก)

$$I = I_o (e^{qV/kT} - 1) - I_L \quad (2.19)$$

โดยที่ I_o คือกระแสไฟฟ้าอิ่มตัว (Saturation current) โดยแสดงความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.20)
 I_L คือกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากพลังงานโฟตอนตกกระทบพื้นที่รับแสง (A) ของเซลล์แสงอาทิตย์
 V คือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อ p-n
 kT/q คือแรงดันไฟฟ้าเชิงความร้อน (Thermal voltage)

$$I_L = qAG(L_e + W + L_h) \quad (2.20)$$

จากผลของพฤติกรรมทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปกราฟ I-V เราจึงแสดงในรูปของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าอุดมคติได้ในรูปที่ 2.13 (ข)



รูปที่ 2.13 คุณลักษณะ I-V ของไดโอดรอยต่อ $p-n$ ภายใต้สภาวะมืด และสภาวะได้รับแสงกระแสโฟตอน (I_L)

2.3.2 ตัวแปรต่าง ๆ ทางเอาต์พุทของเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อจำกัดของค่าเอาต์พุทของเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

1. กระแสลัดวงจร (Short circuit current: I_{sc}) เป็นค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ได้ขณะทำการลัดวงจรแก่เซลล์แสงอาทิตย์ ขณะแรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ ในทางอุดมคติเมื่อ $V = 0$ แล้ว $I_{sc} = I_L$ ดังนั้น I_{sc} จึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแสงแดดที่เซลล์นำไปใช้ประโยชน์ได้

2. แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open circuit voltage: V_{oc}) เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ได้ขณะเปิดวงจร กระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ ค่า V_{oc} มีค่าสูงขึ้นแบบลอการิทึมกับการเพิ่มขึ้นของแสงสว่าง คุณลักษณะนี้จึงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์เหมาะสมต่อการชาร์จประจุแบตเตอรี่ จากสมการกระแส (2.19) เมื่อกระแสไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อไดโอดจะเท่ากับ V_{oc} จะได้ว่า

$$\text{ที่ } I = 0 \quad V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_o} + 1\right) \quad (2.21)$$

จากความสัมพันธ์ของ V_{oc} เราพบว่าผลของการปรับเปลี่ยนค่ากระแสอิ่มตัว I_o ที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยนั้นส่งผลให้ค่า V_{oc} ลดลงอย่างมาก สาเหตุที่สำคัญอย่างหนึ่งที่สัมพันธ์กับ I_o คือค่าความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะข้างน้อยที่ผิว (surface recombination velocity) ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2.5 ถ้าความเร็วในการรวมตัวใหม่ที่ผิวมีค่าต่ำจะส่งผลให้ I_o มีค่าต่ำด้วย และ V_{oc} ก็จะมีค่าสูงขึ้นในที่สุด

3. จุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power point: P_{mp}) เมื่อทำการต่อโหลดไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ แล้วจะได้จุดบนเส้นกราฟ $I-V$ ต่าง ๆ กันแสดงดังกราฟรูปที่ 2.13 และค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดคือผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ค่าสูงสุด ที่โหลดค่าหนึ่ง แสดงสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$P_{mp} = I_{mp} V_{mp} \quad (2.22)$$

โดยที่ I_{mp} คือค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยังโหลดค่าหนึ่งและมีกำลังไฟฟ้าสูงสุด

V_{mp} คือค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายไปยังโหลดค่าหนึ่งและมีกำลังไฟฟ้าสูงสุด

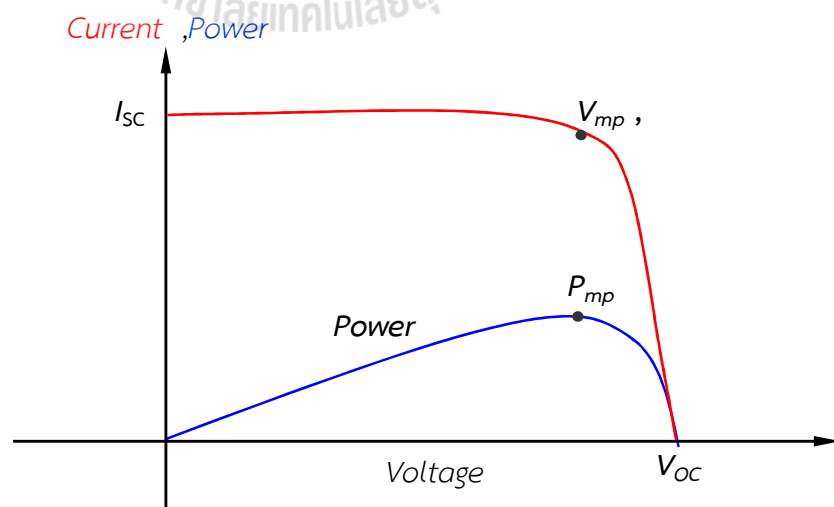
ผลคูณของ I_{mp} และ V_{mp} แสดงพื้นที่สี่เหลี่ยมใต้กราฟในรูปที่ 2.14 ที่แสดงกลับด้านมาอยู่ในควอดแดนท์ที่ 1

4. ฟิวแฟคเตอร์ (Fill factor : FF) เป็นตัวแปรตัวหนึ่งที่ได้จากการวัดเพื่อบ่งบอกถึงคุณภาพของรอยต่อ $p-n$ และแสดงถึงค่าต้านทานไฟฟ้าอนุกรมแฝง (parasite series resistance, R_s) และค่าความต้านทานไฟฟ้าขนานแฝงในเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ในสมการที่ 2.10 โดยที่ค่า FF เสมือนการบอกถึงความเป็นสี่เหลี่ยมของพื้นที่ใต้กราฟ ถ้าเส้นกราฟ $I-V$ มีรูปเป็นสี่เหลี่ยมมากขึ้นแสดงว่าค่า FF มีค่าเข้าใกล้ 1 และจะให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงขึ้น

$$FF = \frac{I_{mp} V_{mp}}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2.23)$$

ดังนั้น

$$P_{mp} = I_{mp} V_{mp} = I_{sc} V_{oc} FF \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.14 กราฟ $I-V$ ในควอดแดนท์ที่ 1 แสดงจุดกระแสลัดวงจร (I_{sc}) และแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) รวมถึงเส้นกราฟของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{mp})

5. ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Energy-conversion efficiency: η) คือค่าอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าอินพุตกับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ดังนั้นเราจะได้สมการเป็น

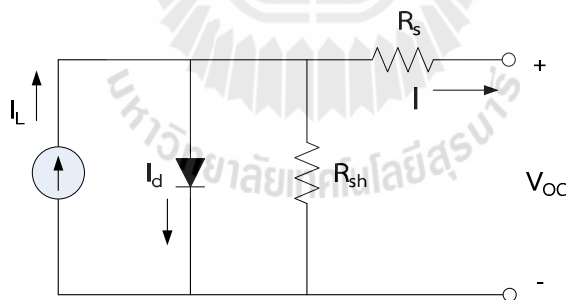
$$\eta = \frac{I_{mp} V_{mp}}{P_{in}} = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \quad (2.25)$$

โดยที่ P_{in} คือกำลังไฟฟ้าทั้งหมดของแสงที่ตกกระทบลงบนเซลล์ ภายใต้การกำหนดมาตรฐานของแสงแบบ AM1.5 นั้นมีค่าเท่ากับ 100 mW/cm^2 (1 kW/m^2)

รูปที่ 2.6 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบด้วยความต้านทานไฟฟ้าภายในแผงของความต้านทานอนุกรม (R_s) และความต้านทานขนาน (R_{sh}) ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าแผงเหล่านี้ของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ (I) ดังสมการที่ (2.26) เมื่อพิจารณากระแสตรงข้ามแสดงในควอดแดนซ์ที่ 1

$$I = I_L - I_o \exp\left[\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.26)$$

โดยที่ R_s คือค่าความต้านทานอนุกรมจากความต้านทานไฟฟ้าในวัสดุ และรอยสัมผัสที่ขั้วไฟฟ้า
 R_{sh} คือค่าความต้านทานขนานที่รอยต่อพี-เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่พิจารณาความต้านทานไฟฟ้าแผงภายใน

2.4 การสูญเสียของกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าจากกลไกการรวมตัวใหม่

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสารกึ่งตัวนำมีโครงสร้างรอยต่อ p-n จะมีแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร V_{oc} สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับ (I_o) ดังสมการที่ (2.21) ซึ่งค่า I_o จะมีค่าสูงขึ้นจากผลของการรวมตัวใหม่ของพาหะข้างน้อยที่มีมากขึ้น ทำให้เกิดการสูญเสียแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ในหัวข้อนี้จะพิจารณาในแต่ละบริเวณที่จะเกิดการสูญเสียทางไฟฟ้าเช่น แผ่นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์กับปริมาณสารเจือ สนาบไฟฟ้าที่

ด้านหลังเซลล์ (Back surface field: BSF) และชั้นอิมิตเตอร์ซึ่งเป็นชั้นด้านบนรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์กับข้อจำกัดต่าง ๆ

2.4.1 สารเจือในแผ่นฐานเซลล์แสงอาทิตย์

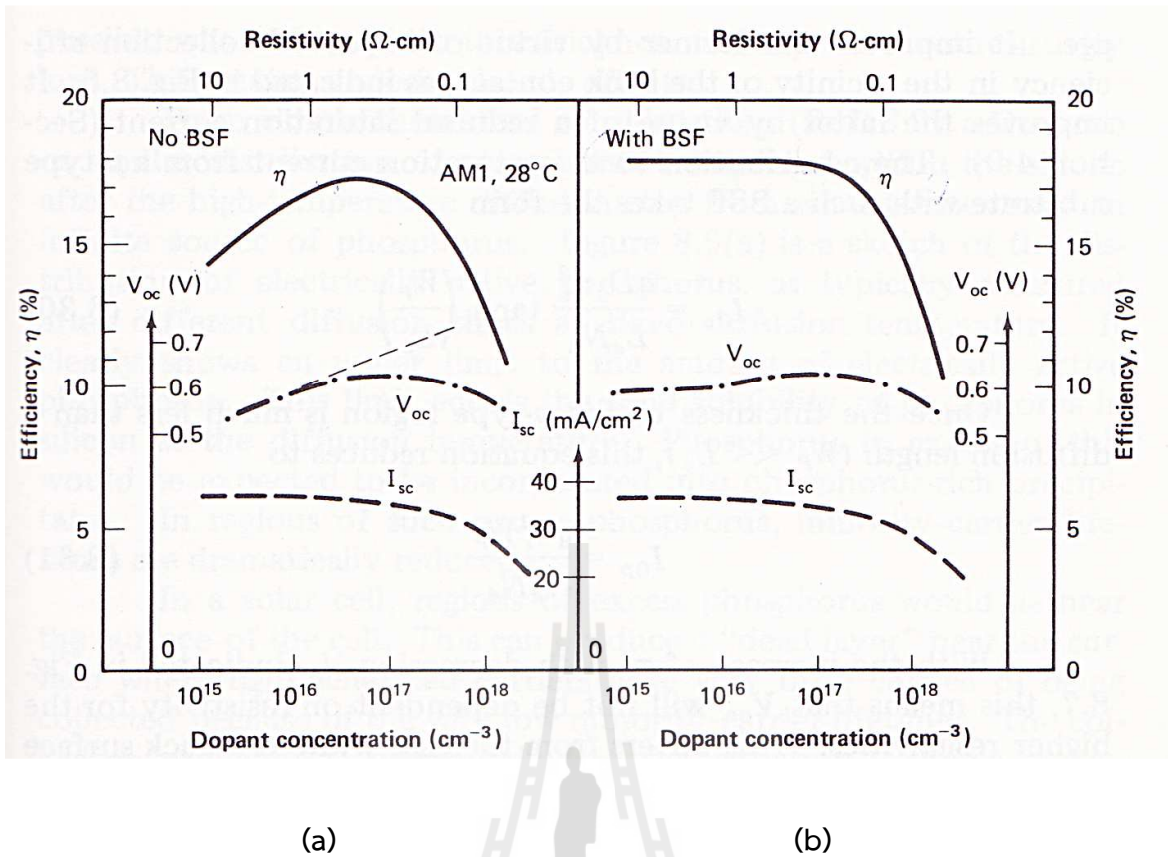
ปริมาณสารเจือในชั้นเบสของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแผ่นฐานนั้นส่งผลต่อค่า V_{oc} เนื่องจากการเติมสารเจือทำให้มีอัตราการรวมตัวใหม่สูงขึ้นทำให้ค่า I_{sc} ที่ได้จะมีแนวโน้มลดลงเมื่อระดับสารเจือในแผ่นซิลิคอนมีค่าสูง แต่ความเข้มข้นสารเจือของแผ่นฐานที่มีค่าสูงขึ้นนี้กลับทำให้แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) ที่จ่ายออกจากเซลล์อาทิตย์นั้นให้ค่าสูงขึ้น เนื่องจากมีประจุที่รอยต่อมากขึ้นและการลดลงของกระแสอิมิตวย้อนกลับ (I_0) ที่สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของสารเจือแสดงดังสมการที่ (2.26) ซึ่งถ้าค่า I_0 มีค่าน้อยลงแล้วจะได้ค่า V_{oc} มีค่าสูงขึ้น

$$I_0 = qA \left(\frac{D_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{D_h n_i^2}{L_h N_D} \right) \quad (2.27)$$

โดยที่ I_0 คือกระแสอิมิตวย้อนกลับของรอยต่อ p-n
 A คือพื้นที่รับแสงของรอยต่อ p-n
 n_i คือความหนาแน่นของ Intrinsic
 N_A คือความหนาแน่นของพาหะผู้รับ
 N_D คือความหนาแน่นของพาหะผู้ให้

จากสมการที่ (2.27) ดูเหมือนว่าถ้าให้ N_A และ N_D มีค่ามากเท่าใดก็คั้งจะให้ V_{oc} มีค่าสูงเท่านั้น แต่การเติมสารเจือผู้รับสูง ๆ หรือ N_A สูงให้กับแผ่นฐานชนิด p แล้วก็จะทำให้เกิดการรวมใหม่ของพาหะในแผ่นฐานสูง จะได้ I_{sc} น้อย หรือกรณีแพร่สารเจือผู้ให้สำหรับการเป็นชั้น n แล้ว เราต้องการให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่แผ่น (Sheet resistivity) มีค่าต่ำ โดยเจือสารให้ N_D ค่าสูง

เนื่องจากค่า V_{oc} และ I_{sc} มีแนวโน้มที่ตรงข้ามกันกับสารเจือผู้รับหรือค่า N_A ในกรณีใช้สารกึ่งตัวนำชนิด p เป็นแผ่นฐาน ทำให้เกิดการหาค่า N_A ที่เหมาะสมจุดหนึ่งที่จะให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงสุด จากที่กล่าวไว้มีความสอดคล้องตรงกันกับผลการทดสอบแสงอาทิตย์ [จากหนังสือ Solar Cells, M.A. Green, 1992] แสดงในรูปกราฟที่ 2.16 (a) แต่ค่า N_A ของแผ่นฐานรองซิลิคอนชนิด p มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยนั้นจะมีผลค่อนข้างสูงต่อการลดลงของค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ในกรณีที่ไม่มีความสัมพันธ์ที่ผิวด้านหลัง แต่เมื่อมีชั้นสนามไฟฟ้าที่ผิวด้านหลังแล้ว ค่า V_{oc} ปรับปรุงดีขึ้นทำให้มีช่วงค่าความเข้มข้นสารเจือของแผ่นฐานที่กว้างขึ้นที่สามารถนำใช้งานโดยที่ให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่เสถียรมากขึ้น แสดงในรูปกราฟที่ 2.16 (b)



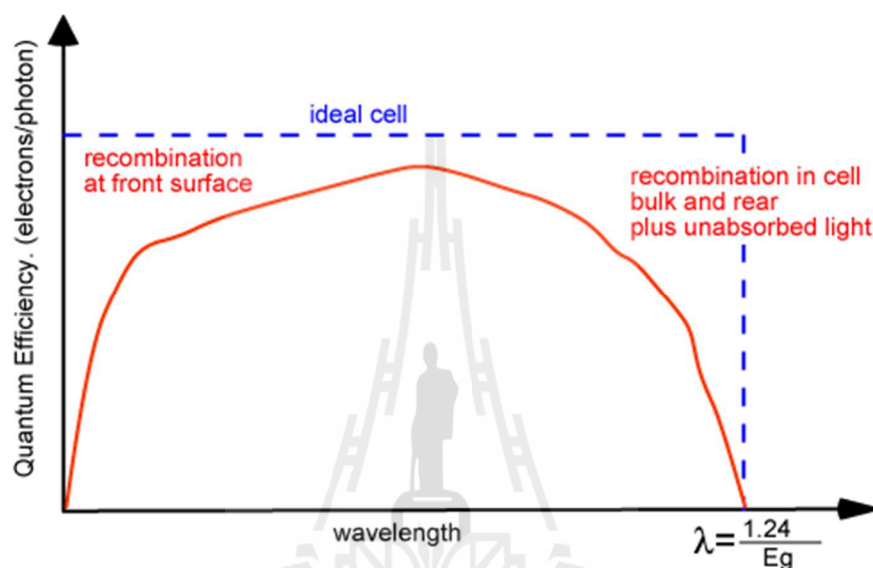
รูปที่ 2.16 ผลของปริมาณสารเจือปนฐานซิลิคอนชนิด p ที่มีต่อตัวแปรสำคัญของเซลล์ (a) ไม่มีสนามไฟฟ้าที่ผิวด้านหลัง (b) มีสนามไฟฟ้าที่ผิวด้านหลัง

2.4.2 การสูญเสียกระแสไฟฟ้าจากกลไกการรวมตัวใหม่

จากที่อธิบายไว้ข้างต้นสรุปได้ว่าการรวมตัวใหม่ของพาหะในเนื้อสารและที่ผิวนั้นส่งผลต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าลดผลของการรวมตัวใหม่ให้มีค่าน้อยเท่าใด เซลล์แสงอาทิตย์ก็สามารถรวบรวมพาหะที่ได้รับการกระตุ้นจากแสงได้มากเท่านั้นโดยเฉพาะที่รอยต่อ p-n ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนนั้นต้องการ 2 เงื่อนไขหลักที่จะเกิดการรวบรวมกระแสได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนี้

1. พาหะที่ผลิตได้มี Diffusion length ที่เพียงพอกับระยะทางที่ไปถึงรอยต่อ p-n ดังนั้นพาหะเหล่านั้นจะสามารถแพร่ไปถึงรอยต่อก่อนที่จะเกิดการรวมตัวใหม่
2. ในกรณีของบางจุดบริเวณที่มีการรวมตัวสูง เช่น ที่ผิวของวัสดุที่ยังไม่พาสซิเวชัน หรือที่ขอบเขตเกรนของผลึกโพลี พาหะที่ผลิตได้ที่เกิดขึ้นจะเข้าไปใกล้กับรอยต่อมากกว่าบริเวณจุดที่เกิดการรวมตัวใหม่ แต่พาหะที่ผลิตได้สามารถอยู่ใกล้กับบริเวณรวมตัวใหม่ ขณะที่ยังสามารถแพร่ข้ามรอยต่อและรวบรวมไปที่ขั้วไฟฟ้าโดยไม่มีการเกิดรวมตัวใหม่ ลักษณะนี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อมีการปรับปรุงโดยมีชั้นพาสซิเวชัน

พื้นที่ที่เกิดการรวมตัวใหม่ของพาหะจะเกิดขึ้นที่ผิวด้านหน้าและด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ นั้นหมายถึงว่าโฟตอนที่พลังงานระดับต่างๆ กันนั้นจะให้ค่าความเป็นไปได้ในการรวบรวมพาหะ (Collection Probabilities) ต่างกันเช่นกัน ประสิทธิภาพทางควอนตัม (Quantum Efficiency) ที่บ่งบอกถึงปริมาณของพาหะที่เกิดขึ้นต่อปริมาณโฟตอนหนึ่งหน่วยที่กระตุ้นนั้นก็แสดงค่าประสิทธิภาพที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับพลังงานโฟตอนหรือแสดงในรูปของความยาวคลื่น ดังรูปที่ 2.17 [ภาพจาก <http://pveducation.org/>]



รูปที่ 2.17 ผลกระทบของการสูญเสียทางแสงและทางกลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะที่มีต่อประสิทธิภาพทางควอนตัมทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ในแบบอุดมคติและแบบเป็นจริง

เมื่อพิจารณาแสงสีน้ำเงินที่มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูง และสามารถดูดกลืนได้ที่ผิวด้านบนของเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าที่ด้านหน้าเซลล์มีตำแหน่งของการรวมตัวใหม่ที่สูงแล้วพาหะข้างน้อยที่ถูกผลิตได้จะเป็นไปไม่ได้ที่จะมีการรวบรวมได้ที่รอยต่อ p-n เช่นเดียวกันกับการรวมตัวใหม่ที่ผิวด้านหลังจะมีผลต่อพาหะที่ผลิตได้ด้วยแสงอินฟราเรด ดังนั้นประสิทธิภาพทางควอนตัมของเซลล์แสงอาทิตย์ประเมินได้จากผลของการรวมตัวใหม่ของพาหะข้างน้อยที่มีผลต่อค่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากแสงนั่นเอง

2.4.3 การสูญเสียแรงดันไฟฟ้าจากกลไกการรวมตัวใหม่

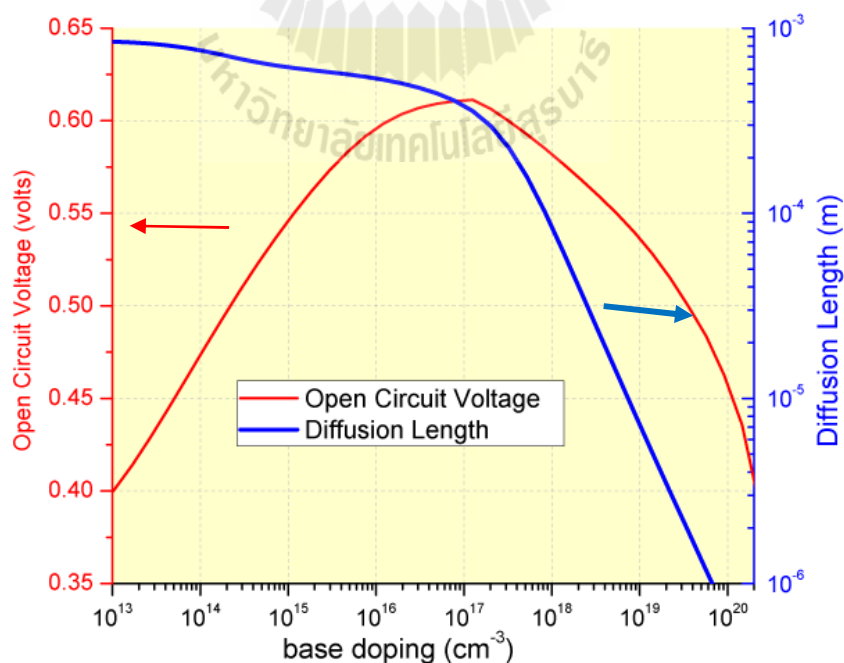
เซลล์แสงอาทิตย์นั้นประกอบด้วยวงจรมูลของไดโอดจากรอยต่อ p-n และมีปริมาณของกระแสไดโอดจากการไบอัสแบบไปหน้า (Forward bias) ส่วนสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์คือค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรคือแรงดันไฟฟ้าขณะที่มีกระแสไฟฟ้าแพร่ (Diffusion current) ด้วยการไบอัสแบบไปหน้านั้นมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าลัดวงจรพอดี กระแสแพร่ด้วยไบอัสแบบไปหน้านั้นขึ้นอยู่กับผลรวมของการรวมตัวใหม่รอยต่อ p-n ส่วนการเพิ่มขึ้นของการรวมตัวใหม่นี้จะทำให้กระแสไบอัสแบบไปหน้ามีค่า

เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะที่สูงนั้นจะเพิ่มค่ากระแสแพร่ไปอัสแบบไปหน้า ซึ่งมีผลกลับทำให้แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรลดลง เราอาจกล่าวได้ว่าตัวแปรทางวัสดุที่เกี่ยวข้องกับอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะนั้นคือค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตตัวของไดโอด การรวมตัวใหม่สามารถควบคุมด้วยการจำกัดจำนวนของพาหะข้างน้อยที่จะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อ พาหะเหล่านี้ต้องเคลื่อนที่ไปจากรอยต่ออย่างรวดเร็วก่อนเกิดการรวมตัวใหม่ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรที่ได้มีผลเกี่ยวข้องกับมาจกตัวแปรต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ดังนี้

1. จำนวนพาหะข้างน้อยที่บริเวณของรอยต่อ จำนวนพาหะเหล่านี้ซึ่งถูกฉีดจากฝั่งตรงข้ามนั้นเป็นจำนวนพาหะข้างน้อยในภาวะสมดุลที่คูณด้วยแฟกเตอร์เอกโปเนนเชียลซึ่งขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิ ดังนั้นถ้าต้องการแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมากต้องทำการแพร่สารเจือเพิ่มขึ้น

2. ค่าความยาวในการแพร่ของพาหะข้างน้อยในวัสดุ ถ้าค่านี้มีค่าต่ำหมายถึงพาหะข้างน้อยนั้นหายไปจากขอบรอยต่อ p-n อย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดการรวมตัวใหม่ ดังนั้นค่าความยาวในการแพร่ของพาหะข้างน้อยจึงต้องมีค่าสูงจากการรวมตัวใหม่น้อยทำให้แรงดันไฟฟ้าสูง อย่างไรก็ตามจากเงื่อนไขข้อ 1 ที่ทำการแพร่สารเจือเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความยาวในการแพร่ของพาหะข้างน้อยนั้นมีค่าลดลง และย้อนกลับไปทำให้แรงดันไฟฟ้าลดต่ำลง ลักษณะนี้เป็นผลเช่นเดียวกับสารเจือในแผ่นฐานเซลล์แสงอาทิตย์ในหัวข้อ 2.4.1

รูปที่ 2.18 แสดงปริมาณสารเจือ (N_D) ที่เพิ่มขึ้นนั้นมีผลกระทบต่อค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร แต่เมื่อปริมาณสารเจือสูงมากจะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากค่าความยาวในการแพร่ของพาหะข้างน้อยมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว

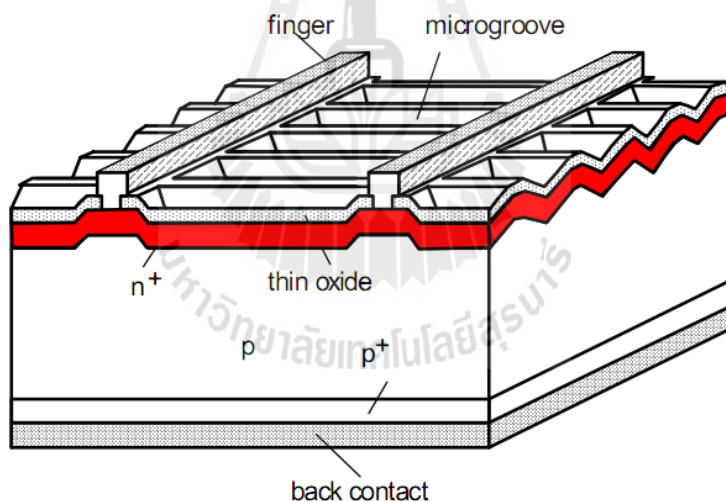


รูปที่ 2.18 ผลของปริมาณสารเจือ (N_D) ที่มีต่อค่าแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

3. การพาสซีเวชันที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์จะลดผลของกระแสรวมตัวใหม่ที่มีโอกาสเกิดขึ้นมากที่บริเวณใกล้รอยต่อ ที่บริเวณผิว และที่บริเวณขอบเขตของเกรน ดังที่เคยกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2.5 การรวมตัวใหม่ที่ผิว

2.5 ชั้นพาสซีเวชันของเซลล์แสงอาทิตย์ (Passivating layers)

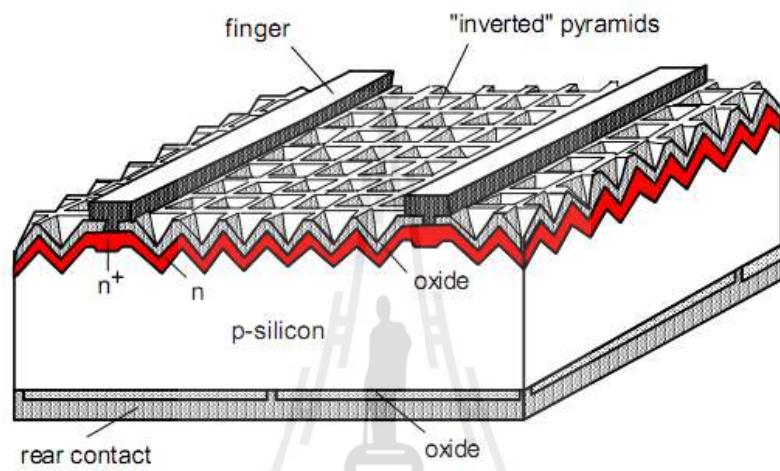
แต่เดิมนั้นการปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์ครั้งแรกได้พิจารณาการเพิ่มค่า V_{oc} จากการหาวิธีลดอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะที่บริเวณผิวด้านบนด้วยวิธีการใช้ชั้นพาสซีเวชันจากชั้นออกไซด์ด้วยความร้อน (Thermal oxide passivation) การสร้างพาสซีเวชันด้วยชั้น SiO_2 เกิดขึ้นครั้งแรกตั้งแต่ในปี ค.ศ. 1985 ที่ UNSW ให้ประสิทธิภาพกว่า 20% เรียกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบพาสซีเวชันทางด้านรับแสงกับการทำร่องแคบขนาดไมครอน หรือเรียกว่า Passivated Emitter Solar Cell (PESC) แสดงในรูปที่ 2.19 [ภาพจาก M.A. Green (1995)] เซลล์ชนิดนี้เคยนำไปใช้งานที่อวกาศ และใช้ในการแข่งขัน “Solar Car Racing” โครงสร้างนี้ประกอบด้วยชั้น SiO_2 บาง ๆ อยู่บนชั้น emitter ของเซลล์ ซึ่งแผ่นฐานซิลิคอนได้ทำการสร้างผิวรูปทรงตัววีล่องลิกระดับไมครอนด้วยกระบวนการสร้างลวดลายด้วยแสงหรือโฟโตลิโทกราฟี (photolithography)



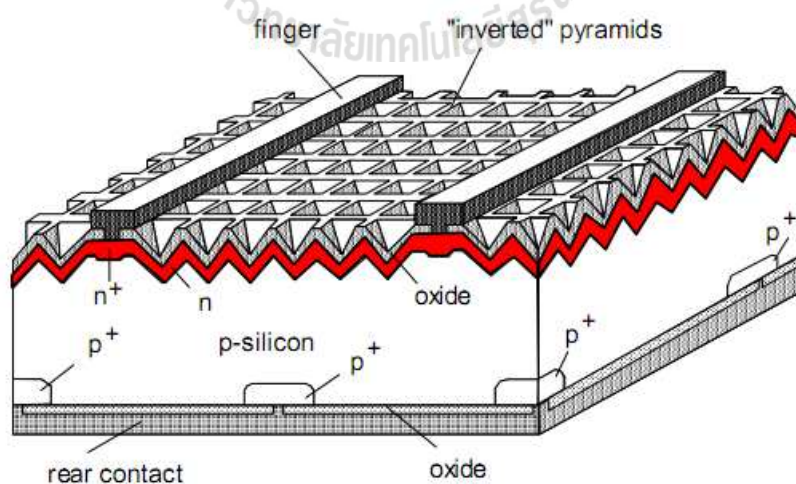
รูปที่ 2.19 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่ทำพาสซีเวชันด้านรับแสงกับการทำร่องแคบขนาดไมครอนเรียกว่า PESC solar cell

จากการปรับปรุงเริ่มต้นวิธีนี้ได้นำไปสู่การเสริมสร้างต่อเนื่องด้วยวิธีการอัลลอยอลูมิเนียมในด้านหลัง (Rear Al alloying step) จนกระทั่งในปัจจุบันการพัฒนาประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์บนหลักการการรวบรวมพาหะที่ได้รับการกระตุ้นจากแสงให้ได้มากที่สุดจากการลดอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะนั้นทำโดยการสร้างชั้นพาสซีเวชันทั้งด้านบนและด้านหลังของเซลล์เรียกว่า Passivated Emitter

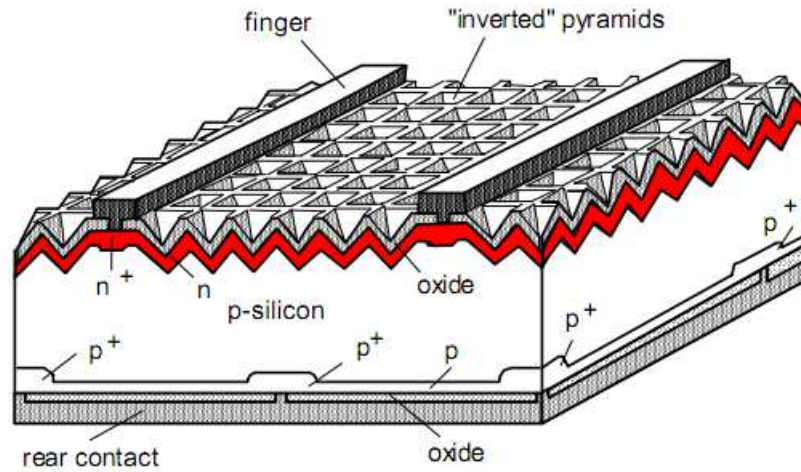
and Rear Cell (PERC) แสดงดังรูปที่ 2.20 ต่อมาได้ทำการปรับปรุงเพิ่มค่า I_{sc} โดยลดผลการรวมตัวใหม่ที่ด้านหลังด้วยการแพร่บางบริเวณให้เกิด p^+ ที่ด้านหลัง ดังรูปที่ 2.21 เรียกว่า PERL (Passivated Emitter, Rear locally diffused cell) ลักษณะดังกล่าวจะให้ผลของสนามไฟฟ้าที่ด้านหลังที่มีต่อประสิทธิภาพการรวบรวมกระแสพาหะ ทำให้ I_{sc} สูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด PERC ทำให้โครงสร้าง PERL ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในขณะนี้อยู่ที่ 24% ส่วนโครงสร้างแบบ PERT (Passivated emitter rear totally diffused cell) และ PERF (Passivated emitter, rear floating junction cell) ให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเท่ากันอยู่ที่ 23%



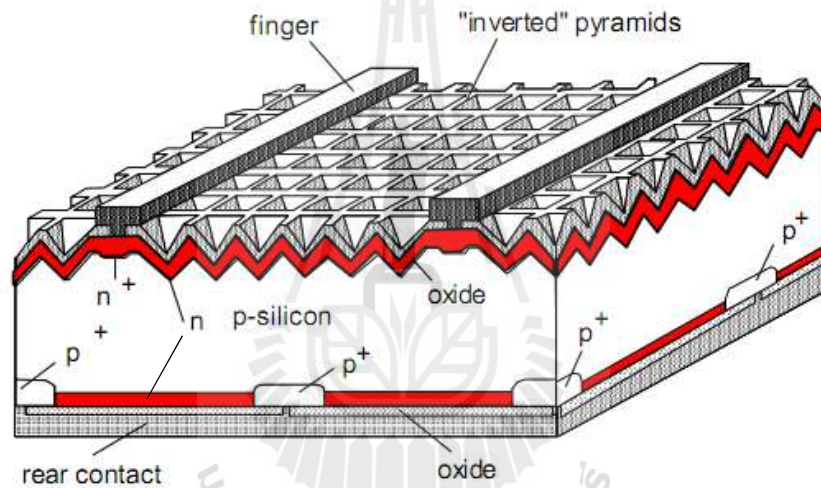
รูปที่ 2.20 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERC ที่มีชั้นพาสซีเวชันด้านบน และด้านล่าง



รูปที่ 2.21 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERL กับชั้นพาสซีเวชันด้านบนและด้านล่างกับบริเวณการแพร่ p^+



รูปที่ 2.22 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบ PERT

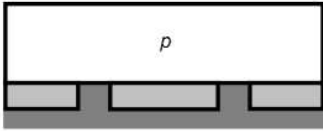
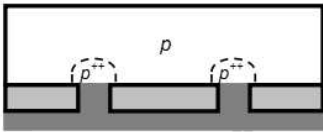
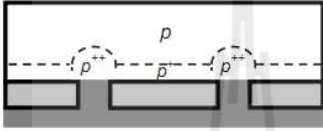
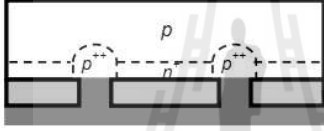


รูปที่ 2.23 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบ PERC

2.5.1 ชั้นพาสซีเวชันกับสนามไฟฟ้าด้านหลังในบางส่วนแบบ LBSF

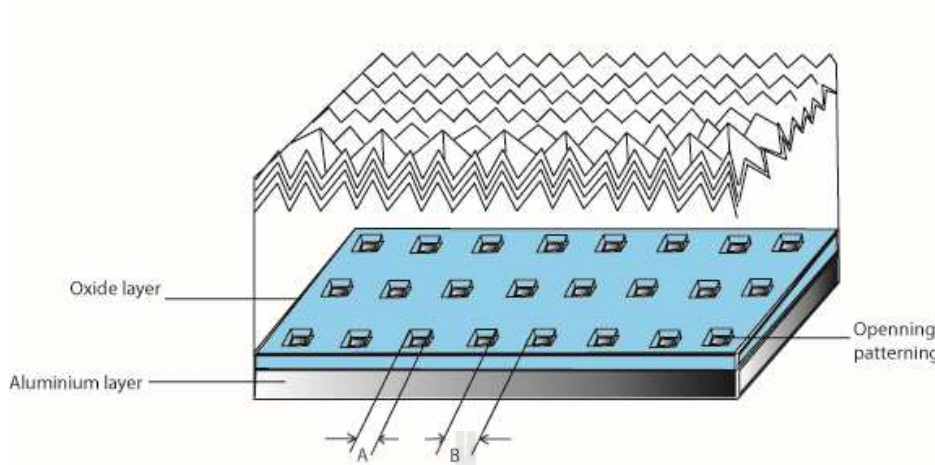
การสร้างชั้นพาสซีเวชัน SiO_2 บาง ๆ ไม่กี่นาโนเมตรช่วยลดผลการรวมตัวใหม่ เพราะลดจำนวนพันธะแขวนขาดที่ผิวทำให้ I_{sc} สูงขึ้น แต่การมีชั้นออกไซด์ทั่วพื้นที่ด้านหลังก็ส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสสูงระหว่างออกไซด์กับสารกึ่งตัวนำแผ่นฐาน ทำให้ V_{oc} ลดลง ดังนั้นจึงมีโครงสร้างของชั้นพาสซีเวชันกับสนามไฟฟ้าด้านหลังในแบบส่วนที่เรียกว่า Local back surface field : LBSF เพื่อเพิ่มค่า V_{oc} จากการลดผลของความต้านทานที่ผิวสัมผัส ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงที่สุดจากการลดการสูญเสียในบริเวณต่าง ๆ ให้มากที่สุด โครงสร้างที่นำการสร้างสนามไฟฟ้าและทำชั้นพาสซีเวชันที่ผิวด้านหลังในเซลล์นี้แสดงได้ดังตารางที่ 2.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่นำหลักการสนามไฟฟ้าและชั้นพาสซีเวชันที่ผิวด้านหลังมาใช้ เพื่อให้แรงดันเปิดวงจรของเซลล์สูงขึ้น [จาก Utama, 2009]

ตารางที่ 2.1 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบต่าง ๆ ที่นำชั้นพาสซีเวชันที่ผิวด้านหลัง (LBSF) มาใช้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน

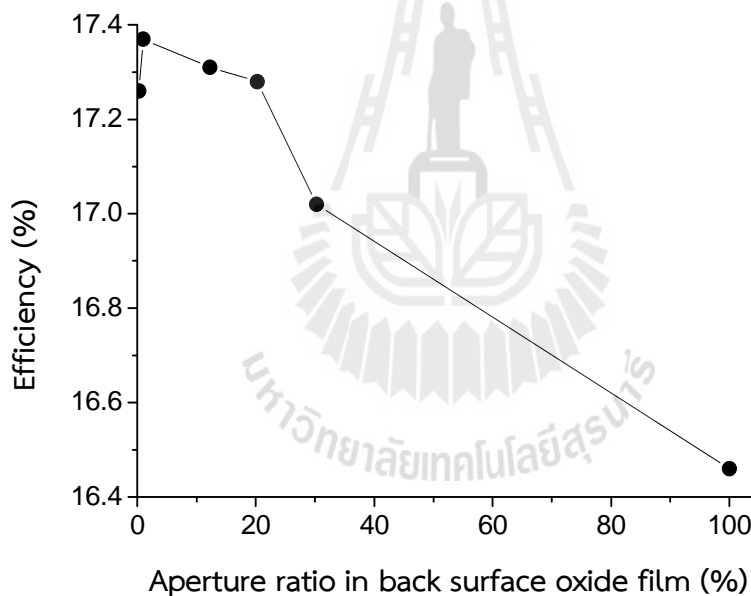
Cell Technology	Diagram of Rear Surface Design	V_{oc} (mV)	Reference
PERC (0.2 Ω .cm, <i>p</i> -type, FZ)		696	(Blakers <i>et al.</i> 1989)
PERL (2 Ω .cm, <i>p</i> -type, FZ)		696	(Wang <i>et al.</i> 1990)
PERT (1.5 Ω .cm, <i>p</i> -type, MCZ)		707	(Zhao <i>et al.</i> 2001)
PERF (1 Ω .cm, <i>p</i> -type, FZ)		714	(Altermatt <i>et al.</i> 1996)

ลักษณะของรูปแบบลดการเปิดช่อง SiO_2 เป็นพื้นที่ช่องเล็ก ซึ่งจากงานวิจัยของ Katsu (2002) แสดงถึงความพันซ์ของระยะช่องเปิด ที่ให้ประสิทธิผลต่อการลดลงของการรวมตัวใหม่ โดยมีการออกแบบพื้นที่ช่องเปิด และระยะห่างระหว่างช่องนั้นมีส่วนอยู่ระหว่าง 0.25-30 % ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงที่สุด ในรูปที่ 2.24 แสดงรูปแบบของพื้นที่ช่องเปิดกับระยะห่างระหว่างช่องเปิดในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ LBSF โดยที่ A คือระยะของความกว้างช่องเปิด และ B คือระยะห่างระหว่างช่องเปิด จากการศึกษาค่าเปอร์เซ็นต์อัตราส่วนของพื้นที่ช่องเปิดต่อระยะห่างของช่องมีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีการออกแบบอัตราส่วนของพื้นที่สี่เหลี่ยมช่องเปิดต่อพื้นที่สี่เหลี่ยมของระยะห่างของช่อง โดยใช้แผ่นฐานขนาด 69×36 ตารางมิลลิเมตร และแสดงรายละเอียดคือ ทำการสร้างช่องเปิดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้านละ $70 \mu\text{m}$ และช่องเปิดแต่ละช่องห่างกัน $200 \mu\text{m}$ จะได้จำนวนช่องเปิดส่วนความยาวของพื้นที่เซลล์ 345 ช่อง และจำนวนช่องเปิดส่วนความกว้างของพื้นที่เซลล์ 180 ช่อง จะได้จำนวนช่องเปิดต่อพื้นที่ทั้งหมดเป็น $180 \times 345 = 62,100$ ช่อง แต่ส่วนที่นำไปคำนวณคือ อัตราส่วนของความพื้นที่สี่เหลี่ยมช่องเปิดต่อพื้นที่สี่เหลี่ยมของระยะห่างของช่อง $(70 \times 70) / (200 \times 200) = 0.1225$ คิดเป็น 12.25 % หรือถ้าสร้างช่องเปิดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้านละ $30 \mu\text{m}$ และช่องเปิดแต่ละช่องห่างกัน $300 \mu\text{m}$ จะได้จำนวนช่องเปิดส่วนความยาวของพื้นที่เซลล์ 230 ช่อง และจำนวนช่องเปิดส่วนความกว้างของพื้นที่ช่องเปิด 120 ช่อง จะได้จำนวนช่องเปิดต่อพื้นที่ทั้งหมดเป็น $230 \times 120 =$

27,600 ช่อง จะได้อัตราส่วนของความพื้นที่สี่เหลี่ยมช่องเปิดต่อพื้นที่สี่เหลี่ยมของระยะห่างของช่องเท่ากับ $(30 \times 30) / (300 \times 300) = 0.01$ คิดเป็น 1%



รูปที่ 2.24 รูปแบบของพื้นที่ช่องเปิดกับระยะห่างของช่องเปิดในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ LBSF



รูปที่ 2.25 สัดส่วนของการเปิดช่อง SiO₂ ด้านหลังที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

จากกราฟรูปที่ 2.25 แสดงอัตราส่วนของพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ระยะห่างที่มีผลกับประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ แล้วพบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนช่องเปิดต่อพื้นที่ชั้นไดอิเล็กทริกมากกว่า 20% แล้วค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะต่ำลงมากอย่างเห็นได้ชัดเจน แต่ถ้าอัตราส่วนช่องเปิดต่อพื้นที่ชั้นไดอิเล็กทริกที่ต่ำกว่ากว่า 20% ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจะมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ระหว่าง 17.25% - 17.37% และมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงที่สุดประมาณ 17.37% ที่ค่าอัตราส่วนช่องเปิดเท่ากับ

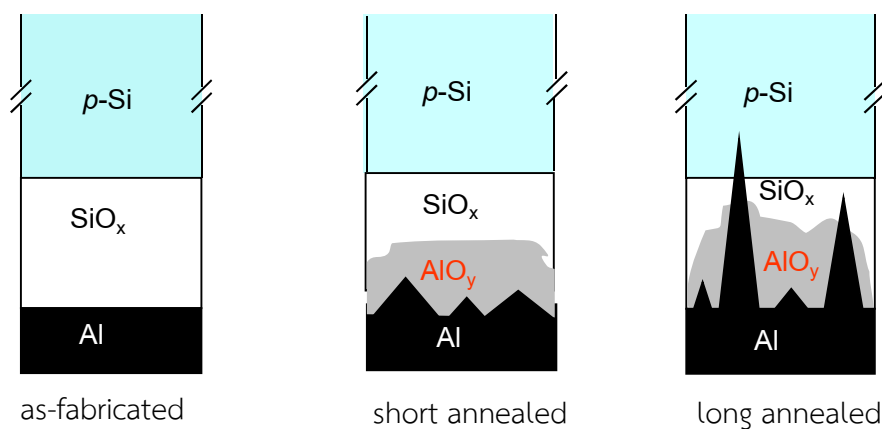
1% ดังนั้นในการออกแบบลวดลายช่องเปิดในบทต่อไปจะได้นำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาพิจารณาเป็นเงื่อนไขในการออกแบบการทดลอง

เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างต่าง ๆ ที่ให้ประสิทธิภาพเกินกว่า 20% ทั้งหมดนั้นประกอบด้วยขั้นตอนการผลิตลวดลายขนาดเล็กของช่องเปิดไดโอดิเล็กทริกพาสซีเวชันที่ด้านหลัง และลวดลายขนาดเล็กของชั้นหน้ากักพอร์เมออร์เพื่อผลิตผิวเซลล์ให้เป็นพีระมิดกลับหัว หรืออาจใช้เป็นรูปตัววี (V groove) ที่ด้านบน การผลิตลวดลายขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร ส่วนใหญ่นิยมสร้างขึ้นด้วยวิธีโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) ซึ่งเป็นวิธีที่สำคัญในการผลิตวงจรรวม แต่สำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์นั้นวิธีดังกล่าวไม่เหมาะสมเพราะมีขั้นตอนที่ซับซ้อนยุ่งยาก ไม่คุ้มค่างานต่อหน่วยการลงทุนเช่นเดียวกับการผลิตวงจรรวมที่มีปฏิบัติการที่ซับซ้อนแต่ใช้พื้นที่ขนาดเล็ก ดังนั้นจึงมีการศึกษาเพื่อหาวิธีการผลิตเซลล์โครงสร้างเหล่านั้นให้มีขั้นตอนง่าย ต้นทุนต่ำเหมาะสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับอุตสาหกรรม

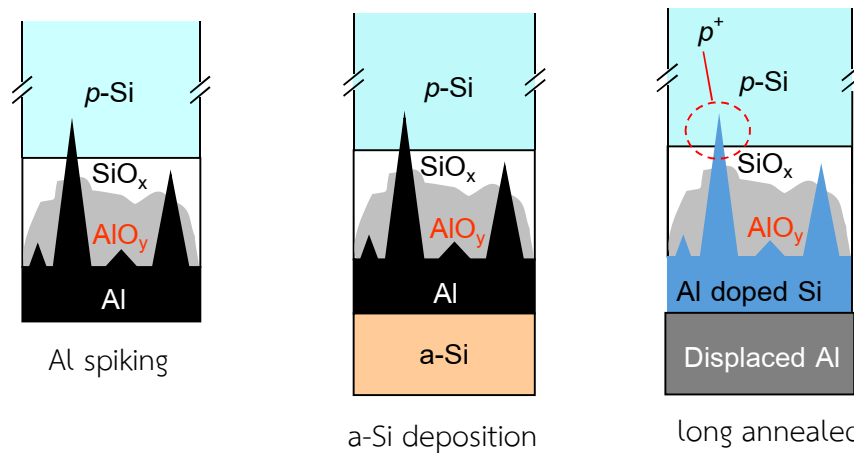
2.5.2 การสร้างชั้นพาสซีเวชันด้านหลังกับบริเวณการแพร่ p^+ Si ด้วยวิธี Al Pining

เทคนิคการสร้างชั้นพาสซีเวชันด้านหลังต้นทุนต่ำ โดยอาศัยเทคนิคการทะลุของ Al ลงชั้น SiO_2 บนแผ่นฐาน Si ชัดให้เรียบ ในโครงสร้างของเซลล์แบบฝังลายโลหะด้านบน และการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่าง Al และชั้น a-Si เป็นผลให้ค่า V_{oc} เพิ่มขึ้น

รูปที่ 2.26 และ 2.27 แสดงไดอะแกรมของขั้นตอนการเกิดช่องเปิดของ Al pining และขั้นตอนการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่าง Al กับ a-Si ตามลำดับ [จาก T. Fangsuwannarak, 2013] การศึกษานี้ได้สนใจลักษณะของการทะลุของ Al ในชั้น SiO_2 ภายใต้อุณหภูมิต่ำ และใช้แผ่นฐานซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารเคมีต่างให้เกิดผิวรูปทรงพีระมิดทั่วแผ่นในลักษณะที่มีขนาดพีระมิดแบบสุ่ม ลักษณะผิวขรุขระนี้ผลิตขึ้นนี้ใช้วิธีกัดผิวแบบ anisotropic ในส่วนผสมเคมีที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกลับที่ผิวมีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 2.26 ไดอะแกรมของกระบวนการแรกเพื่อให้เกิดช่องเปิดด้วย Al spiking ในชั้น SiO_2



รูปที่ 2.27 ไดอะแกรมของกระบวนการที่ 2 เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่าง Al กับ a-Si

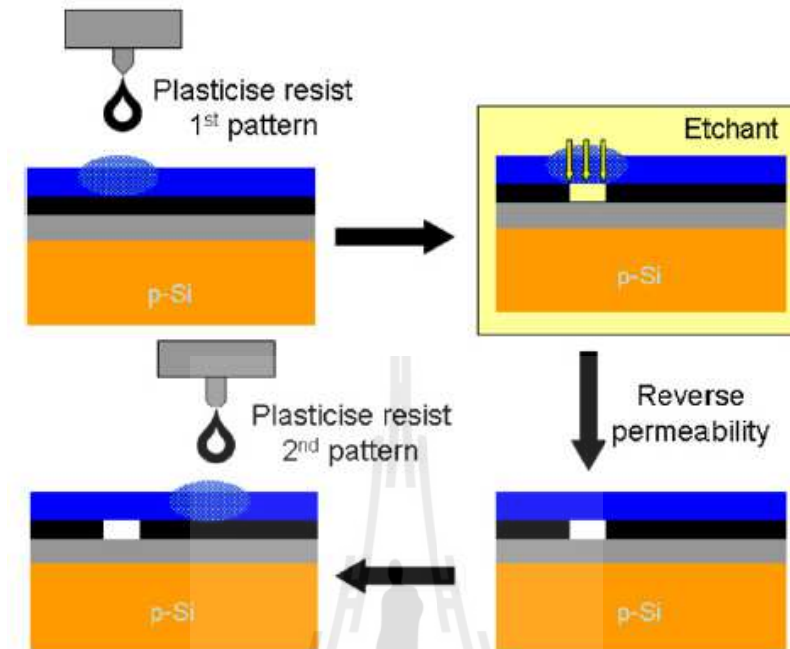
การสร้างชั้นพาสซีเวชันด้วยหลังด้วยชั้น SiO_2 แต่ใช้เทคนิคที่ไม่พึ่งพาเทคนิคที่ซับซ้อนอย่าง การสร้างลวดลายด้วยแสง ปรัชญาการณ์ของ Al pinning ที่ทะลุลงชั้น SiO_2 นั้นมีความกว้างไม่กี่ไมโครเมตร นั้นสามารถเกิดขึ้นในการผลิตไมโครอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปซึ่งไม่จำเป็นต้องการ แต่ในงานวิจัยนี้ได้นำการ เกิด Al pinning มาใช้ประโยชน์ร่วมกับกระบวนการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างชั้น Al และ a-Si หรือเรียกว่า กระบวนการ ALILE (Aluminum induced layer exchange) โดยมีโครงสร้างของฟิล์มประกอบด้วย a-Si/Al/ SiO_2 /Si substrate ชั้น a-Si จะเปลี่ยนเป็นซิลิคอนที่มีสารเจือซึมชั้นของ Al และบริเวณนี้จะทำ หน้าที่เป็น p^+ Si ของโครงสร้างในแบบ MIS (Metal Insulator Semiconductor) วัตถุประสงค์ของการมี โครงสร้างดังกล่าวเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าด้านหลังที่ผิวเฉพาะพื้นที่เปิดช่องเล็ก ๆ (BSF: Back Surface Field) ส่งผลให้ค่าความเร็วในการรวมตัวที่ผิวด้านหลัง (S_{eff}) มีค่าลดลง เพื่อให้ค่ากระแสลัดวงจรและ แรงแดันเปิดวงจรสูงขึ้น

2.5.3 การสร้างลวดลายช่องเปิดซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการฉีดด้วยเครื่องพิมพ์

การฉีดตัวทำละลาย (solvent) ของชั้นสารป้องกัน (resist) เพื่อให้เกิดช่องเปิดของชั้น resist เป็นลวดลายตามต้องการด้วยเทคนิค Inkjet printing ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่ลดขั้นตอนการผลิตลวดลายของฟิล์ม บางได้ และเป็นประเภทการผลิตแบบต้นทุนต่ำกว่าวิธี photolithography งานวิจัยจาก A.J. Lennon (2008) ได้ทำการเปิดช่องให้กับชั้น resist polymer ซึ่งเป็นชั้นที่ 1 จากด้านบนสุดเพื่อนำไปสกัดทางเคมี ให้กับชั้นออกไซด์ซึ่งเป็นชั้นที่ 2 ในตำแหน่งที่ฉีด ดังนั้นจะได้ช่องเปิดของชั้นออกไซด์ตามรูปแบบการฉีด สารทำละลาย แสดงขั้นตอนตามรูปที่ 2.28 [ภาพจาก A.J.Lennon, 2008]

การเปิดช่องให้กับชั้นออกไซด์ด้วยวิธี inkjet printing นั้นมีปัจจัยต่าง ๆ ที่เป็นตัวกำหนดขนาด ของช่องเปิดนั้นได้แก่ ลักษณะของเครื่องพิมพ์แบบฉีด เช่นขนาดและจำนวนของหัวฉีด ระยะการเคลื่อนที่

ของชุดหัวฉีด จำนวนครั้งในการฉีดซ้ำ เป็นต้น อีกทั้งยังรวมถึงปัจจัยอื่น เช่นความหนาของชั้น photo resist และระยะเวลาการแช่ในสารสกัด (etchant) เป็นต้น ดังนั้นวิธี inkjet printing ที่สามารถกำหนดรูป



รูปที่ 2.28 ขั้นตอนการสร้างช่องเปิดออกไซด์ด้วยวิธี Inkjet printing

ของลวดลายช่องเปิดออกไซด์ได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถผลิตลวดลายบนชิ้นงานที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่อย่างเซลล์แสงอาทิตย์ได้ด้วยวิธีต้นทุนต่ำ และสามารถพัฒนาเข้าสู่กระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้ เป็นผลให้การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ในโครงสร้างแบบ LBSF ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.5.1 สามารถผลิตได้ในเชิงพาณิชย์ได้

2.6 สรุป

การสูญเสียการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นข้อจำกัดของการให้ค่าประสิทธิภาพสูง โดยมีกลไกของการรวมตัวใหม่ของพาหะเป็นหนึ่งในการสูญเสียหลักที่เกิดขึ้นในเซลล์ โดยเฉพาะที่ผิวสัมผัสที่ซิลิคอนทั้งด้านหน้า และด้านหลังเซลล์ โดยปกติความหนาของแผ่นฐานเซลล์นั้นทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในแผ่นฐานได้ง่าย จึงมีการสร้างชั้น BSF ที่ด้านหลังเพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในชั้น ผลักดันให้การเดินทางของพาหะไปที่ขั้วไฟฟ้าดีขึ้น ในบทนี้ได้กล่าวถึงการสร้างชั้นฉนวนไดอิเล็กทริกบาง ๆ ที่ด้านหลังในระดับไมกอนาเมตรนั้นสามารถช่วยลดจุดบกพร่องของผลึกที่บริเวณผิวได้ที่เรียกวินี้ว่า Passivation สิ่งเหล่านี้เป็นวิธีหลักเพื่อลดการสูญเสียของเซลล์แสงอาทิตย์ อย่างไรก็ตามผลการมีชั้นออกไซด์บาง ๆ เคลือบพื้นที่ด้านหลังทั้งหมดนั้นส่งผลให้เกิดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสสูง ทำให้ค่า V_{oc} มีค่าลดลง ดังนั้น

การเปิดช่องออกไซด์บางส่วนทำให้ลดผลของความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสได้ วิธีการเปิดช่องมีด้วยกันหลายวิธีเช่น การใช้กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี แต่ไม่สอดคล้องกับการผลิตเชิงอุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นในบทที่ 3 จะได้กล่าวถึงวิธีการเปิดช่องออกไซด์ด้วยวิธีการฉีดยา ซึ่งสามารถลดกระบวนการที่ซับซ้อน ใช้เวลาสั้น วิธีดังกล่าวอาจเป็นทางเลือกในการพัฒนาสร้างชั้นพาสซีเวชันแบบมีช่องเปิดแบบต้นทุนต่ำ และสอดคล้องกับการผลิตในอุตสาหกรรมได้



บทที่ 3

การดัดแปลงเครื่องพิมพ์แบบฉีดเพื่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF

3.1 บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงนั้นมีส่วนประกอบที่สำคัญในโครงสร้างเซลล์นั้นคือ ชั้นพาสซีวชั้นกับสนามไฟฟ้าด้านหลังในแบบส่วนที่เรียกว่า Local back surface field : LBSF ซึ่งมีรายละเอียดกล่าวไว้ในบทที่ 2 ในบทที่ 3 นี้จะได้กล่าวถึงวิธีการเปิดช่องชั้น SiO_2 ด้วยวิธี inkjet printing โดยการศึกษาที่ได้ดัดแปลงเครื่องพิมพ์แบบฉีดทั่วไป เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขของขนาดช่องเปิด และระยะห่างของช่องเปิดเพื่อนำไปสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบ LBSF ที่ไม่พึ่งพากับระบบการเปิดช่องด้วยวิธีโฟโตลิโทกราฟี ซึ่งมีขั้นตอนที่ซับซ้อนไม่เหมาะต่อกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในอุตสาหกรรม แต่การเปิดช่องชั้น SiO_2 ด้วยวิธีการฉีดด้วยเครื่องพิมพ์จึงเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า ถึงแม้ว่าขนาดของลวดลายที่เล็กในระดับไมโครเมตรอาจเป็นอุปสรรคต่อการเปิดช่องขนาดเล็ก ดังนั้นการศึกษารูปแบบการเปิดช่องในเงื่อนไขต่างๆ ยังจำเป็นต้องมีการวิจัยเพื่อหาความเหมาะสมเพื่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรที่สูงขึ้นจากสนามไฟฟ้าภายในระหว่างรอยสัมผัส และช่วงความยาวในการแพร่ของพาหะมากขึ้น

3.2 หลักการของเครื่องพิมพ์แบบฉีด

การฉีดสารละลายโดยผ่านหัวฉีดขนาดเล็กที่อาจมีมากกว่า 1 หัวฉีดนั้นมีลักษณะและรูปแบบการฉีดที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ 1. การฉีดพ่นหมึกอย่างต่อเนื่อง เมื่อมาประกอบกับเครื่องพิมพ์ที่ส่งงานอัตโนมัติจึงเรียกว่าเครื่องพิมพ์หัวฉีดชนิดทำงานต่อเนื่อง (continuous inkjet) ชื่อย่อ CIJ และ 2. การฉีดพ่นหยดหมึกตามคำสั่ง (drop-on-demand inkjet) หรือเครื่องพิมพ์ฉีดหยดตามคำสั่งชื่อย่อ DOD

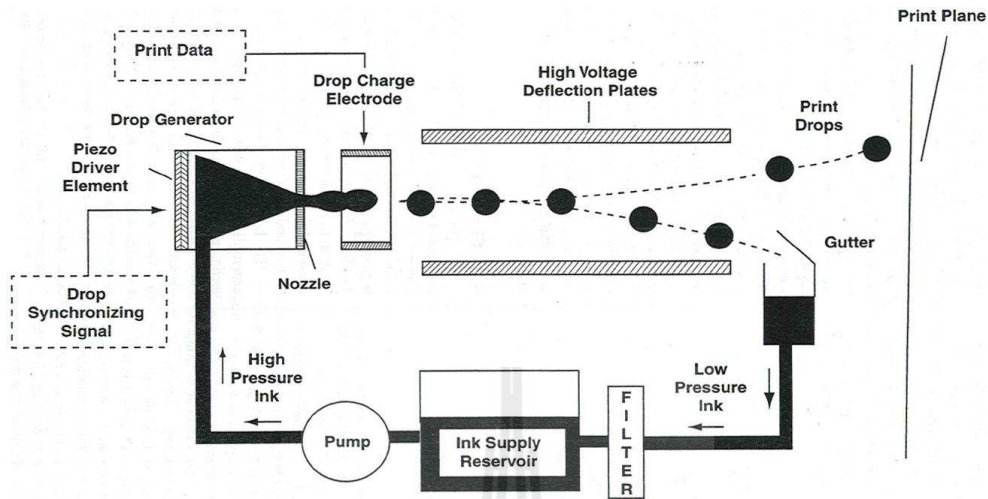
3.2.1 หลักการของเครื่องพิมพ์แบบฉีดชนิดทำงานต่อเนื่อง

เครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดแบบทำงานต่อเนื่องมีหลักการทำงานจากการสร้างประจุไฟฟ้าขึ้นในบริเวณท่อเดินทางของสารละลายด้วยแผ่นโลหะขนานดังรูปที่ 3.1 เมื่อสารละลายเดินทางในท่อสนามไฟฟ้า จะเกิดการหักเหในสนามไฟฟ้าไปยังตำแหน่งบนแผ่นสื่อนี้ที่ต้องการ ส่วนสารละลายที่เหลือจะหักเหรวบรวมกลับไปอยู่ที่เก็บสำรอง และปั๊มดูดกลับไปยังหัวฉีดซึ่งใช้หลักการพ่นสารละลายด้วยอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกแสดงได้ดังรูปที่ 3.1

ข้อดีของการฉีดแบบทำงานต่อเนื่องคือ สามารถสร้างงานพิมพ์ได้รวดเร็ว และแบ่งย่อยได้เป็น 2 ระบบคือ

- 1) ระบบหักเหสองทิศทาง (Binary deflection system) ในระบบนี้หยดหมึกที่เกิดประจุนั้นเดิน

ทางตรงไปติดบนแผ่นสื่อ แต่ส่วนที่ไม่ได้ถูกประจุจะหักเหไปกระทบที่สันดักจับของระบบและหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่



รูปที่ 3.1 กลไกการทำงานของเครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดแบบทำงานต่อเนื่อง

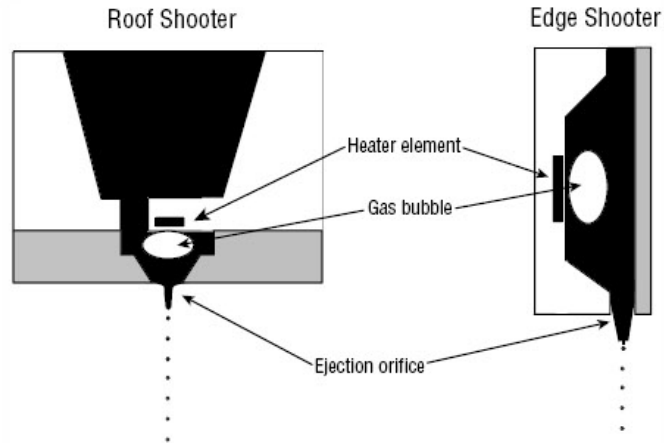
2) ระบบหักเหหลายทิศทาง (Multiple deflection system) ในระบบนี้หยดหมึกที่เกิดประจุจะเดินทางหักเหด้วยมุมที่แตกต่างกันไปติดบนแผ่นสื่อ ตามตำแหน่งที่ต้องการ ส่วนที่ไม่มีประจุจะเดินทางตรงไปกระทบสันดักจับของระบบ และหมุนเวียนกลับไปใช้ใหม่

3.2.2 หลักการของเครื่องพิมพ์แบบฉีดชนิดหยุดตามคำสั่ง

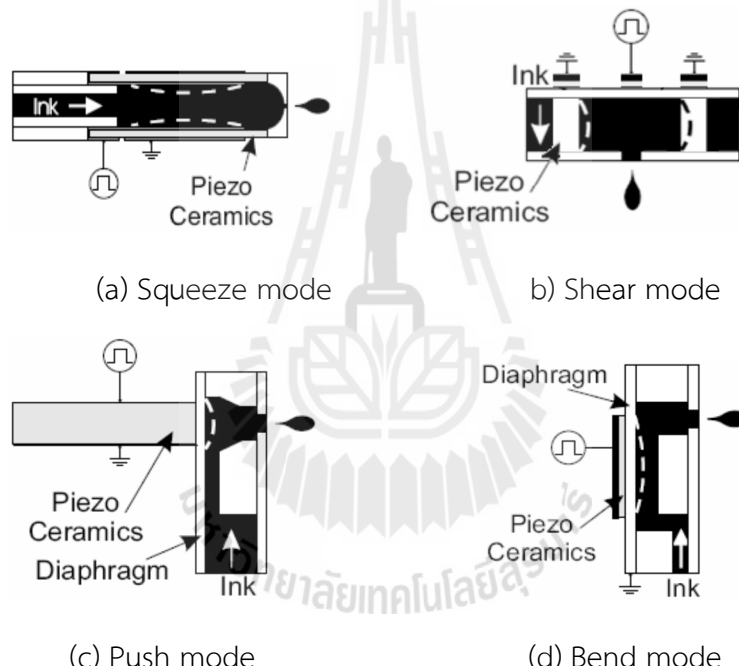
เครื่องพิมพ์ชนิดหัวฉีดแบบหยุดตามคำสั่ง (drop-on-demand) ใช้หลักการหยุดตามคำสั่ง โดยหยุดสารละลายจะพุ่งออกมาโดยตรงไม่มีการหักเห ซึ่งแตกต่างจากหลักการ CIJ หรือเรียกว่า DOD Technology ข้อดีของเครื่องพิมพ์ชนิดนี้คือคือใช้น้ำหมึกเฉพาะที่ต้องการใช้ไม่เหลือกลับมาใช้ใหม่เหมือนหลักการ CIJ โดยแบ่งชนิดย่อยได้เป็น 2 แบบคือ

1) ระบบการฉีดด้วยความร้อน (Thermal inkjet or Bubble jet) ใช้หลักการให้ความร้อนจากขดลวดความร้อนทำให้เกิดไอน้ำขยายตัวและดันให้สารละลายพุ่งแตกออกเป็นหยดเล็กๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.2

2) ระบบการฉีดด้วยเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric inkjet) เป็นการฉีดสารละลายด้วยการสั่นของแผ่นเพียโซ ขณะป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก การสั่นดังกล่าวสามารถดันปริมาณสารละลายให้ไหลออกไปเป็นจังหวะตามระดับการป้อนแรงดันไฟฟ้า ซึ่งระบบนี้สามารถควบคุมปริมาณสารที่ไหลผ่านช่องทางเดินไปสู่หัวฉีดได้แตกต่างจากระบบการฉีดด้วยความร้อน ระบบการฉีดสารละลายด้วยเพียโซอิเล็กทริกมีลักษณะของทิศทางการฉีดในไหลต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 โครงสร้างการฉีดสารละลายแบบหยดตามคำสั่งด้วยระบบความร้อน



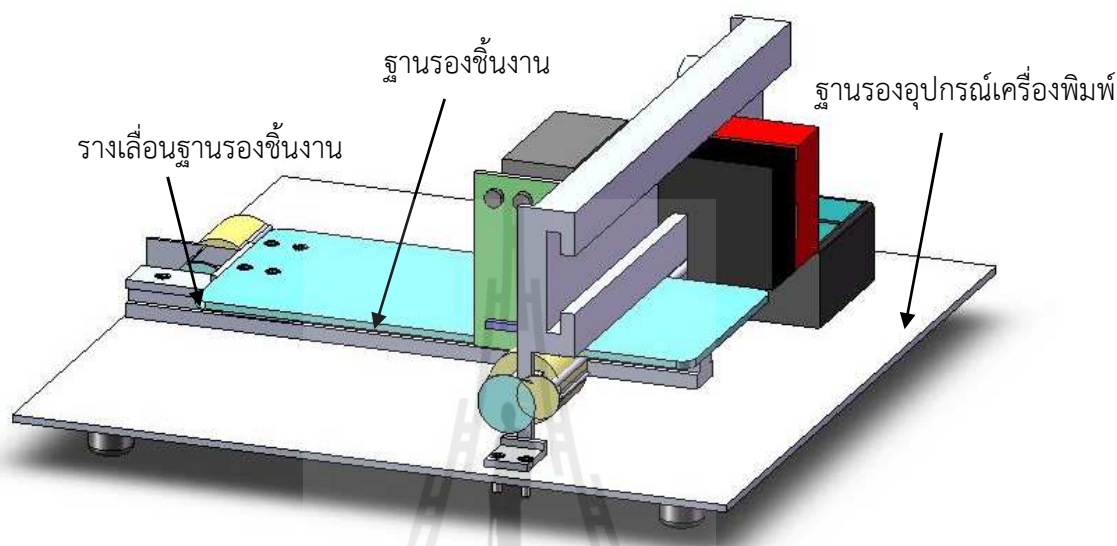
รูปที่ 3.3 โหมดทิศทางการฉีดสารละลายของระบบการฉีดชนิดเพียโซอิเล็กทริก

3.3 การดัดแปลงเครื่องพิมพ์แบบฉีดเพื่อใช้กับแผ่นฐานซิลิคอน

ในการศึกษาได้ได้นำเครื่องพิมพ์แบบฉีด (Inkjet printer) มาดัดแปลงให้สามารถเคลื่อนที่ในแนวระนาบและใช้กับแผ่นฐานซิลิคอนได้ โดยเลือกเครื่องพิมพ์ชนิดมีหัวฉีดแบบหยดตามคำสั่ง ระบบการฉีดเป็นแบบความร้อนโดยใช้เครื่องพิมพ์ canon รุ่น pixma ip 1980 ปัจจุบันต่าง ๆ ที่นำมาประกอบการพิจารณาเช่น มีโครงสร้างที่ง่ายต่อการดัดแปลง มีราคาเหมาะสม มีตลับหมึกพิมพ์แยกกับตัวโครงสร้างทำให้ง่ายต่อการบำรุงรักษาหากเกิดการอุดตันของช่องทางเดินสารหรือหัวฉีด

ส่วนประกอบหลักของเครื่องพิมพ์แบบฉีดประกอบด้วยชิ้นส่วนเดิมและส่วนที่ออกแบบเพิ่มเติมมีดังนี้ ส่วนประกอบต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 3.4

1) ฐานรองอุปกรณ์เครื่องพิมพ์ มีขนาดความกว้างของโครงประมาณ 40 cm จึงได้ออกแบบให้มีความกว้างและความยาว 50 cm ซึ่งต้องเผื่อขาตั้งของโครงเลื่อนหัวพิมพ์ด้านละ 5 cm ฐานรองอุปกรณ์นี้จึงเป็นชิ้นส่วนที่รองรับอุปกรณ์ทั้งหมดที่ออกแบบไว้

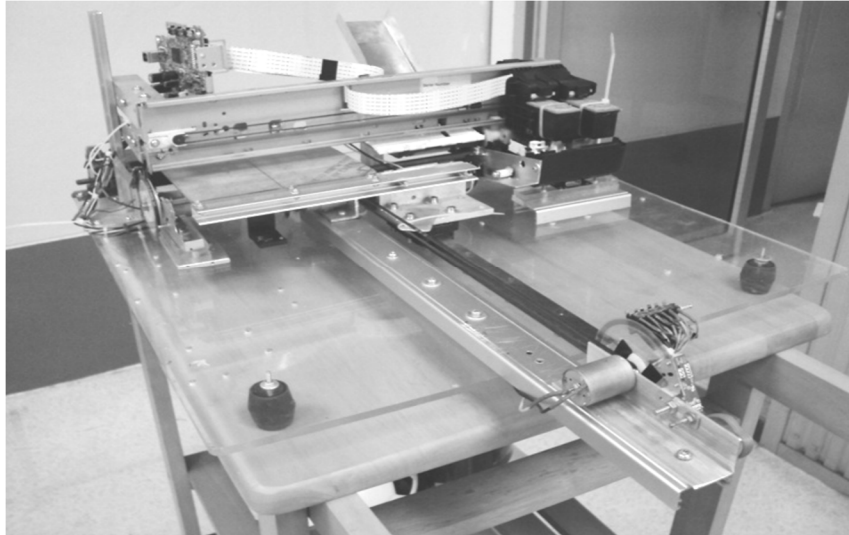


รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบหลักของเครื่องพิมพ์ที่ดัดแปลงสำหรับในงานวิจัยนี้

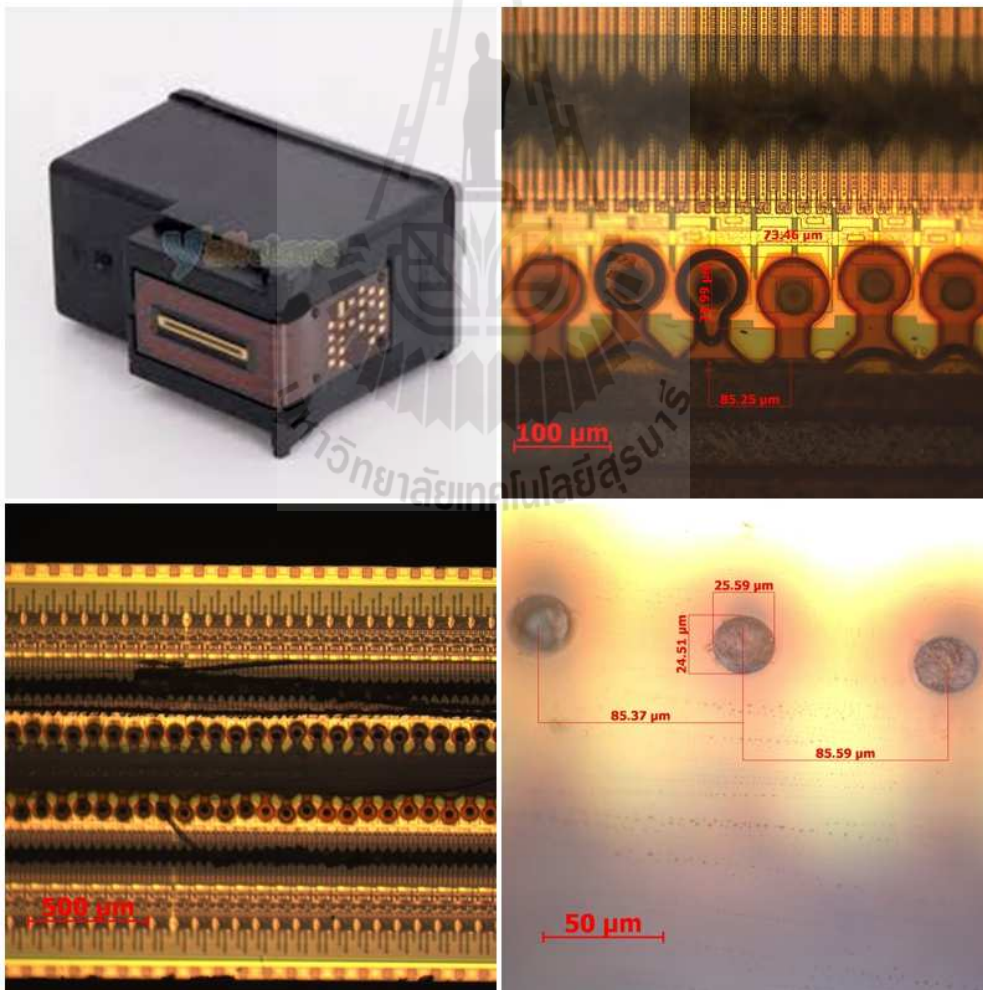
2) ฐานรองชิ้นงาน เป็นส่วนที่อยู่ติดกับชิ้นงาน โดยออกแบบให้สามารถเลื่อนได้ทดแทนการเคลื่อนที่ของกระดาษจากการใช้งานเดิม และเนื่องจากการดัดแปลงนี้ต้องใช้พื้นที่ของช่องทางเดินชิ้นงาน เป็นส่วนที่ติดตั้งชุดกลไกดึงชิ้นงานที่สถานะเริ่มทำงาน มีขนาดกว้าง 16 cm และยาว 36 cm ดังนั้นความกว้างของช่องทางเดินชิ้นงานจะแคบลงเท่ากับความกว้างของชุดกลไกดึง ดังนั้นการออกแบบสั่งการทำงานในคอมพิวเตอร์ต้องเว้นพื้นที่การทำงานบริเวณที่เป็นชุดกลไกดึง ส่วนฐานรองชิ้นงานนี้ต้องสามารถเคลื่อนที่ได้จึงทำการเชื่อมต่อฐานรองชิ้นงานกับรางเลื่อน วัสดุที่ทำให้เคลื่อนที่ได้ติดด้านล่างของฐานรองชิ้นงานซึ่งสัมผัสกับแกนขับเคลื่อน การทำงานของฐานรองชิ้นงานจะทำงานได้เมื่อเครื่องพิมพ์แบบฉีดอยู่ในโหมดพร้อมทำงานและทำงานพร้อมกับมอเตอร์ที่ยึดฐานรองชิ้นงาน

3) รางเลื่อนฐานรองชิ้นงาน เป็นชิ้นส่วนที่อยู่ติดกับฐานรองชิ้นงานมีความยาวขนาด 48 cm รางเลื่อนฐานรองชิ้นงานนี้มีความเรียบลื่นในการใช้งานแม้จะได้รับน้ำหนักมากจากฐานรองอุปกรณ์ก็ตาม

จากอุปกรณ์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้นำมาประกอบและทดสอบการทำงาน แสดงภาพถ่ายของเครื่องพิมพ์ได้ดังรูปที่ 3.5 สำหรับหัวฉีดที่นำมาใช้งานวิจัยนี้มีจำนวนหัวฉีดทั้งหมด 320 หัวฉีด แต่ละหัวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 μm ภาพถ่ายจากกล้อง Optical microscope แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 เครื่องพิมพ์แบบฉีดยิ่งที่ดัดแปลงขึ้นในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.6 หัวฉีดที่ใช้ในงานวิจัยนี้

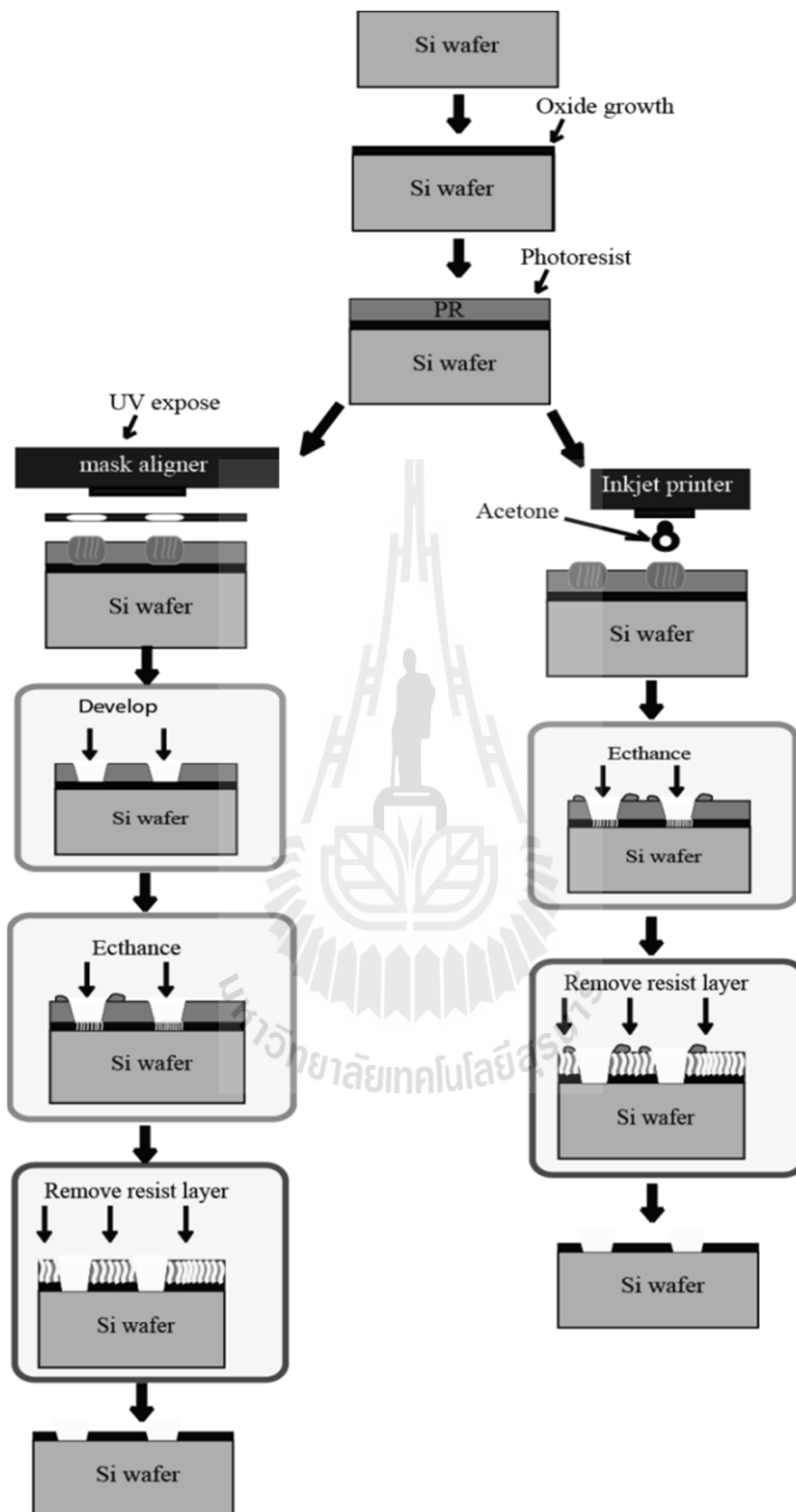
3.4 การสร้างลวดลายช่องเปิดชั้นออกไซด์สำหรับเป็นชั้นพาสซีเวชันด้วยเทคนิคแบบฉีด

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนใช้หลักการผลิตลวดลายขนาดเล็กให้แก่ขั้วไฟฟ้าด้านบนด้วยวิธีพิมพ์ลาย (Screen printing) ดังนั้นเราจึงเรียกยุคการผลิตนี้ว่า เทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Screen Printing ซึ่งหลักการนี้ดำเนินการมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1971 กระบวนการผลิตขั้วไฟฟ้าขนาดเล็กในระดับหลักร้อยไมโครเมตรของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นนั้นไม่จำเป็นต้องพึ่งพาเทคนิคโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) หรือการสร้างลวดลายด้วยแสง ซึ่งมีขั้นตอนที่ซับซ้อนและมีต้นทุนสูงกว่า ไม่เหมาะสมต่อการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นอุปกรณ์รอยต่อพี-เอ็นที่ใช้พื้นที่ขนาดใหญ่สำหรับรับแสง อย่างไรก็ตามการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่บันทึกได้กว่า 24% ด้วยโครงสร้าง PERL ดังที่แสดงไว้ในบทที่ 2 นั้นยังพึ่งพาการออกแบบช่องเปิดพาสซีเวชัน และการสกัดผิวรูปทรงพีระมิดหัวกลับ ด้วยวิธีโฟโตลิโทกราฟี ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่พัฒนาเครื่องพิมพ์แบบฉีดมาใช้ในการเปิดชั้นออกไซด์ ซึ่งมีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน ไม่ต้องมีชุดหน้ากากต้นแบบและไม่มีกระบวนการทำลายด้วย Developer มีเพียงออกแบบด้วยคำสั่งในคอมพิวเตอร์ไปยังเครื่องพิมพ์เพื่อสั่งการฉีดสารตัวทำละลายบนชั้นสารไวแสงที่เคลือบบนชั้นออกไซด์ จนเกิดเป็นช่องเปิดของหน้ากากไวแสงและผ่านกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายชั้นออกไซด์ ก็สามารถได้ช่องเปิดชั้นออกไซด์ตามที่ต้องการและสร้างได้จำนวนมากต่อรอบการผลิต อย่างไรก็ตามการสร้างลวดลายด้วยการฉีดสารตัวทำละลายมีข้อจำกัดด้านขนาดของลวดลายที่ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีของหัวฉีด และระบบควบคุมการฉีดของสารละลายลงเป้าหมาย และยังรวมถึงสมบัติของสารละลายที่ต้องการฉีด เช่นความหนืด การระเหย ที่อาจส่งผลต่อการอุดตันที่หัวฉีด และการกัดกร่อนของชิ้นส่วนวัสดุต่าง ๆ ในเครื่องพิมพ์ รูปที่ 3.7 แสดงการเปรียบเทียบขั้นตอนของกระบวนการเปิดช่องชั้นพาสซีเวชันด้วยเทคนิคโฟโตลิโทกราฟีกับเทคนิคการใช้เครื่องพิมพ์แบบฉีด จากภาพพบว่า การสร้างด้วยเทคนิคการฉีดมีขั้นตอนน้อยกว่า ไม่จำเป็นต้องมีหน้ากากต้นแบบเพื่อสร้างลวดลาย ไม่มีการฉายแสง UV เพื่อให้ชั้นไวแสงเกิดปฏิกิริยา polymerization และไม่มีกระบวนการ develop ทำให้เทคนิคการเปิดชั้นพาสซีเวชันด้วยวิธีการฉีดจึงเป็นอีกหนึ่งวิธีทางเลือกที่มีขั้นตอนการผลิตและสามารถให้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าได้

3.4.1 การออกแบบลวดลายและขั้นตอนการผลิตช่องเปิดพาสซีเวชัน

จากการศึกษาค่าสัดส่วนของช่องเปิด SiO_2 ด้านหลังที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในบทที่ 2 นั้น ซึ่งพบว่าอัตราส่วนช่องเปิดต่อพื้นที่ชั้นไดออกไซด์ที่ต่ำกว่า 20% สามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานกว่า 17.37% ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาพิกัดการทำงานของเครื่องฉีดสารละลายอาซิโตนเพื่อให้ได้ขนาดช่องเปิดของชั้นออกไซด์ที่เล็กที่สุด และเลือกใช้รูปแบบของลวดลายช่องเปิดที่ออกแบบด้วยโปรแกรม layout เป็น 2 ลักษณะคือ

1. ช่องเปิดเส้นยาวตรงขนาดและระยะห่าง ในเงื่อนไขต่าง ๆ โดยมีความยาวของเส้นเปิดเท่ากับ 1 cm แสดงข้อมูลในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.7 การเปรียบเทียบของขั้นตอนการเปิดช่องชั้นพาสซีวชั้นระหว่างการใช้เทคนิคโฟโตลิโทกราฟี และเทคนิคการฉีดด้วยเครื่องพิมพ์

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลของลวดลายช่องเปิดเส้นตรงยาวและค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ระยะห่างของเส้นช่องเปิด

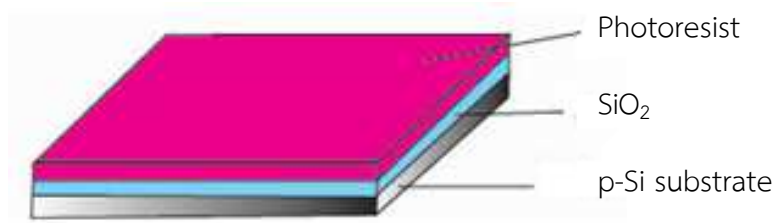
ความกว้างของช่องเปิด (μm)	ระยะห่างของช่องเปิด (μm)	อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ระยะห่าง (%)
100	200	50
	500	20
	1000	10
200	1000	20
500		50
1000		100

2. ช่องเปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดและระยะห่าง ในเงื่อนไขต่าง ๆ แสดงข้อมูลในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของลวดลายช่องเปิดสี่เหลี่ยมจัตุรัสและค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ระยะห่าง

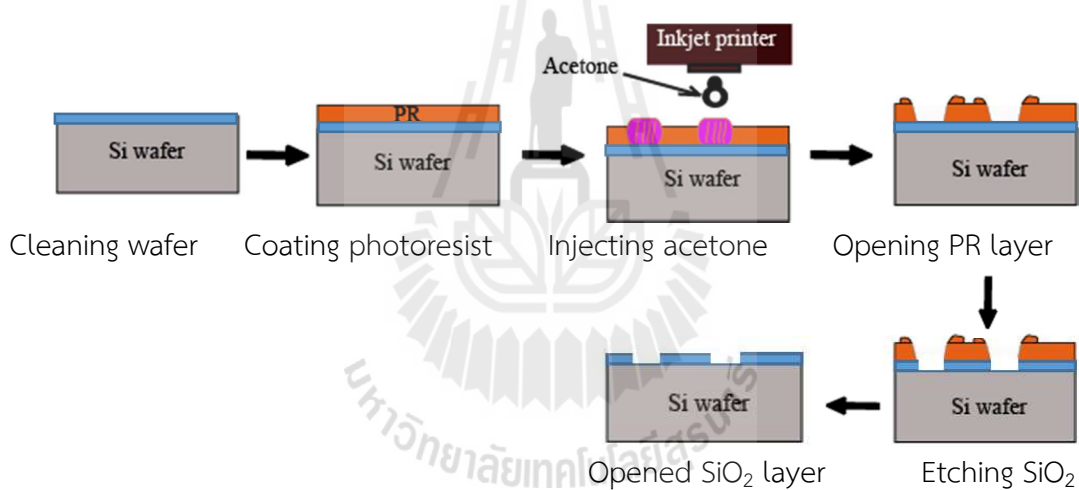
พื้นที่ช่องเปิด ($A \times A$) μm^2	พื้นที่ระยะห่างของช่องเปิด ($B \times B$) μm^2	อัตราส่วนระหว่างพ.ท.ช่องเปิดต่อพ.ท.ระยะห่าง (%)
30×30	500×500	0.36
50×50	500×500	1
100×100	1000×1000	1

หลังจากการกำหนดลวดลายช่องเปิดเพื่อทำการทดสอบการทำงานของเครื่องพิมพ์ เราจำเป็นต้องสร้างชั้น SiO_2 ที่มีความหนาประมาณ 100 nm เพื่อเป็นชั้นพาสซีเวชันด้านหลังให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงของสารละลายที่เรียกว่าวิธี Spin on dopant (SOD) รายละเอียดการผลิตฟิล์ม SiO_2 จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป ในขั้นตอนแรกนั้นแผ่นซิลิคอนต้องผ่านขั้นตอนการทำความสะอาดในสูตร RCA 1 และ RCA 2 เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่และอะตอมโลหะตามลำดับ ต่อมาทำการปลูกฟิล์ม SiO_2 ลงบนแผ่นฐานรอง p-type Si แล้วจึงเคลือบชั้นสารไวแสงชนิดบวกของ PFI-34 Sumiresist บนชั้นฟิล์ม SiO_2 ด้วยวิธีแบบหมุนเหวี่ยงให้ทั่วแผ่น ที่ความเร็วรอบ 2 ขั้นตอน ที่ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลานาน 5 วินาที และ 3000 รอบต่อนาที นาน 30 วินาที โครงสร้างดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3.8 หลังจากได้ฟิล์มสารไวแสงบนแผ่นซิลิคอนแล้ว นำไปวางบนแผ่นรองชิ้นงานในเครื่องพิมพ์ที่ออกแบบลายการฉีดยาด้วยโปรแกรมวาดภาพทั่วไป ในส่วนของตลับหมึกพิมพ์แทนที่หมึกทั่วไปด้วยสารละลายอาซิโตน และส่งคำสั่งการฉีดยา หลังจากผ่านการฉีดยาแล้ว นำชิ้นงานไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลานาน 30 นาที เมื่อได้ลวดลายช่องเปิดแล้วจึงนำชิ้นงานไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์

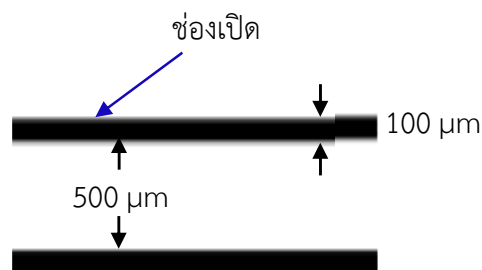


รูปที่ 3.8 โครงสร้างของชั้นฟิล์ม photoresist/SiO₂/p-Si substrate ก่อนทำการเปิดช่อง

รูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนการเปิดช่องชั้น SiO₂ ด้วยวิธีการฉีด และการฉีดสารละลายอะซิโตนเพียงครั้งเดียวอาจไม่สามารถมีผลเกิดปฏิกิริยาละลายสารไวแสงได้ ดังนั้นจึงได้ศึกษาจำนวนการฉีดซ้ำบนบริเวณฟิล์มสารไวแสงที่สามารถได้ผลช่องเปิดของสารไวแสงได้ ในขั้นตอนนี้ได้ออกแบบลวดลายแบบเส้นตรงมีขนาดช่องเปิดและระยะห่างดังรูปที่ 3.10 การศึกษานี้ได้ทำการฉีดซ้ำเพื่อหาผลของการเปิดช่องที่ดีที่สุดสำหรับเปิดช่องชั้นสารไวแสง โดยวิเคราะห์ที่ได้จากภาพถ่ายด้วยกล้อง Optical microscope เปรียบเทียบระหว่างขนาดที่ออกแบบ และขนาดที่ได้จากการฉีดซ้ำตั้งแต่ 1 -10



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการเปิดช่องชั้น SiO₂ ด้วยวิธีการฉีด



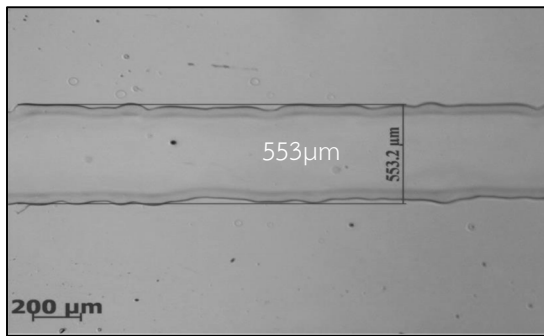
รูปที่ 3.10 ลวดลายและขนาดที่ออกแบบสำหรับเปิดช่องชั้นสารไวแสง

3.4.2 ผลของการฉีดซ้ำของสารละลายที่มีต่อการเปิดช่องชั้น SiO₂

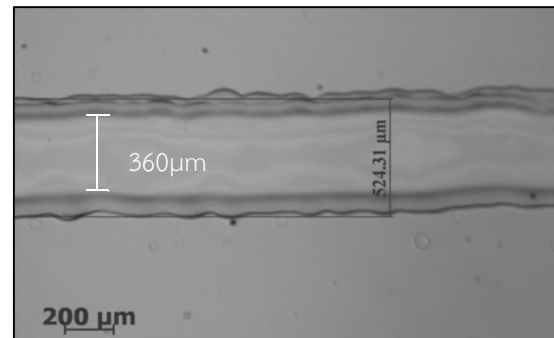
เมื่อพิจารณาผลการฉีดแบบเส้นตรงยาวที่สั่งงานจากโปรแกรมภาพที่มีขนาด 100 μm ระยะห่าง 300 μm พบว่าการฉีดสารละลายซ้ำมากกว่า 1 ครั้งลงบนชั้น photoresist นั้นมีผลต่อการละลายของฟิล์มดังกล่าว ส่งผลต่อขนาดความกว้าง และความคมชัดของช่องเปิด รูปที่ 3.11 (ก)-(ข) แสดงภาพถ่ายช่องเปิดของชั้นไวแสงเมื่อทำการฉีดสารละลายอะซิโตน 1 ครั้ง 2 ครั้ง 3 ครั้ง 4 ครั้ง 5 ครั้ง 6 ครั้ง 8 ครั้ง และ 10 ครั้ง ตามลำดับ จากผลพบว่าการเกิดลายเส้นจากสารละลายอะซิโตนมีขนาดใหญ่กว่า ลวดลายที่ออกแบบ และสังเกตเห็นส่วนของสารโพลีเมอร์ที่ทำปฏิกิริยากับอะซิโตนนั้นพอกพูนที่บริเวณขอบของร่องเปิด เมื่อทำการฉีดซ้ำเกินกว่า 6 ครั้ง ขนาดของช่องเปิดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อฉีดซ้ำ 10 ครั้งสามารถพบชั้น SiO₂ ในช่องเปิดดังกล่าวที่มีขนาดอยู่ในระหว่าง 150 ถึง 157 μm มีความคลาดเคลื่อนจากลวดลายที่กำหนดประมาณ 50% ระยะห่างช่องเปิดประมาณ 330 μm มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 10% ดังนั้นจากผลดังกล่าวจึงได้กำหนดการฉีดสารละลายอะซิโตนซ้ำ 10 ครั้งเพื่อให้ได้หน้าภาพ photoresist ด้วยวิธีการฉีดสาร หลังจากนั้นผ่านกระบวนการ etching ด้วยสารละลาย HF เพื่อสกัดชั้น SiO₂ ในช่องเปิดดังกล่าวและเกิดเป็นช่องเปิด SiO₂ ได้ในที่สุด

ผลการฉีดในลวดลายสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการฉีดซ้ำจำนวน 10 ครั้งแสดงในรูปที่ 3.12 (ก)-(ข) (พบว่าช่องเปิดมีลักษณะเป็นวงรีหรือวงกลมที่มีขนาดความกว้างเฉลี่ยประมาณ 150 μm และระยะห่างระหว่างช่องเปิดประมาณ 400 μm แต่ช่องเปิดที่ได้ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากคำสั่งการฉีดไม่ต่อเนื่อง ขณะหยุดการฉีดอาจมีส่วนจากความหนืดของสารอะซิโตนที่ไม่มากพอนั้นหยดออกไป เมื่อถึงช่วงการฉีดปริมาณที่อยู่ในท่อก็ไม่มากพอทำให้บางส่วนไม่พบลวดลายการฉีดที่ชัดเจนเหมือนกับการฉีดลวดลายเส้นตรงที่ต่อเนื่องกัน

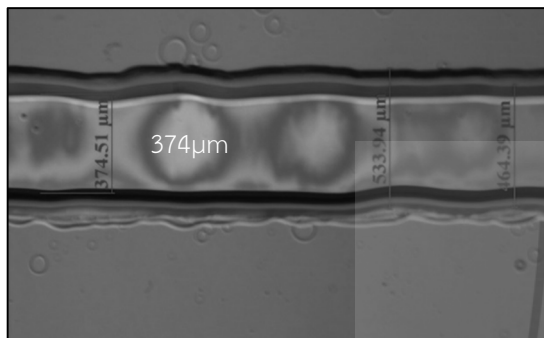
จากผลการฉีดของสารละลายอะซิโตนด้วยเครื่องพิมพ์ที่ประยุกต์และพัฒนาขึ้น พบว่าจำนวนการฉีดซ้ำที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อขนาดของช่องเปิดที่ได้นั้นมีขนาดเล็กลง การสร้างลวดลายช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานในการทำงานวิจัยนี้ เนื่องจากลวดลายที่ได้ยังไม่มีคุณสมบัติที่สม่ำเสมอจากการฉีดที่ไม่ต่อเนื่อง ไม่ทะลุชั้นสารไวแสงไปยังชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกได้อย่างสมบูรณ์ หรือไม่สามารถเกิดลวดลายชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่อยู่ภายใต้ชั้นสารไวแสงได้ และการสร้างลวดลายช่องเปิดแบบเส้นตรงจะมีความคมชัดของเส้นตรงมากที่สุด ด้วยการฉีดสารอะซิโตนซ้ำที่เดิมเป็นจำนวน 10 ครั้ง และได้ช่องเปิดเส้นตรงที่มีขนาดเฉลี่ย 150 μm และระยะห่างเฉลี่ย 300 μm โดยจะนำเงื่อนไขการเปิดช่องที่ได้นี้ไปสร้างชั้นพาสซีเวชันจากการสร้างลวดลายด้วยเครื่องพิมพ์ในบทต่อไป



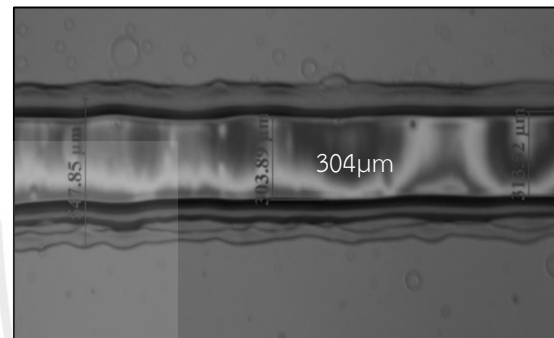
(ก) ฉีดสารละลาย 1 ครั้ง



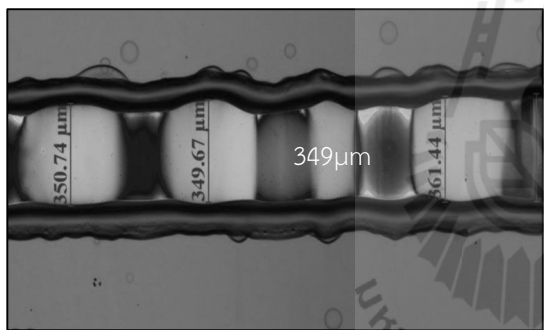
(ข) ฉีดสารละลายซ้ำ 2 ครั้ง



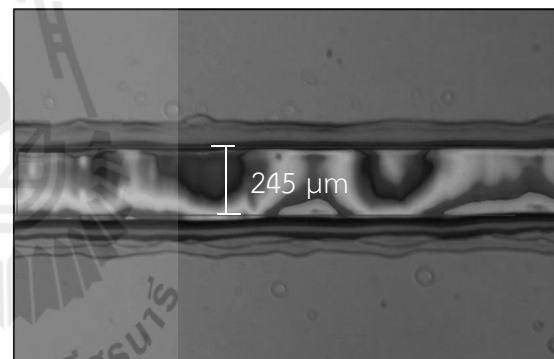
(ค) ฉีดสารละลายซ้ำ 3 ครั้ง



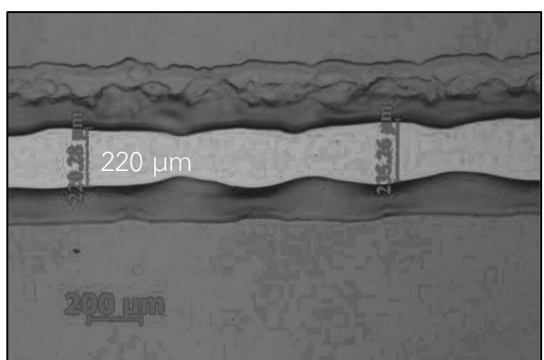
(ง) ฉีดสารละลายซ้ำ 4 ครั้ง



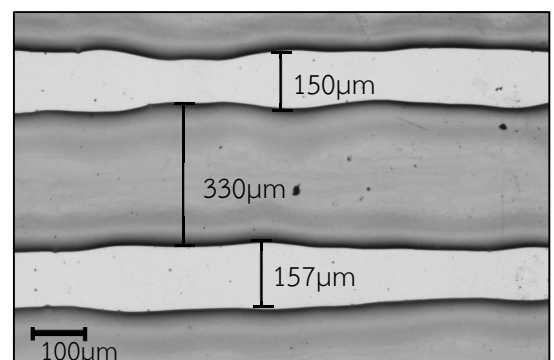
(จ) ฉีดสารละลายซ้ำ 5 ครั้ง



(ฉ) ฉีดสารละลายซ้ำ 6 ครั้ง

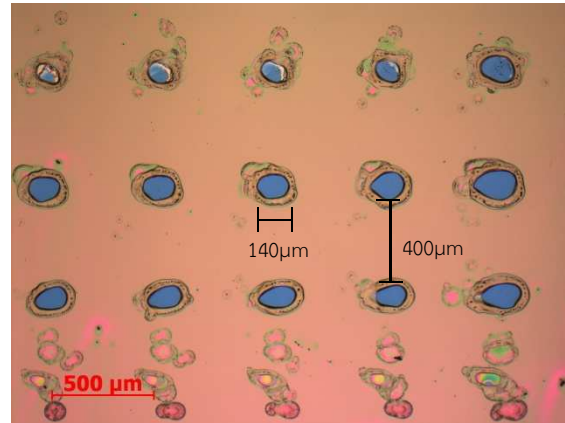
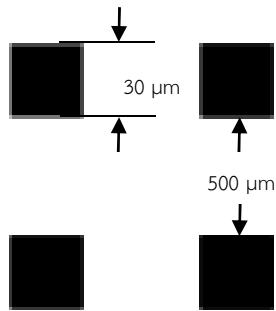


(ช) ฉีดสารละลายซ้ำ 8 ครั้ง

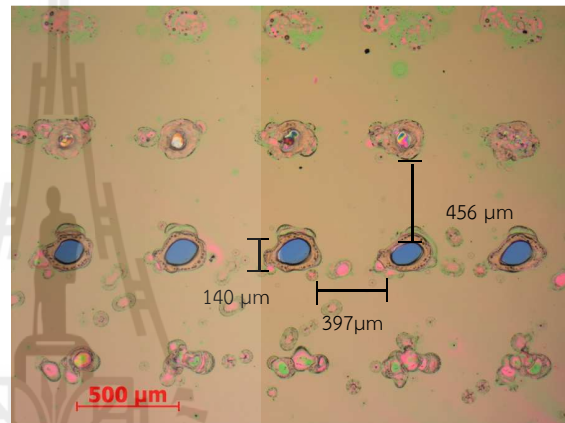
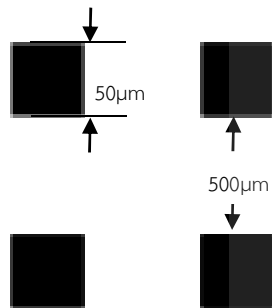


(ซ) ฉีดสารละลายซ้ำ 10 ครั้ง

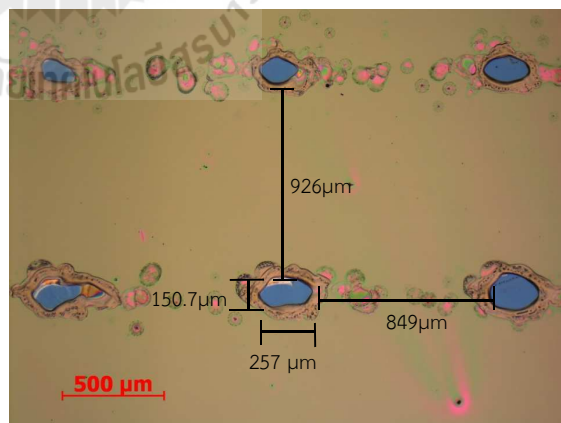
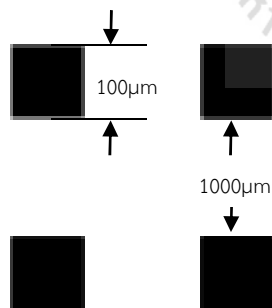
รูปที่ 3.11 (ก)-(ซ) ภาพถ่ายช่องเปิดแบบเส้นตรงของชิ้นไวแสงเมื่อทำการฉีดสารละลายอะซิโตน 1 ครั้ง 2 ครั้ง 3 ครั้ง 4 ครั้ง 5 ครั้ง 6 ครั้ง 8 ครั้ง และ 10 ครั้ง ตามลำดับ



(ก)



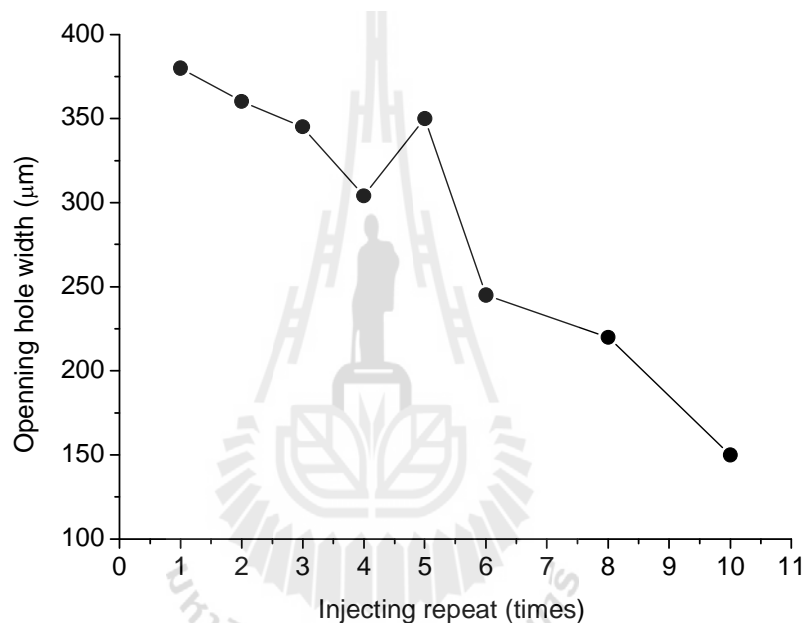
(ข)



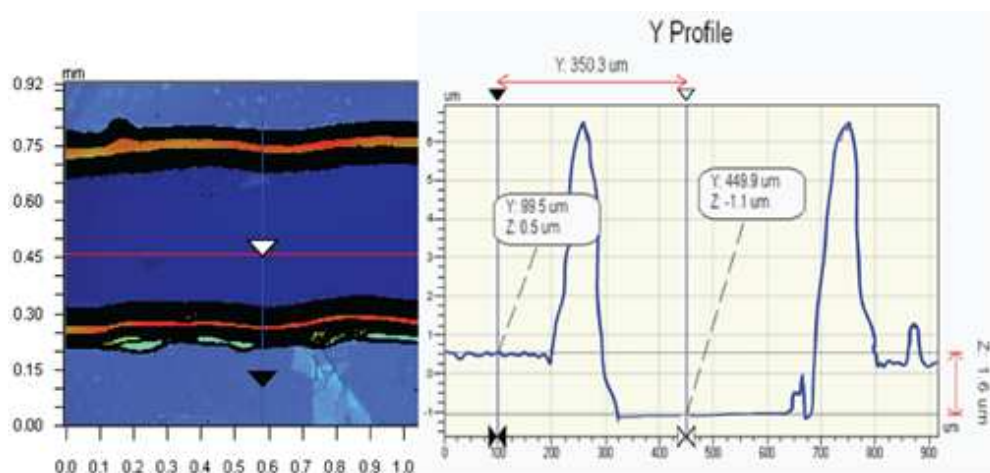
(ค)

รูปที่ 3.12 (ก)-(ค) ลวดลายที่ออกแบบเป็นช่องเปิดสี่เหลี่ยมที่มีขนาดและระยะห่างต่างกัน (ซ้าย) ภาพถ่ายช่องเปิดสี่เหลี่ยมของชั้นไวแสงเมื่อทำการฉีดสารละลายอะซิโตน 10 ครั้ง (ขวา)

จากผลการทดสอบเปิดช่องชั้น SiO_2 โดยผ่านฉีดยาสารทำละลายชั้นฟิล์มสารไวแสงตามโปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้ ก่อนทำการสกัด SiO_2 ด้วยสารละลาย HF พบว่าการเปิดช่องกับละลายเปิดแบบเส้นตรงนั้นมีความเหมาะสมกับเครื่องพิมพ์ที่ทำการปรับปรุงในงานวิจัยนี้ และยังพบว่าจำนวนการฉีดยาสารทำละลายซ้ำนั้นมึผลต่อขนาดของช่องเปิด ความสัมพันธ์ระหว่างการฉีดซ้ำที่เพิ่มขึ้นกับขนาดของช่องเปิดของชั้น SiO_2 ที่ได้แสดงในกราฟรูปที่ 3.13 พบว่าขนาดช่องเปิดของ SiO_2 มีแนวโน้มเล็กลงเมื่อจำนวนการฉีดเพิ่มขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาทำละลายของสารอะซิโตนเกิดขึ้นกับชั้นสารไวแสง และตำแหน่งที่ฉีดซ้ำเกิดเป็นหลุมและสารไวแสงได้หดตัวและเคลื่อนไปรวมกันด้านข้าง ดังนั้นช่องเปิดจึงมีลักษณะเป็นหลุมที่ชัดเจนและลึกขึ้น เส้นโปรไฟล์ที่วัดได้จากกล้อง Optical profile แสดงระยะความสูง y ความกว้าง x และความลึก z ในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนการฉีดซ้ำของสารทำละลายกับขนาดของช่องเปิดที่ได้



รูปที่ 3.14 ภาพด้านบนของช่องเปิดและเส้นโปรไฟล์ที่วัดได้จากกล้อง Optical profiler

3.5 สรุป

วิธีการฉีดด้วยสารละลายเป็นเทคนิคทางเลือกที่มีต้นทุนต่ำสำหรับการสร้างช่องเปิดให้กับชั้นฟิล์ม SiO_2 ที่มีความกว้างไม่น้อยกว่า $150 \mu\text{m}$ โดยที่ไม่พึ่งพาเทคโนโลยีการสร้างลวดลายด้วยวิธีโฟโตลิโทกราฟี ที่มีความซับซ้อนไม่เหมาะกับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงอุตสาหกรรม ช่องเปิดที่ได้จากวิธีนี้มีความคลาดเคลื่อนจากการออกแบบ ดังนั้นผลที่ได้หลังจากการสกัดช่องเปิดชั้น SiO_2 การมีช่องเปิดที่ชั้นพาสซีเวชันด้านหลังที่ประกอบด้วยชั้น SiO_2 บาง ๆ ในสัดส่วนที่เหมาะสมคือไม่เกิน 20% นั้นสามารถส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์ที่สูงขึ้นจากผลของค่า V_{oc} ที่สูงขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงด้วยการให้บริเวณ p^+ ที่มีสภาพความนำไฟฟ้าสูงกว่าแผ่นฐาน p เพื่อให้เกิดบริเวณการสนามไฟฟ้าด้านหลังจากการแพร่ของอะตอมอะลูมิเนียม การทดสอบวัดสมบัติทางไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ของช่องเปิดชั้นพาสซีเวชันด้านหลังจะได้กล่าวในบทที่ 4 ต่อไป



บทที่ 4

กระบวนการผลิตชั้นพาสซีเวชันแบบ LBSF ด้วยวิธีการฉีดสารละลาย

4.1 บทนำ

ค่าประสิทธิผลการแปลงพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ที่สูงขึ้นนั้นมาจากการลดสิ่งสูญเสียที่เกิดขึ้นต่าง ๆ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 การสูญเสียที่มาจากกลไกการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิวด้านหลังนั้นถือว่าการสูญเสียหลักอย่างหนึ่งในเซลล์แสงอาทิตย์ วิธีลดผลกระทบดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ชั้นฉนวนบางเพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่เรียกว่าชั้นพาสซีเวชัน ในบทที่ 4 นี้จะกล่าวถึงวิธีการผลิตชั้นพาสซีเวชันบางส่วนที่ด้านหลังที่เรียกว่า Local back surface field : LBSF หรือโครงสร้างนั้นมีลักษณะเปิดช่องชั้น SiO_2 เพื่อให้เกิดบริเวณ p^+ ในระหว่างช่องเปิดดังกล่าว ทำให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่รอยสัมผัส (R_c) ลดลงส่งผลให้ V_{oc} มีค่าสูงขึ้น ในส่วนการทดสอบนั้นได้ศึกษาผลการเปิดช่องที่มีความกว้างต่าง ๆ ต่อค่าช่วงชีวิตของพาหะ (Life time) กระบวนการผลิตยังได้กล่าวถึงวิธีการสร้างชั้น n-emitter และฟิล์ม SiO_2 ด้วยเทคนิค Spin on dopant (SOD)

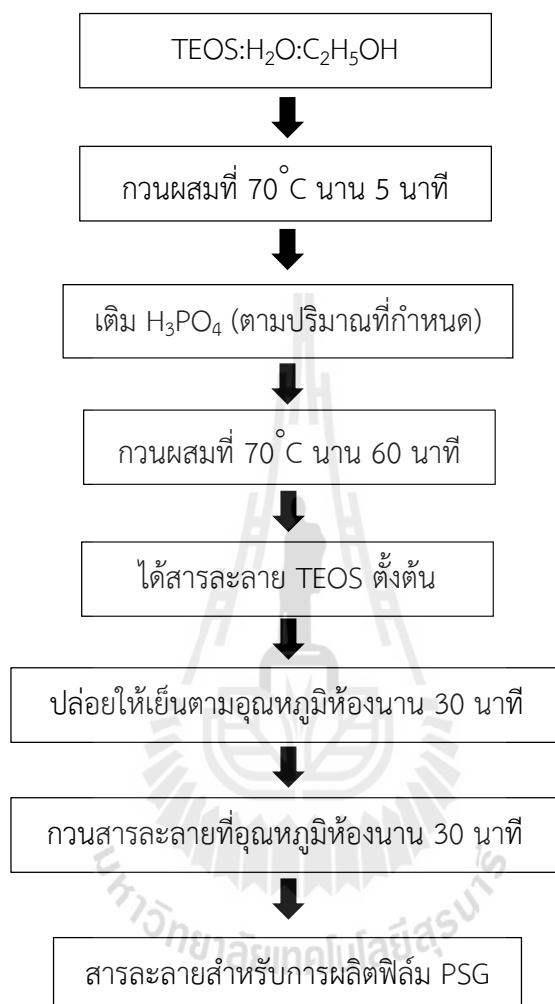
4.2 การผลิตชั้น n-emitter ด้วยวิธี Spin on dopant

Spin on dopant (SOD) คือเทคนิคการผลิตฟิล์มบางด้วยการใช้สารละลายและผ่านกระบวนการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin coating) ฟิล์มบางที่ผลิตได้ด้วยวิธีนี้สามารถเป็นแหล่งของแข็ง (Solid source) ที่มีปริมาณสารเจือจำกัด (Limited source) สำหรับกระบวนการแพร่สารเจือภายในของแข็ง (Solid state diffusion) เพื่อผลิตชั้น n หรือ p โดยระยะความลึกของการแพร่ซึมของสารเจือนั้นควบคุมได้จากอุณหภูมิการแพร่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารเจือ และระยะเวลาการแพร่เช่นเดียวกับวิธีการแพร่ด้วยความร้อน (Thermal diffusion) ข้อดีของวิธีการใช้ฟิล์มบางที่เคลือบอยู่กับแผ่นฐานซิลิคอนคือการลดขั้นตอน pre-deposition ซึ่งพิจารณาว่ามีปริมาณสารเจือแพร่ในของแข็งอย่างไม่มีจำกัด (Unlimited source)

4.2.1 การสังเคราะห์สารละลายฟอสฟอรัสสำหรับฟิล์ม PSG

ในการวิจัยนี้ได้สังเคราะห์สารละลายฟอสฟอรัสที่มีส่วนประกอบหลักของสารละลายเตตระเอธิลโอโรซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate, TEOS) และสารละลายกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เพื่อให้ได้ฟิล์มบางฟอสฟอซิลิเกต (Phosphosilicate glass, PSG) ที่สามารถควบคุมปริมาณสารเจือฟอสฟอรัสได้จากความเข้มข้นของ H_3PO_4 หลังจากได้ฟิล์ม PSG แล้วกระบวนการแพร่ด้วยความร้อนสูงจะทำให้อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสแพร่ซึมในแผ่นฐานรองชนิด p บริเวณที่มีการแพร่ซึมจะก่อตัวเป็นชั้น n ในที่สุด การเตรียมสารละลายสำหรับฟิล์ม PSG มีขั้นตอนการคำนวณปริมาณการเติมสารเจือแสดงได้ดังภาคผนวก ก

รูปที่ 4.1 แสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลายสำหรับผลิตฟิล์ม PSG โดยที่สารละลายตั้งต้นประกอบด้วย TEOS น้ำ และเอทานอล มีสัดส่วนต่าง ๆ กันแสดงในรายละเอียดการเตรียมสารละลายในตารางที่ 4.1 ซึ่งมีสัดส่วนความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นจากอัตราส่วนระหว่าง TEOS : H₃PO₄ ที่ 6 : 1 5 : 1 และ 4 : 1

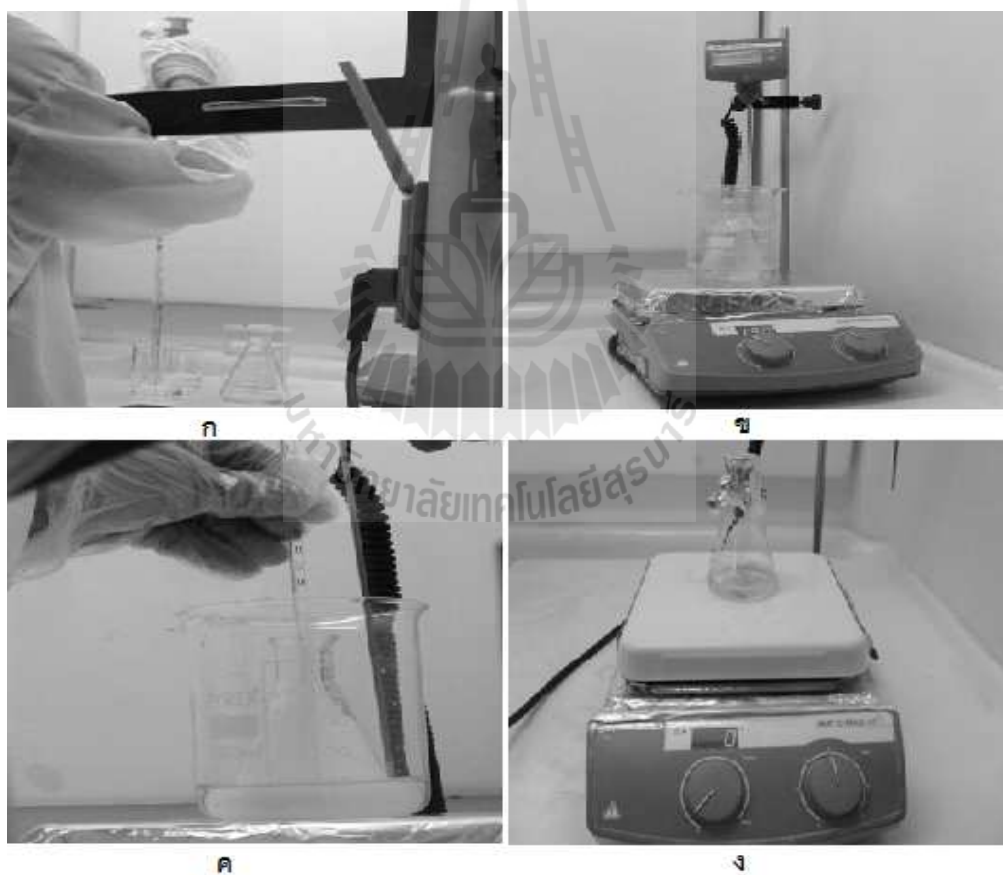


รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายสำหรับการผลิตฟิล์ม PSG

ในขั้นตอนเริ่มต้นทำการเตรียมสารละลายส่วนผสมของ TEOS H₂O และ C₂H₅OH ตามสัดส่วนในเงื่อนไขที่กำหนดในตารางที่ 4.1 ต่อมากวนด้วยเครื่องกวนระบบใช้แท่งแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) ที่อุณหภูมิ 70 °C เมื่อกวนผ่านไป 5 นาที หยด H₃PO₄ อย่างช้า ๆ ประมาณ 1 หยดต่อวินาที จนได้ตามปริมาณที่กำหนด จากนั้นกวนส่วนผสมต่อที่อุณหภูมิ 70 °C นาน 60 นาที เมื่อครบกำหนดเวลาแล้ว ปลอ่ยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที รูปที่ 4.2 แสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลายสำหรับผลิตฟิล์ม PSG SOD

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการเตรียมสารละลายสำหรับฟิล์มฟอสฟอซิลิเกต

TEOS : H ₃ PO ₄ = 4 : 1	TEOS	H ₂ O	C ₂ H ₅ OH	H ₃ PO ₄	Volume
Volume ratio (ml)	5	10	1.5	1.25	17.75ml
Mole ratio (mole)	0.0224	0.5732	0.0257	0.0183	
TEOS : H ₃ PO ₄ = 5 : 1	TEOS	H ₂ O	C ₂ H ₅ OH	H ₃ PO ₄	Volume
Volume ratio (ml)	5	10	1.5	1	17.50ml
Mole ratio (mole)	0.0224	0.5732	0.0257	0.0146	
TEOS : H ₃ PO ₄ = 6 : 1	TEOS	H ₂ O	C ₂ H ₅ OH	H ₃ PO ₄	Volume
Volume ratio (ml)	5	10	1.5	0.83	17.33ml
Mole ratio (mole)	0.0224	0.5732	0.0257	0.0122	



รูปที่ 4.2 (ก) การตวงสารละลาย TEOS:H₂O:C₂H₅O ด้วยหลอดตวงปิเปต (ข) กวนผสมที่อุณหภูมิ 70 °C (ค) หยดสาร H₃PO₄ ตามปริมาณที่กำหนด (ง) กวนส่วนผสมที่อุณหภูมิห้อง นาน 60 นาที

4.2.2 การผลิตฟิล์ม PSG ด้วยวิธี Spin coating

สารละลายฟอสฟอรัสที่มีเงื่อนไขความเข้มข้นของสารเจือฟอสฟอรัสต่าง ๆ นั้นจัดเป็นสารละลายตั้งต้นสำหรับการผลิตฟิล์ม PSG เป็นเตรียมได้นั้นสามารถควบคุมปริมาณหลังจากได้สารละลายที่เตรียมได้แล้ว ได้นำสารละลายดังกล่าวเข้าสู่กระบวนการผลิตฟิล์มบาง PSG บนแผ่นฐานซิลิคอนชนิด p ซึ่งจำเป็นต้องผ่านกระบวนการทำความสะอาดแผ่นฐานซิลิคอน ในการวิจัยนี้ได้ใช้สูตร RCA1 และ RCA2 แสดงรายละเอียดดังนี้

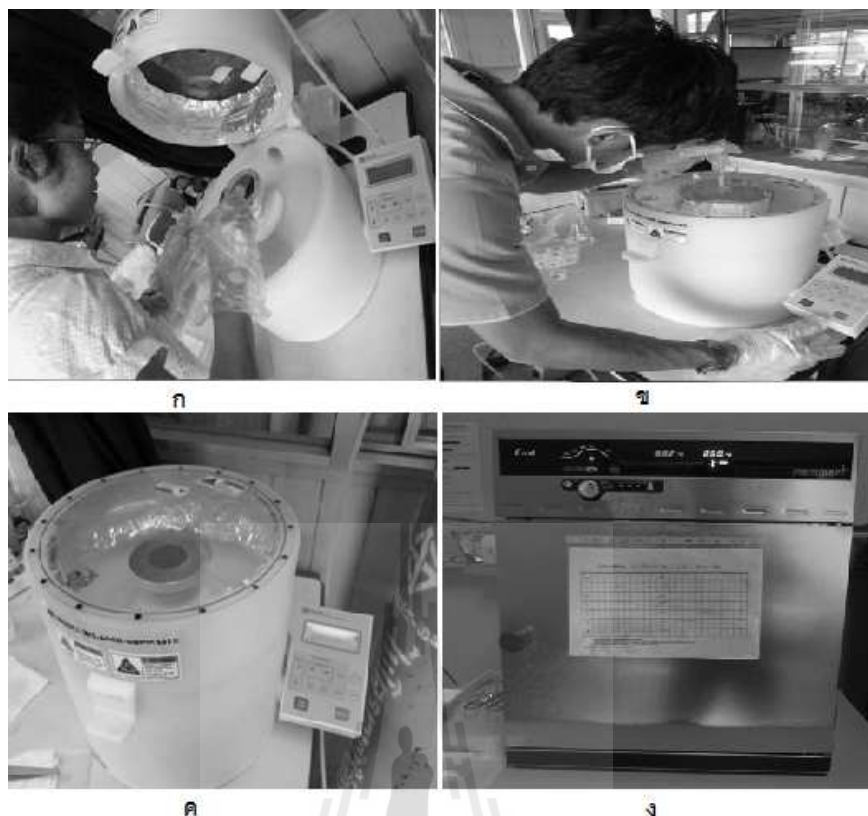
1) RCA 1 เป็นกระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ (Organic) ที่ปนเปื้อนที่ผิวแผ่นฐานซิลิคอน โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนดังนี้

- เตรียมส่วนผสมของสารละลายที่มีอัตราส่วน H_2O_2 (30%) : NH_4 (28-30%) : น้ำ DI เท่ากับ 1 : 1 : 5
- แช่แผ่นซิลิคอนลงในสารละลายที่เตรียมได้ และเพิ่มอุณหภูมิและคงที่ ที่ $70^{\circ}C$ เป็นเวลา 10 นาที
- ล้างสารละลายออกจากแผ่นซิลิคอนด้วยน้ำ DI โดยให้น้ำไหลผ่านแผ่นซิลิคอนนาน 5 นาที
- เป่าแผ่นซิลิคอนให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ (Pure Nitrogen, N_2)

2) RCA 2 เป็นกระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเพื่อกำจัดสารโลหะ (Metal) ที่ปนเปื้อนที่ผิวแผ่นฐานซิลิคอน โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนดังนี้

- ผสมสารละลายที่มีอัตราส่วน H_2O_2 (30%) : HCL (36.5-38%) : น้ำ DI เท่ากับ 1 : 1 : 5
- แช่แผ่นซิลิคอนในสารละลายและเพิ่มอุณหภูมิและคงที่ ที่ $70^{\circ}C$ เป็นเวลา 10 นาที
- ล้างสารละลายออกจากแผ่นซิลิคอนด้วยน้ำ DI โดยให้น้ำไหลผ่านแผ่นซิลิคอนนาน 5 นาที
- เป่าแผ่นซิลิคอนให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ (Pure Nitrogen, N_2)

ในการศึกษานี้ได้ใช้วิธีขึ้นรูปฟิล์ม PSG ด้วยวิธีการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง (Spin on coating) ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถให้ฟิล์มบางมีความหนาสม่ำเสมอ ที่ความหนาระดับไม่กี่นาโนเมตรได้ และผ่านกระบวนการอบอุณหภูมิต่ำประมาณ $200^{\circ}C$ นาน 30 นาที เพื่อให้ฟิล์มยึดเกาะที่ผิวและให้สารตัวทำละลาย C_2H_5O ระเหยออกจากฟิล์ม อีกทั้งฟิล์มที่ได้มีผิวที่ปราศจากรอยแตกร้าวค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิการอบมีค่าต่ำประมาณ $1^{\circ}C$ ต่อนาที ผิวของฟิล์มหลังการอบอุณหภูมิต่ำ ภาพขั้นตอนการผลิตฟิล์ม PSG แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 (ก) วางแผ่น Si บนแท่นหมุนของเครื่อง Spin coater (ข) หยดสารละลายบนแผ่น Si (ค) ขณะที่เครื่อง Spin coater กำลังทำงานและสารละลายกำลังเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงบนชิ้นงาน (ง) อบฟิล์มในเตาอบที่อุณหภูมิ 200°C นาน 15 นาที

เมื่อได้ฟิล์ม PSG บนแผ่นซิลิคอนแล้วจากกระบวนการข้างต้น กระบวนการแพร่สารเจือในช่องแข็งที่อุณหภูมิสูงนั้นเป็นวิธีพื้นฐานในการแพร่สารเจือเพื่อให้ได้ชั้น n-emitter ในการศึกษานี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิการแพร่ตั้งแต่ 800°C ถึง 1000°C ระยะห่างกัน 50°C และความเข้มข้นของสารเจือฟอสฟอรัสในฟิล์ม PSG ที่ต่างกันจากการเตรียมสารละลายตามตารางที่ 4.1 ที่จะมีผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่น (Sheet resistivity, ρ_s) ของชั้น n

กรณีนี้ได้ใช้ขั้นตอนการแพร่ที่อุณหภูมิสูงเพียงขั้นตอนเดียว และพิจารณาหลักการแพร่แบบปริมาณสารเจือที่ผิวมีค่าคงที่ เพื่อกำหนดลักษณะการกระจายของสารเจือที่เข้าไปในผลึกซิลิคอน โดยพิจารณาในกรณีที่มีปริมาณจำนวนอะตอมของสารเจือต่อหนึ่งหน่วยตารางหน่วยที่ผิวแผ่นซิลิคอนมีค่าไม่จำกัด เช่นมี Q อะตอม/ตารางเมตร กล่าวคือมีความหนาแน่นอะตอมสารเจือภายใน Si และมีลักษณะการกระจายดังรูปที่ 4.5 และกำหนดความหนาแน่นของสารเจือที่ผิวเป็น N_0 ซึ่งให้คงที่ตลอดการแพร่ แสดงเงื่อนไขเริ่มต้น และขอบเขตของเงื่อนไขได้ในสมการที่ (4.1) การกระจายและระยะลึกของการแพร่สามารถ

ควบคุมด้วยเวลาการแพร่ จากการใช้ขอบเขตของเงื่อนไขดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ในกฎสมการของ Fick ในสมการที่ (4.2) และสามารถแก้สมการเป็นความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.3)

$$\begin{aligned} \text{Boundary condition} \quad N(0,t) &= N_0 \\ N(\infty,t) &= 0 \\ N(x,0) &= 0 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Fick's second law

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (4.2)$$

$$\text{และ} \quad N(x,t) = N_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (4.3)$$

$$N(x,t) = N_0 \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (4.4)$$

โดยที่ $N(x,t)$ คือความหนาแน่นสารเจือที่ตำแหน่ง x ที่ห่างจากผิวหน้าลงไปบนแผ่นผลึกในช่วงเวลา t ใด ๆ

N_0 คือปริมาณสารเจือคงที่ที่ผิวที่ไม่ขึ้นกับเวลาการแพร่ ในกรณีนี้หมายถึงสารเจือฟอสฟอรัสในฟิล์ม PSG ต่อหน่วยพื้นที่

D คือค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ของสารเจือที่อุณหภูมิทำการแพร่นั้น (cm^2/sec)

\sqrt{Dt} คือระยะความยาวของการแพร่ซึม (Diffusion length, cm)

t คือช่วงเวลาของการแพร่ (second)

x คือระยะความลึกที่เกิดการแพร่ในแผ่นผลึก (cm)

erfc คือฟังก์ชัน Complementary error

ระยะเวลาที่ใช้ในการแพร่นั้นเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดระยะความลึกของสารเจือที่แพร่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำ ปริมาณอะตอมสารเจือทั้งหมดต่อหน่วยพื้นที่ $Q(t)$ สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ว่า

$$Q(t) = \int_0^{\infty} N(x,t) dx \quad (4.5)$$

แทนสมการ (4.4) ลงในสมการที่ (4.5) จะได้ว่า

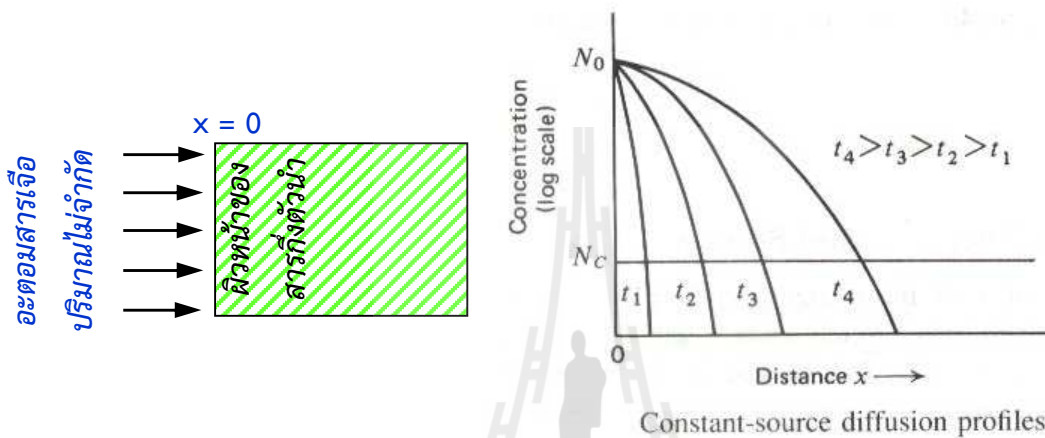
$$Q(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_0 \sqrt{Dt} = 1.13 N_0 \sqrt{Dt} \quad (4.6)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการ (4.5) แสดงให้เห็นว่าปริมาณอะตอมสารเจือ $Q(t)$ แสดงถึงพื้นที่ใต้กราฟ profile การแพร่ของการพล็อตในสเกลเชิงเส้น แสดงในกราฟรูปที่ 4.4 ซึ่งสามารถประมาณเป็น

รูปสามเหลี่ยม มีความสูงเท่ากับ N_0 และมีฐานเท่ากับ $2\sqrt{Dt}$ ทำให้ $Q(t) \cong N_0\sqrt{Dt}$ มีค่าเข้าใกล้สมการที่ (4.6)

ปริมาณสารเจือสัผัสที่ระยะ x ใด ๆ แสดงถึง gradient ของการเปลี่ยนแปลง profile การแพร่ dN/dx ซึ่งสมการได้จากการอนุพันธ์ในสมการที่ (4.4)

$$\left. \frac{dN}{dx} \right|_{x,t} = -\frac{N_0}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-x^2/4Dt} \quad (4.7)$$



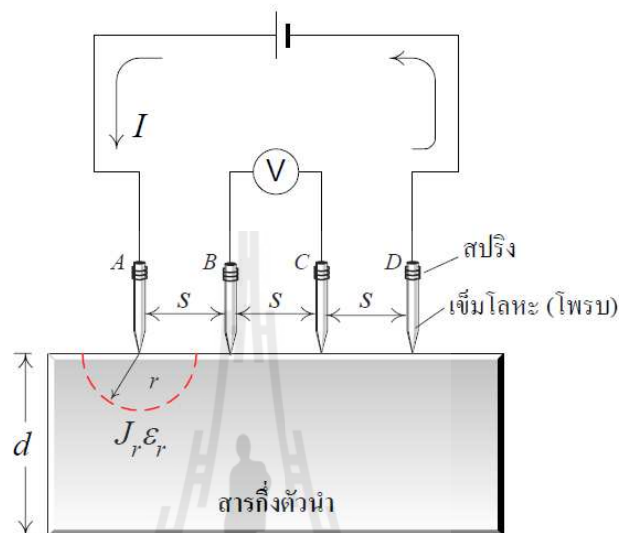
รูปที่ 4.4 ลักษณะการกระจายความหนาแน่นของอะตอมสารเจือจากผิวไปยังความลึก x ต่าง ๆ ในแผ่นผลึก

ในกระบวนการแพร่ในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดเงื่อนไขการเจือสารที่อุณหภูมิตั้งแต่ 800°C ถึง 1000°C และเวลา 60 นาที อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนในเตาเผาเท่ากับ 100 sccm ซึ่งถือเป็นค่ามาตรฐานในการแพร่ซึมสารเจือโดยทั่วไป หลังจากแพร่สารเจือด้วยความร้อนแล้วได้ทำการกำจัดฟิล์มซิลิเกต (Phosphosilicate glass, PSG) บนผิวชั้นเอ็นทีได้ โดยแช่ในสารละลาย HF 5% นาน 3 นาที แล้วล้างด้วยน้ำ DI โดยให้น้ำไหลผ่านนาน 5 นาที จากนั้นนำไปแช่ในสารละลาย BHF (HF : HNO₃ : H₂O = 15 ml : 10ml : 300ml) โดยปริมาตรจากขวด นาน 1 นาที จากนั้นล้างน้ำ DI โดยให้น้ำไหลผ่านนาน 5 นาทีและเป่าแห้งด้วย ไนโตรเจนบริสุทธิ์

4.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น n-emitter

หลังจากสกัดฟิล์ม PSG เพื่อทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่น (Sheet resistivity, ρ_s) ของชั้น n-emitter ที่อยู่บนแผ่นฐานชนิด p โดยทั่วไปค่า ρ_s ได้จากการวัดด้วยเทคนิคแบบ 4-point probes ซึ่งค่าที่ได้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีผลต่อค่าอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะแบบ Auger ในกรณีนี้ ρ_s ของชั้น n-emitter มีค่าสูงเกินไป ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้เครื่องวัดความต้านทานแบบสี่หัวเข็ม (4-

point probe) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่า โดยระยะห่างของเข็มวัด (S) อยู่ห่างกันเท่าๆกัน โดยทั่วไปมีค่าราว 0.5 - 1 มิลลิเมตร แสดงภาพจำลองในรูปที่ 4.6 ในการวัดนั้นจำเป็นต้องปล่อยกระแสคงที่เข้าที่เข็มด้านนอก A และ D ทำให้กระแสไหลผ่านชั้น n-emitter เนื้อสารกึ่งตัวนำ ไปยังเข็ม D จึงเกิดมีแรงดันตกคร่อมเนื้อสารและถูกวัดออกมาที่ขั้ว B และ C นำ ค่ากระแสคงที่ I และแรงดัน V ที่วัดได้มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้



รูปที่ 4.5 ภาพจำลองการวัดความต้านทานแบบ 4-point probes

ในการวิเคราะห์ทำได้โดยพิจารณาว่า ขนาดของชั้นสารกึ่งตัวนำ นี้มีขนาดใหญ่และมีความหนา (d) มากกว่าระยะห่างระหว่างเข็ม (S) หรือ $d \gg S$ กระแสจากขั้ว A จึงสามารถผ่านออกไปที่ขั้ว D ได้ ความหนาแน่นของกระแสจากขั้ว A จะกระจายออกไปยังเนื้อสารกึ่งตัวนำ ซึ่งความหนาแน่นของกระแส (J_r) ที่รัศมี r ใดๆที่กระจายออกไป จากจุด A คือ

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

โดย $2\pi r^2$ คือครึ่งหนึ่งของพื้นที่ผิวของทรงกลมที่มีรัศมี r (Surface area of the sphere = $2\pi r^2$) จากกฎของโอห์ม สนามไฟฟ้า ϵ_r ที่กระจายออกไปที่รัศมี r ในเนื้อสาร แสดงสมการที่ (4.2)

$$\epsilon_r = \frac{J}{\sigma_o} = \frac{I}{2\pi r^2 \sigma_o} \quad (4.2)$$

โดย σ_o คือค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะของวัสดุ พิจารณาปริมาตรแบบ semi-infinite หน่วย S.cm

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

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

ดังนั้นค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะของวัสดุ หน่วย $S \cdot cm$ แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\sigma_o = \frac{I}{2\pi S} \left(\frac{I}{V} \right) \quad (4.4)$$

ดังนั้นสภาพต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (Resistivity, ρ_o) ของวัสดุ หน่วย Ω/cm คือ

$$\rho_o = \frac{1}{\sigma_o} = 2\pi S \frac{V}{I} \quad (4.5)$$

ในกรณีของการวัดขึ้นสารกึ่งตัวนำที่มีความหนา (d) น้อยกว่าระยะห่างระหว่างเข็ม (S) ไม่น้อยกว่า 5 เท่า หรือ $d \leq 5S$ ดังนั้นสมการที่ (4.5) จึงเกี่ยวข้องกับค่าตัวแปรความถูกต้องของความหนา (Thickness collection factor, a) แสดงได้เป็น

$$\rho_o = 2\pi S a \frac{V}{I} \quad (4.6)$$

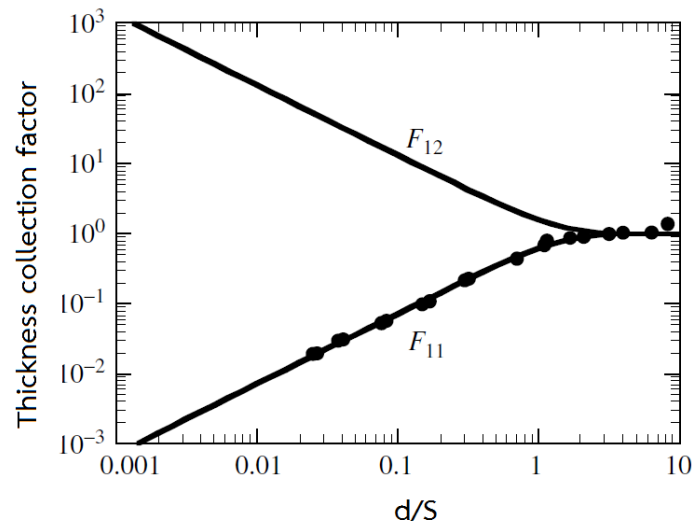
โดยที่ a คือค่าปัจจัยความถูกต้องของความหนาวัสดุ (Thickness collection factor, a)

การพิจารณารูปความสัมพันธ์ระหว่าง a และ d/S เมื่อสัดส่วนของ $d/S \geq 5S$ แล้วค่า $a = 1$ ดังนั้นค่าปัจจัยความถูกต้องไม่จำเป็นต้องพิจารณา ในกรณีความหนาของชิ้นงานนั้นมีค่าไม่น้อยกว่า 5 เท่าของระยะห่างเข็ม โดยทั่วไป S อยู่ระหว่าง 25-60 mm ส่วนใหญ่ความหนาของชิ้นงานมีค่าประมาณ 10-20 mm ทำให้ไม่สามารถละทิ้งค่าปัจจัยความถูกต้องได้ เมื่อพิจารณารูปความสัมพันธ์ระหว่าง a และ d/S แบบ log-log ในส่วนที่เป็นเส้นตรงที่ $t/S \leq 0.5$ ดังรูปที่ 4.6 สมการของ a แสดงได้ดังนี้

$$a = K \left(\frac{t}{S} \right)^m \quad (4.7)$$

โดยที่ K คือค่าของ a ที่ $d/S = 1$

m คือค่าความชันของเส้นตรงในกราฟ



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยความถูกต้องของความหนาและ d/S จากการวัด 4-point probes

เมื่อค่า $m = 1$ แล้วค่า $K = 0.72$ หรือเท่ากับ $1/2\ln(2)$ ดังนั้น ค่า a จึงมีค่าเท่ากับ

$$a = \frac{t}{2\ln(2)S} \quad (4.8)$$

เมื่อแทน a ลงในสมการที่ (4.6) จะได้ค่า

$$\rho = \frac{\pi}{\ln(2)} t \frac{V}{I} = 4.532 \times t \frac{V}{I} \quad (4.9)$$

ชิ้นงานทุกชิ้นที่ผลิตได้จะนำมาวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ρ ตามสมการข้างต้น ซึ่งต้องรู้ค่าความหนา ทำให้ค่า ρ มีหน่วยเป็น $\Omega \cdot \text{cm}$ โดยที่ระยะ $t/S \leq 0.5$ สำหรับกรณีการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางหมายถึงมีค่าความหนาน้อยมาก ส่วนใหญ่เป็นกรณีของชั้นที่มีการแพร่ซึมสารเจือต่างชนิดกับแผ่นฐานนั้นจะวัดเป็นค่าความต้านทานแผ่น (Sheet resistivity, ρ_s) มีหน่วยเป็น Ω/square แสดงในสมการที่ (4.10)

$$\rho_s = \frac{\rho}{t} = 4.532 \frac{V}{I} \quad \text{โดยที่ระยะ } t/S \leq 0.5 \quad (4.10)$$

ผลการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น n ในเงื่อนไขสัดส่วนความเข้มข้น TEOS:H₃PO₄ 4:1 5:1 และ 6:1 ที่ได้จากการแพร่ในเงื่อนไขอุณหภูมิการแพร่ระหว่าง 800 °C - 1000 °C ที่เวลา 60 นาที ในบรรยากาศ N₂ จำนวนวัดซ้ำในบริเวณต่าง ๆ 4 บริเวณต่อ 1 ชิ้นงาน แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น n ในเงื่อนไขสัดส่วนความเข้มข้น TEOS:H₃PO₄ ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 800 °C - 1000 °C เป็นเวลา 60 นาที

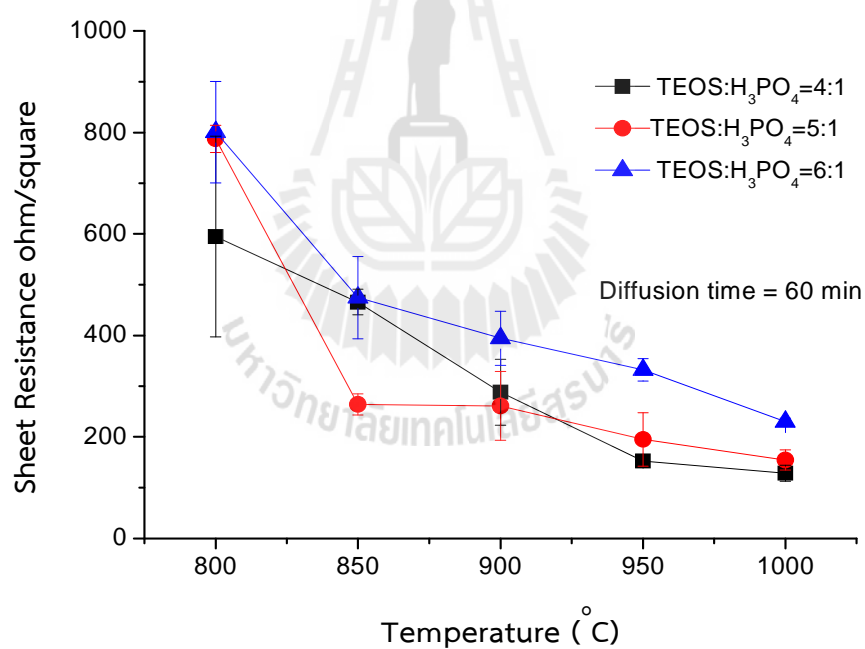
Diffusion temperature (°C)	ค่า ρ_s (Ω /square) ที่ TEOS:H ₃ PO ₄ Volume ratio		
	4:1	5:1	6:1
800	594.75±16.65%	787.25±1.71%	800.75±6.24%
850	465.75±2.68%	264.25±3.97%	474.50±8.54%
900	288.00±11.28%	261.00±13.03%	394.50±6.72%
950	152.50±1.97%	195.00±13.59%	332.00±3.31%
1000	128.50±6.23%	154.50±6.47%	229.75±1.52%

จากผลการวัดค่า ρ_s ของชั้น n ในตารางที่ 4.2 สังเกตเห็นว่าเพิ่มอุณหภูมิในการแพร่ซึมสารเจือส่งผลต่อค่า ρ_s ลดลงและมีค่าความแปรปรวนน้อยกว่าที่การแพร่อุณหภูมิต่ำ แต่เมื่อความเข้มข้นของฟอสฟอรัสลดลงจากการเปลี่ยนอัตราความเข้มข้น TEOS:H₃PO₄ จาก 4:1 เป็น 5:1 และ 6:1 ตามลำดับ ภายใต้อุณหภูมิและเวลาเงื่อนไขเดียวกันแล้ว ค่า ρ_s ของชั้น n นั้นมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ในกราฟที่ 4.7 ดังนั้นในการศึกษานี้ได้เลือกอัตราส่วนความเข้มข้น TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 4:1 ภายใต้อุณหภูมิการแพร่สารเจือ 1000 °C

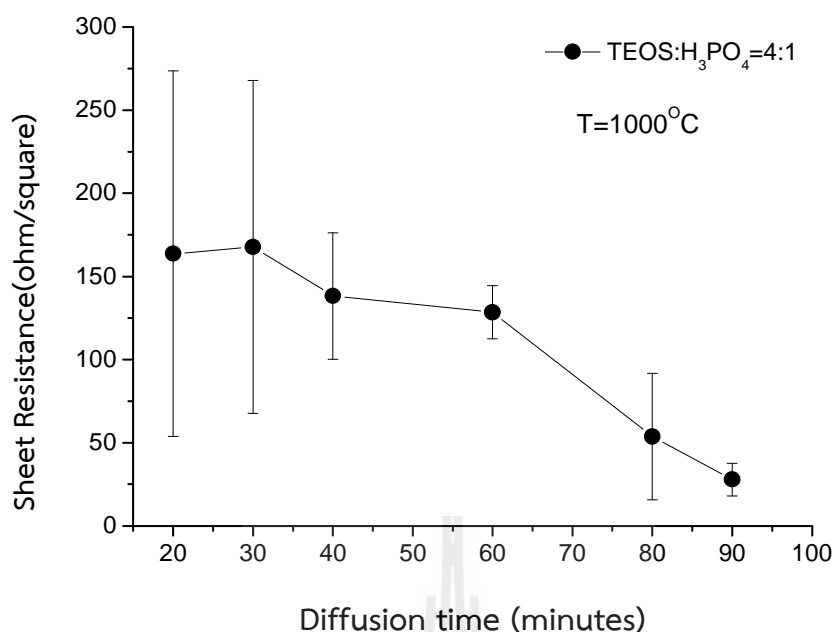
การศึกษาค้นหาความสัมพันธ์ของเวลาการแพร่ที่มีผลต่อค่า ρ_s แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาในการแพร่ซึมสารเจือแล้ว ค่า ρ_s ของชั้น n นั้นมีค่าลดลง แสดงกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.8 จากผลพบว่า ρ_s มีค่าความแปรปรวนสูงที่ระยะเวลาการแพร่สารเจือที่เวลาสั้น ๆ และพบว่าที่ระยะเวลาการแพร่ 60 นาทีนั้นให้ค่า ρ_s ที่ใกล้เคียงกับค่าของเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานที่มีค่าประมาณ 60-100 Ω /square ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกเงื่อนไขการแพร่ซึมสารเจือด้วยอัตราส่วน TEOS: H₃PO₄ เท่ากับ 4: 1 ที่อุณหภูมิ 1000 °C ใช้เวลาในการแพร่สารเจือนาน 60 นาที เพื่อเป็นรอยต่อ p-n ที่ให้ค่า ρ_s ที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้นเอ็นเจือไอเวลาการแพร่สารเจือที่ต่างกัน โดยที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 4:1 ภายใต้อุณหภูมิ 1000 °C

Diffusion time (minutes)	Diffusion temperature at 1000 °C TEOS:H ₃ PO ₄ 4 : 1
	ค่าเฉลี่ยของ ρ_s (Ω /square)
20	163.75±33.59%
30	167.75±29.81%
40	138.25±13.74%
60	128.50±6.23%
80	53.75±35.35%
90	27.83±17.43%



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าแผ่นของชั้น n กับค่าอัตราส่วนความเข้มข้นของ TEOS:H₃PO₄ ที่เจือไอ 4:1 5:1 และ 6:1 และเจือไออุณหภูมิการแพร่ 800 °C - 1000 °C



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นของชั้นเอ็นที่วัดได้ กับเวลาในการแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ 1000°C

4.4 การคำนวณหาความหนาของชั้นเอ็น (X)

จากผลการวัดค่าความต้านทานแผ่นของชั้น n ในหัวข้อ 4.3 เราสามารถประมาณค่าความลึกของชั้น n ได้ง่าย และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้อะตอมสารเจือมีค่าจำกัดในการแพร่ ดังนั้นวิธีการคำนวณจึงใช้เงื่อนไขการแพร่แบบ Gaussian distribution จากค่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในหมึกสารละลายได้รายการละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก จากเงื่อนไขการเตรียมหมึกฟอสฟอรัสที่มีเงื่อนไขของสัดส่วน TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 4:1 5:1 และ 6:1 นั้นให้ความหนาแน่นของฟอสฟอรัสที่ต่างกันแสดงค่าในตารางที่ 4.7 และเมื่อนำไปคำนวณหาความหนาแน่นที่ได้ก็นำมาคำนวณหาความลึกของชั้นเอ็นดังแสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก แสดงผลในตารางที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.4 ความหนาแน่นอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสในเงื่อนไขของค่าสัดส่วนของ TEOS:H₃PO₄

สัดส่วนของ TEOS : H ₃ PO ₄	ความหนาแน่นของฟอสฟอรัสในสารละลายหมึก (cm ⁻³)
4 : 1	6.21×10^{20}
5 : 1	5.02×10^{20}
6 : 1	4.24×10^{20}

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณความลึกของชั้นเอ็นตามเงื่อนไขการแพร่สารเจือที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 4:1 5:1 และ 6:1 ภายใต้อุณหภูมิระหว่าง 800 °C - 1000 °C เป็นเวลา 60 นาที

Diffusion temperature (°C)	ค่า X (µm) ที่เวลาการแพร่เท่ากับ 60 นาที ในสัดส่วน TEOS:H ₃ PO ₄		
	4 : 1	5 : 1	6 : 1
800	0.025	0.025	0.025
850	0.061	0.061	0.060
900	0.138	0.137	0.135
950	0.292	0.288	0.285
1000	0.580	0.572	0.567

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณความลึกของชั้นเอ็นตามเงื่อนไขเวลาในการแพร่สารเจือที่ต่างกัน โดยที่อัตราความเข้มข้น TEOS:H₃PO₄ เท่ากับ 4:1 ภายใต้อุณหภูมิ 1000 °C

Diffusion time (minute)	ค่า X (µm) ที่อุณหภูมิการแพร่ 1000 °C ในสัดส่วน TEOS:H ₃ PO ₄ = 4 : 1
20	0.33
30	0.41
40	0.47
60	0.58
80	0.67
90	0.71

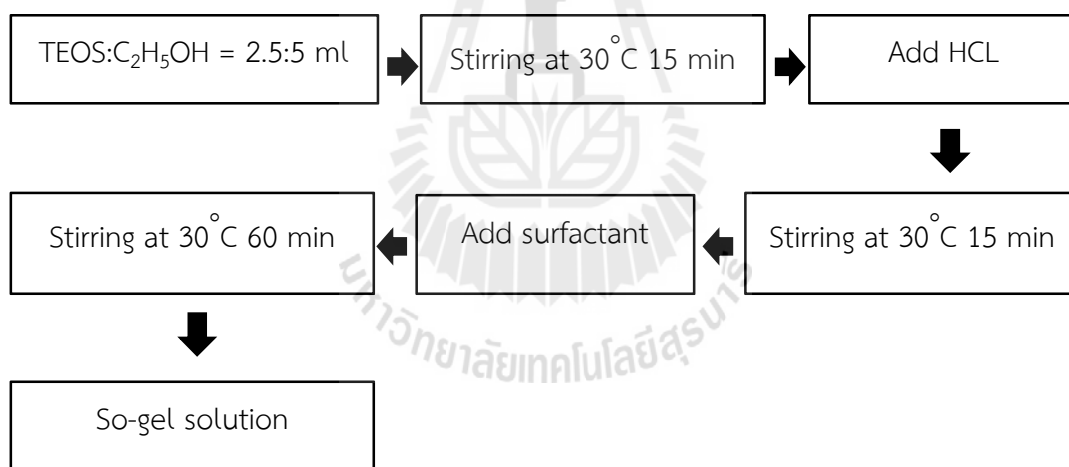
จากผลการคำนวณความหนาแน่นสารเจือพบว่ามีค่าสูงขึ้นแต่ทั้งหมดอยู่ในระดับ 10^{20} อะตอม/cm³ ตามค่าสัดส่วนของฟอสฟอรัสสูงขึ้นจากสัดส่วนของ TEOS:H₃PO₄ ลดลงจาก 6:1 ไปถึง 4:1 ค่าความหนาแน่นของฟอสฟอรัสนั้นพิจารณาเป็นค่า N_o ในสมการที่ (4.4) ซึ่งระดับความลึกของชั้น n นั้นมีความสัมพันธ์แปรตามกับอุณหภูมิการแพร่

4.5 การสร้างชั้นไดอิเล็กทริกซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย Sol-gel

ในการศึกษานี้ได้ผลิตชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นชั้นไดอิเล็กทริกสำหรับชั้นพาสซีเวชันด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการเคลือบสารละลาย Sol-gel และเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง ขั้นตอนการเตรียมแสดงดังต่อไปนี้

4.5.1 การเตรียมสารละลายตั้งต้นสำหรับสร้างฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์

สารละลายตั้งต้นประกอบด้วย Tetraethylorthosilicate [$\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ (TEOS, 98% Fluka) และ Ethanol absolute [$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, (99% BDH) (EtOH)] โดยที่อัตราส่วนของสารละลาย TEOS : EtOH = 2.5 : 5 ml เป็นอัตราส่วนโดยปริมาตรและกวนผสมด้วยเครื่องกวนแท่งแม่เหล็กที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCL) ปริมาณ 0.06 ml จากนั้นกวนต่อไปอีก 15 นาที จึงเติมสารลดแรงตึงผิว Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide [$\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{BrN}$ (CTAB, 99% Sigma Aldrich)] ลงไปจำนวน 4.49 ml (การคำนวณความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดแสดงในภาคผนวก ข) จากนั้นกวนผสมที่อุณหภูมิ 30°C นาน 60 นาที จึงได้สารละลายตั้งต้นสำหรับผลิต SiO_2 รายละเอียดขั้นตอนการเตรียมแสดงในแผนภาพรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แผนภาพขั้นตอนการเตรียมสารละลาย Sol-gel สำหรับผลิตฟิล์ม SiO_2

4.5.2 ฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยเทคนิคเคลือบแบบหมุนเหวี่ยง

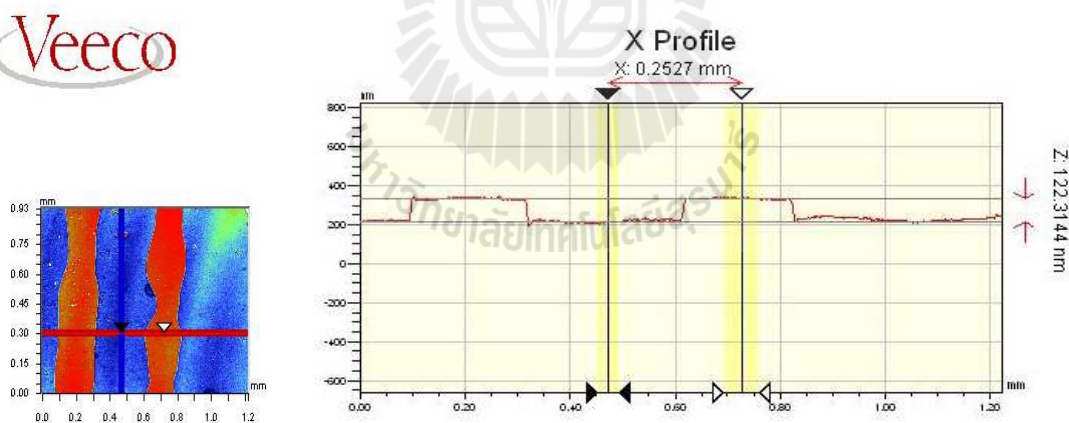
แผ่น p-Si ด้านหลังที่ผ่านการสร้างรอยต่อพี-เอ็นได้นำมาเคลือบสารละลาย Sol-gel ด้วยเครื่อง Spinner ยี่ห้อ LAURELL รุ่น WS-400B-8NPP/LITE ในเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความหนา SiO_2 ประมาณ 100 nm จากการทดสอบภายใต้เงื่อนไขความเร็วหมุนเหวี่ยงต่าง ๆ นั้นพบว่าความหนาของฟิล์ม SiO_2 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วการหมุนลดลง และความหนาของฟิล์มลดลงจากการอบที่อุณหภูมิ 500°C แสดงข้อมูลในตารางที่ 4.7 จากการทดลองพบว่าค่าที่เหมาะสมคือความเร็วการหมุนเหวี่ยง 6000 รอบต่อ

นาทีนาน 30 วินาที สำหรับการอบด้วยความร้อนได้นำผลการศึกษาที่ผ่านมาของผู้วิจัย [T. Fangsuwannarak, et al., 2014) ในเงื่อนไข อบแห้งที่ 70 °C และ 500 °C นาน 30 นาที เพื่อให้ได้ค่าดัชนีหักเหแสงของ SiO₂ มีค่าใกล้เคียง 2 งานวิจัยนี้ใช้กระบวนการให้ความร้อนต่ำ เนื่องจากไม่ต้องการให้เกิดผลกระทบต่อสารแพร่สารเจือในชั้น n-Si ด้านบน

ตารางที่ 4.7 เงื่อนไขการทดลองและผลของความหนาจากการวัดด้วยกล้อง optical profiler

ความเร็วรอบการเคลือบแบบหมุน เหวี่ยง (รอบต่อนาที)	ความหนาฟิล์มหลังการอบที่ 70 °C (nm)	ความหนาฟิล์มหลังการอบที่ 500 °C (nm)
3,000	529.85	151.53
4,000	444.35	137.38
5,000	494.69	129.08
6,000	122.31	105.79
7,000	145.07	117.16

Veeco



รูปที่ 4.10 ผลการวัดความหนาฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยกล้อง optical profiler

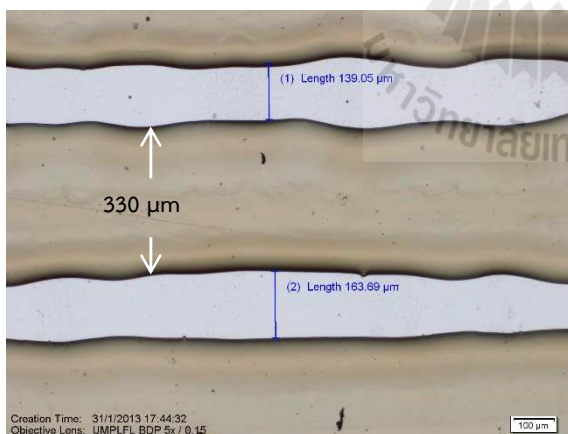
การวิเคราะห์วัดความหนาของฟิล์ม SiO₂ ได้ศึกษาด้วยกล้อง optical profiler ผลการวัดแสดงในภาพที่ 4.10 ในแกน Z ให้ความหนาเท่ากับ 122 nm จากการศึกษารวบรวมพบว่าความหนาของชั้นไดอิเล็กทริกสำหรับพาสซีเวชันควรมีค่าประมาณ 100 nm และค่าดัชนีหักเหของซิลิคอนไดออกไซด์โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 1.4 – 1.5 อย่างไรก็ตามงานวิจัยได้ทำการวัดความหนา และค่าดัชนีหักเหแสงด้วย

เครื่อง Ellipsometry อีกทางหนึ่งเพื่อยืนยันผลของฟิล์ม SiO_2 จากวิธีโฮล-เจล จากการวัดนั้นได้ความหนาเท่ากับ 105 นาโนเมตร มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.48 ในกรณีการเคลือบด้วยความเร็วรอบ 6,000 รอบต่อนาที เป็นเวลานาน 30 นาที จากนั้นอบไล่ความชื้นที่ 500°C นาน 30 นาที และวัดความหนาด้วยกล้อง optical profiler แสดงภาพในรูปที่ 4.10

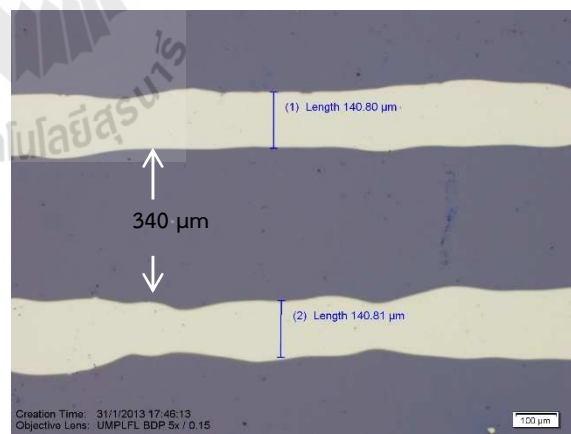
ในการผลิตชั้น SiO_2 นี้ได้เลือกใช้เงื่อนไขที่ให้ความหนาฟิล์มประมาณ 105 nm เพื่อให้เกิดสนามไฟฟ้าที่เหมาะสม ซึ่งอ้างอิงจากจากโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง PERL หลังจากนั้นได้ทำการเปิดช่องชั้น SiO_2 เพื่อให้เกิดเป็นชั้นพาสซีเวชันในบางส่วนด้วยเทคนิคการสร้างลวดลายจากเครื่องพิมพ์แบบฉีด ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.4.3

4.5.3 การสร้างชั้นพาสซีเวชันด้านหลังบางส่วนด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีด

หลังจากได้ชั้น SiO_2 ที่บริเวณแผ่นผลึก p-Si ด้านหลังแล้ว ได้ทำการเคลือบสารไวแสงแบบบวก (Positive resist: PFI-34 Sumiresist) ลงบนแผ่นซิลิคอนโดยการเคลือบแบบหมุนเหวี่ยงด้วยเครื่อง Spinner ให้ทั่วแผ่น ในเงื่อนไข 2 ชั้นคือความเร็วรอบ 500 รอบต่อนาที เวลานาน 5 วินาที และความเร็ว 3000 รอบต่อนาที อีก 30 วินาที หลังจากได้นำฟิล์มสารไวแสงที่เคลือบชั้น SiO_2 ทั่วแผ่นมาสร้างลวดลายที่ออกแบบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องพิมพ์แบบฉีดที่พัฒนาขึ้น โดยได้ทำการฉีดสารละลายอะซิโตน ซ้ำ 10 ครั้งเพื่อให้เกิดการทำละลายในบริเวณที่ถูกฉีดละลาย จากนั้นอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลานาน 30 นาที ลายหน้ากากด้วยสารไวแสงที่มีลักษณะเป็นช่องเปิดแสดงได้ในรูปที่ 4.11 (ก)



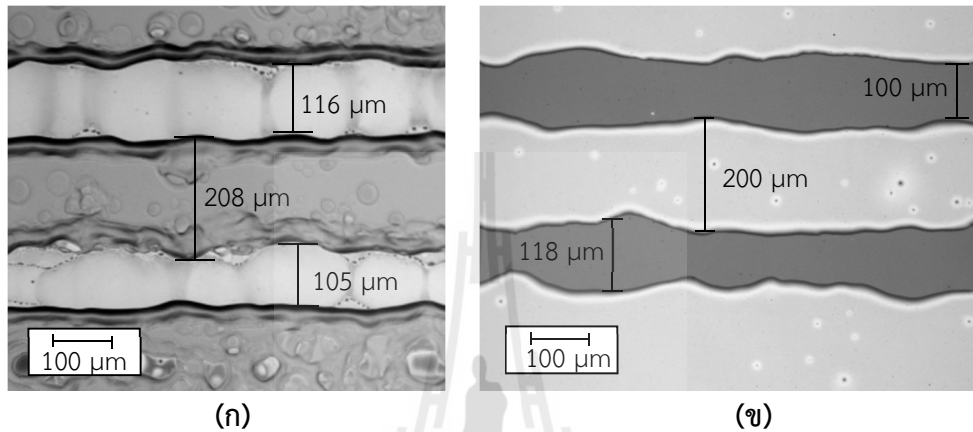
(ก)



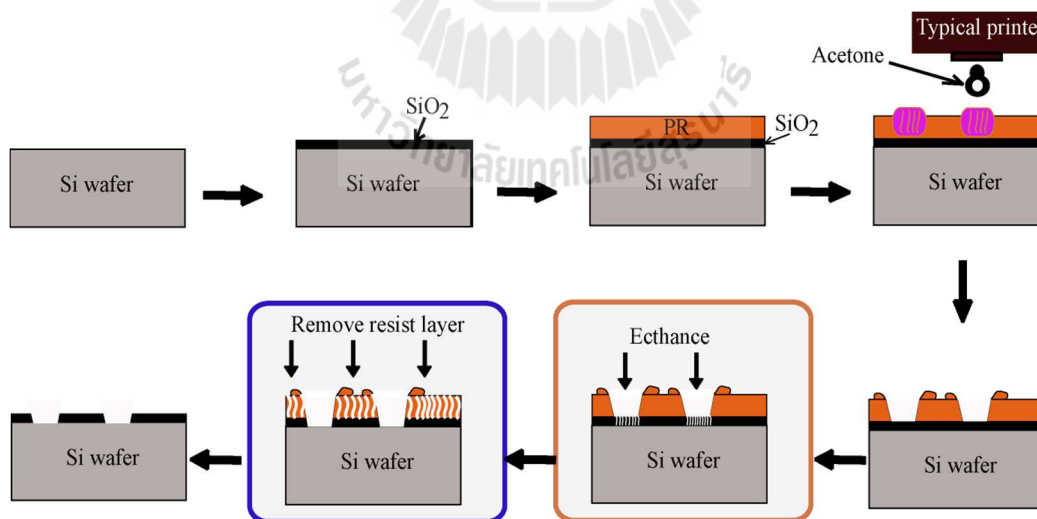
(ข)

รูปที่ 4.11 (ก) ลวดลายช่องเปิดของฟิล์มสารไวแสง (ข) ลวดลายช่องเปิดของฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์

รูปที่ 4.12 (ก) แสดงผลจากการเปิดช่องจากการออกแบบลวดลายเส้นตรงขนาด $100\ \mu\text{m}$ ระยะห่าง $200\ \mu\text{m}$ โดยการฉีดสารอะซีโตนซ้ำจำนวน 10 ครั้ง เกิดเป็นลวดลายเส้นแนวยาวขนาดเฉลี่ย $120\ \mu\text{m}$ และระยะห่างช่องเปิดเฉลี่ย $200\ \mu\text{m}$ แต่หลังจากสกัดชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณช่องเปิด และล้างฟิล์มสารไวแสงออกจะได้ลวดลายแนวตรงขนาดเฉลี่ย $105\ \mu\text{m}$ มีความคลาดเคลื่อนจากแบบไม่เกิน 5% และระยะห่างช่องเปิดเฉลี่ย $195\ \mu\text{m}$ มีความคลาดเคลื่อนจากแบบไม่เกิน 5% แสดงในรูปที่ 4.12 (ข) ซึ่งผลที่ได้นำไปวิเคราะห์หาอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ปิดในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.12 (ก) ลวดลายช่องเปิดของฟิล์มสารไวแสงจากแบบลวดลายขนาด $100\ \mu\text{m}$ ระยะห่าง $200\ \mu\text{m}$
(ข) ลวดลายช่องเปิดของฟิล์ม SiO_2 หลังจากการล้างสารไวแสงออก



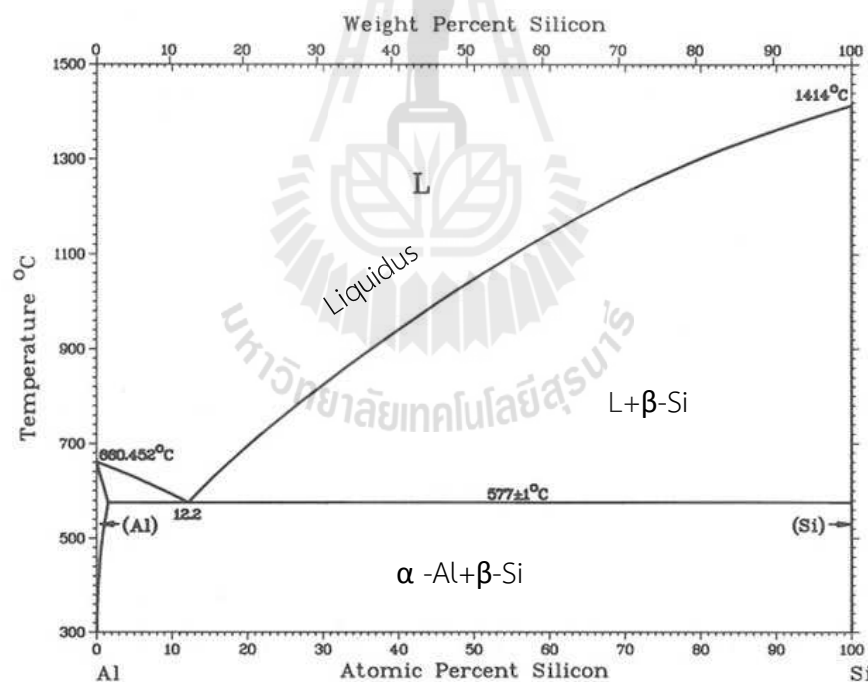
รูปที่ 4.13 กระบวนการสร้างลวดลายชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นชั้นพาสซีเวชัน

หลังจากได้ลวดลายช่องเปิดของฟิล์มสารไวแสงแล้ว จากนั้นทำการสกัดเพื่อเปิดช่องชั้น SiO_2 ด้วยการแช่ในสารละลายไฮโดรฟลูออริก (HF) 5% นาน 25 วินาที เพื่อให้เกิดลวดลายช่องเปิด SiO_2

หลังจากนั้นกำจัดชั้นฟิล์มสารไวแสงด้วยการแช่ในสารละลายอะซีโตนจนสารไวแสงละลายออก และนำไปล้างด้วยน้ำ DI ไหลผ่านนาน 5 นาที และเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ลวดลายที่ได้แสดงในรูปที่ 4.12 (ข) ขั้นตอนการสร้างลวดลายชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นชั้นพาสซีเวชันของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงได้ดังแผนภาพรูปที่ 4.13 จากนั้นนำไปสร้างขั้วโลหะด้านหลังและทำ Firing contact เพื่อสร้างสนามไฟฟ้าด้านหลัง (Back surface field :BSF) จากการเกิด P^+ ด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างซิลิคอนกับอลูมิเนียมซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4.6 การสร้างชั้นซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูง ด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่าง Si กับ Al

การสร้างโลหะผสม (alloy) ระหว่างโลหะอลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำซิลิคอน (Al-Si) โดยอาศัยการแพร่ระหว่างอะตอมของ Al-Si และเกิดการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่าง Si กับ Al ในแบบ Recrystallization เกิดเป็นซิลิคอนชนิดพีความเข้มข้นสูง (p^+) พฤติกรรมของ Al-Si แสดงได้ด้วยเฟสไดอะแกรม Al-Si ในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แผนภาพเฟสไดอะแกรมของ Al-Si

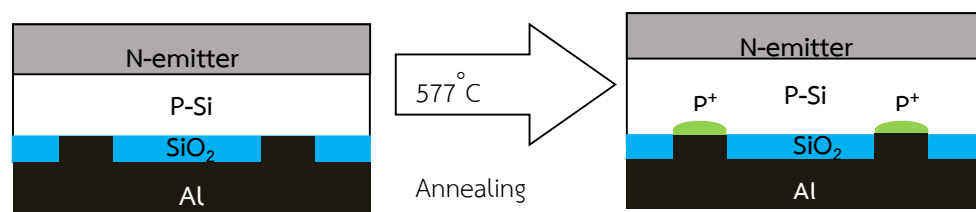
ที่สภาวะสมดุลทางความร้อนในแต่ละเฟสที่แตกต่างกันนั้นแสดงได้ดังตำแหน่งที่เฟสหลายเฟสมีส่วนผสมไม่เท่ากันมาหลอมรวมกัน จุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเรียกว่า จุดยูเทคติก (eutectic point) ระหว่างเฟส Liquidus กับ Solidus ส่วน Solvus line บ่งบอกถึงความสามารถในการละลายของโลหะใน

ระบบสมดุล ส่วน α และ β เป็นค่า solid solubility ของ Si ใน Al ตามลำดับ

ในกระบวนการทำโลหะผสม Al-Si มีบริเวณที่สำคัญที่ควรทราบดังนี้คือ บริเวณของแข็ง Si แบบสมบูรณ์ (Si-rich solidus : β -Si) บริเวณของแข็ง Al แบบสมบูรณ์ (Al-rich solidus and solvus : α -Al) และบริเวณของเหลว Al (Al-liquidus) ในกรณีที่ปริมาณของ Si ต่ำกว่า 1.65% และอาจสูงขึ้นไปแต่ไม่เกิน 12.6% ในโลหะผสม Al-Si ความสามารถในการละลายได้ของ Si ใน Al จะมีค่าสูงสุดที่จุดยูเทคติกที่อุณหภูมิ 577°C และจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ถ้าปริมาณของซิลิคอนเท่ากับ 12.6% จะเกิดโครงสร้างที่เรียกว่า Lamellar structure แต่ถ้าปริมาณของ Si มากกว่า 12.6% เรียกว่าไฮเปอร์ยูเทคติก (Hypereutectic) ความสามารถในการละลายได้ของ Al ใน Si จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดชั้น p^+ Si ที่มีความหนาแน่นของอะตอม Al สูง และเกิด Recrystallisation ใน Si จึงเกิดการตกผลึกซ้ำ ส่วนในกรณีปริมาณของซิลิคอนระหว่าง 1.65%-12.6% เรียกกรณีนี้ว่าไฮโปยูเทคติก (Hypoeutectic) ความสามารถในการละลายได้ของ Al ใน Si มีน้อยมากจึงไม่เกิดชั้นซิลิคอนชนิดที่มีความเข้มข้นสูง

ในการศึกษานี้ได้ผลิตชั้นพาสซีเวชันบางส่วนที่ด้านหลังที่เรียกว่า LBSF ที่มีลักษณะเปิดช่องชั้น SiO_2 เพื่อให้เกิดบริเวณ p^+ ในระหว่างช่องเปิดดังกล่าวโดยผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่าง Al-Si ที่อุณหภูมิใกล้จุด Eutectic เพื่อต้องการลดผลของ R_c ลง และเพิ่ม BSF จากบริเวณ p^+ ภายในช่อง SiO_2 ที่ผลิตขึ้นจากการฉีดยุติในหัวข้อข้างต้น ภาพของโครงสร้าง LBSF แสดงดังรูปที่ 4.15 ขั้นตอนการผลิต LBSF ด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่าง Si กับ Al มีดังนี้

- 1.) นำแผ่นฐานที่ผ่านการสร้างรอยต่อพี-เอ็นและมีลวดลายของช่องเปิด SiO_2 จากการฉีดยุติด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีดและทำความสะอาดด้วยกระบวนการ RCA แล้ว มาทำการสร้างขั้วโลหะอลูมิเนียมด้านหลังทั้งหมดขนาด 1 เซนติเมตร บนลวดลายที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิคการพิมพ์ลาย (Screen printing)
- 2.) นำไปอบที่อุณหภูมิ 577°C ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหลเท่ากับ 100 SCCM. เป็นเวลา 30 นาที
- 3.) นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์ผลของโครงสร้าง LBSF ที่ได้จากเทคนิคการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่าง Si กับ Al ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนกำลังขยายสูง (Field Emission Screening Electron Microscopy, FESEM)



รูปที่ 4.15 การสร้างชั้น LBSF ด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่าง Si กับ Al ที่ช่องเปิด

4.7 สรุป

การเปิดช่องลวดลายของชั้น SiO_2 สามารถทำได้ด้วยวิธีการฉีดยา ซึ่งมีขั้นตอนไม่ซับซ้อนสามารถผลิตซ้ำได้ปริมาณมาก ๆ จากผลการผลิตได้ลวดลายที่มีขนาดช่องกว้างเฉลี่ย $105 \mu\text{m}$ และระยะห่างช่องเปิดเฉลี่ย $195 \mu\text{m}$ โดยชั้น SiO_2 ผลิตจากสารละลายโซล-เจล และผลิตเป็นฟิล์มบางด้วยวิธี spin-coating และเปิดช่องด้วยการทำละลายของสารอะซิโตนที่ฉีดจากเครื่องพิมพ์ เมื่อได้ช่องเปิด SiO_2 และพิมพ์ลายชั้น อลูมิเนียมทับบนชั้นลวดลายของ SiO_2 ด้วยเทคนิค screen-printing หลังผ่านกระบวนการ Firing contact ในระดับยูเทคติก (eutectic) บริเวณที่อลูมิเนียมสัมผัสกับแผ่นฐาน p-Si นั้นได้เกิดการแลกเปลี่ยนเฟสจะเกิดและซิลิคอนเท่ากับ 577°C



บทที่ 5

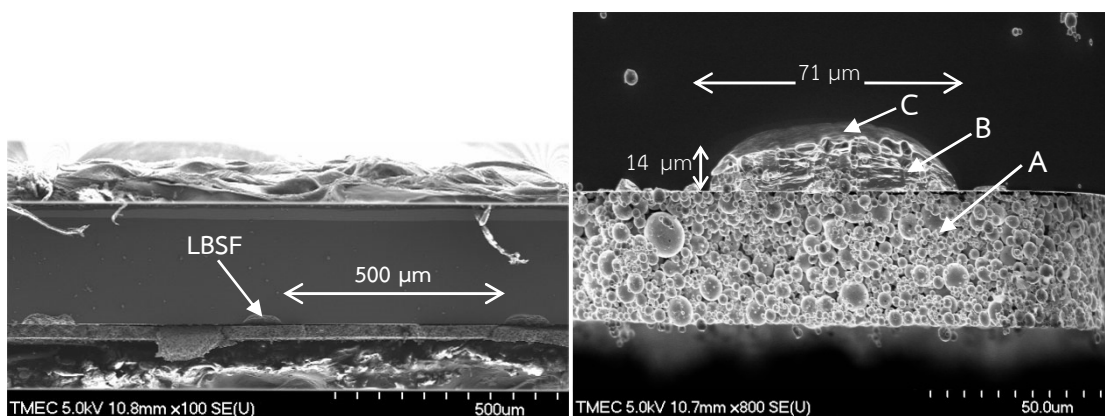
ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ชั้นพาสซีเวชันแบบ LBSF

5.1 บทนำ

เป้าหมายของการสร้างชั้นพาสซีเวชันแบบ LBSF คือการลดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับแผ่นฐาน p-Si ด้วยการใช้ชั้นไดอิเล็กทริกบางประมาณ 100 nm อยู่ระหว่างโลหะกับแผ่นฐาน เหมือนโครงสร้าง MIS (Metal insulator semiconductor structure) และเกิดการสะสมประจุไฟฟ้าซึ่งเป็นอีกจุดประสงค์เพื่อเพิ่มค่า V_{oc} อีกทั้งการเปิดช่องชั้นไดอิเล็กทริก SiO_2 นั้นเพื่อต้องการสนามไฟฟ้าจากการก่อดั้วของ p^+ Si ในบริเวณช่องเปิดดังกล่าว ดังนั้นในบทที่ 5 จะได้กล่าวถึงผลการศึกษาที่สร้างชั้นพาสซีเวชันแบบ LBSF ด้วยการวิเคราะห์ทางโครงสร้างแบบจุลภาคด้วยภาพถ่ายจากการยิงลำอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ส่วนการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะ (Carriers life time) ที่มีความสัมพันธ์ต่อค่า V_{oc} และ I_{sc} ของเซลล์ และยังได้นำผลการวัดไปทดสอบหาค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานด้วยการใช้แบบจำลอง PC1D

5.2 การวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างของ LBSF

โครงสร้างของชั้นพาสซีเวชันแบบ LBSF ที่มีช่องเปิด SiO_2 กว้างประมาณ 105 μm และใช้เทคนิคของการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่าง Si กับ Al เป็น Al-Si อัลลอยในบริเวณช่องเปิด SiO_2 ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิที่ 577 °C นาน 30 นาที นั้นได้นำไปวิเคราะห์ผลจากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนกำลังขยายสูง Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) เพื่อศึกษาผลการแทรกซึมของ Al และเกิดการแลกเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิ eutectic จนเกิดการก่อดั้วเป็นชั้น LBSF ที่บริเวณรอยต่อเป็น p^+ Si ในช่องเปิดที่กำหนดไว้ แสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ภาพตัดขวางของบริเวณ LBSF ที่ได้จากการถ่ายภาพด้วย FE-SEM

จากผลของ Al-Si อัลลอยพบว่าที่บริเวณ A คือ Al matrix มีสถานะเป็น porous จากส่วนประกอบ Al-17%Si โดยประกอบด้วยผลึก Al เม็ดกลมที่ก่อตัวขึ้น วัสดุ Si วัสดุ Al_2O_3 และสารอื่น ๆ เล็กน้อยที่อาจเจือปน ส่วนบริเวณ B คือส่วนที่ Al matrix แทรกซึมในช่องเปิด SiO_2 และลักษณะการก่อตัวของส่วน Al-Si อัลลอย จากชั้น eutectic ของส่วนประกอบ Al-12.6%Si มีความกว้างประมาณ $71 \mu m$ และลึกประมาณ $14 \mu m$ ส่วนบริเวณ C ที่เป็นพื้นที่รอยสัมผัสนั้นเป็นบริเวณ BSF จาก Si-1%Al ที่เกิดเป็นชั้น p^+ Si มีความลึกประมาณ $5 \mu m$ จากขอบของบริเวณ B ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับพฤติกรรมการแลกเปลี่ยนเฟส Al-Si ที่เกิดขึ้นจากการศึกษาของ Urrejola และคณะ (Urrejola et al., 2011) จากผลการศึกษาเป็นการยืนยันถึงผลสำเร็จในการเกิด BSF ของ p^+ -Si ในบริเวณ C ที่ได้จากการเปิดช่อง SiO_2 ด้วยวิธีการฉีดสร้างลวดลายจากเครื่องพิมพ์ได้

5.3 การวิเคราะห์ค่าช่วงเวลาชีวิตของพาหะ (Carrier lifetime)

ค่าช่วงเวลาชีวิตของพาหะ (τ) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่บ่งบอกถึงค่าประสิทธิภาพของการรวบรวมพาหะไปยังขั้วโลหะ และยังบ่งบอกถึงกลไกการรวมตัวใหม่ (recombination mechanism) ของพาหะอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในชั้นแถบ conduction ย่อมเสื่อมในที่สุดอิเล็กตรอนเหล่านี้จะตกกลับลงชั้นแถบ valence ในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์จากวัสดุผลึกสารกึ่งตัวนำ อัตราการรวมตัวใหม่สูงนั้นส่งผลต่อการลดลงของค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ กระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะในวัสดุสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. Radiative recombination กลไกนี้เกิดขึ้นสูงในวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิด direct band gap เช่น GaAs เป็นต้น การปล่อยหรือแผ่พลังงานความยาวคลื่นจากขอบล่างถึงขอบบนของแถบพลังงาน conduction และ valence พลังงานที่ปล่อยออกเท่ากับค่าพลังงานช่องว่างของวัสดุสารกึ่งตัวนำนั้น ๆ
2. Auger recombination เป็นชนิดที่เกิดขึ้นได้สูงในเซลล์แสงอาทิตย์ กลไกนี้เกี่ยวข้องกับพาหะ 3 ชนิดคือ 1. อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น 2. โฮล 3. อิเล็กตรอนอีกตัวที่อยู่ในแถบชั้น conduction แล้วได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจากอิเล็กตรอนที่เพิ่งถูกกระตุ้นขึ้นมาจากชั้น valence ทำให้อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นนี้กระโดดขึ้นไปยังสถานะพลังงานใน conduction ที่สูงกว่า และตกกลับลงอีกครั้งพร้อมกับปล่อยพลังงานคลื่นสั้น ๆ อย่างพลังงานความร้อนออกมาเรียกว่ากระบวนการ thermalisation ถือได้ว่าพลังงานความร้อนนี้ก่อเกิดการสั่นของโครงผลึก (lattice vibration) เป็นการจำกัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน ส่วนใหญ่กลไกแบบ Auger เกิดในบริเวณที่มีการเติมสารเจือสูง
3. Shockley-Read-Hall หรือ SRH recombination เป็นกลไกที่ตำแหน่งจุดบกพร่อง (defect) ซึ่งจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในเนื้อผลึกนี้จะแสดงเป็นระดับพลังงานกระจัดกระจายภายในช่องแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band) ของสารกึ่งตัวนำ กระบวนการรวมตัวใหม่แบบ SRH นี้มี 2 กลไกคือ อิเล็กตรอนในชั้น conduction ตกลงและถูกดักจับ (trap) ที่ระดับพลังงาน defect อยู่ระหว่าง forbidden

band ซึ่งได้คายพลังงานคลื่นความร้อนออกมา ต่อมาเกิดกลไกการตกกลับลงชั้น valence อีกครั้ง และคายพลังงานคลื่นความร้อนออกมาอีกครั้ง

ค่าช่วงชีวิตของพาหะในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับค่าอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะ (R) เมื่อวัสดุได้รับพลังงานกระตุ้นภายนอกเช่นแสงแดดตกกระทบที่วัสดุ ทำให้ได้เกิดจำนวนพาหะส่วนเกินเพิ่มขึ้น และจำนวนที่เพิ่มขึ้นนี้จะเสื่อมลดลง (decay) กลับไปยังจำนวนพาหะเดิมที่สภาวะสมดุลเนื่องจากกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะ ดังนั้นค่าช่วงชีวิตที่ยาวจะเป็นส่วนสำคัญที่ให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูง เราจึงจำเป็นต้องเลือกพิจารณาวัสดุที่เหมาะสม

ในกรณีวัสดุที่เติมสารเจือต่ำ จำนวนพาหะส่วนเกินนั้นมีปริมาณน้อยกว่าปริมาณอะตอมของสารเจือที่เติมไป แล้วจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\tau = \frac{\Delta n}{R} \quad (5.1)$$

โดยที่ Δn คือความหนาแน่นของพาหะส่วนเกิน

τ คือค่าช่วงเวลาชีวิตของพาหะข้างน้อย

R คืออัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะข้างน้อย

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องวัด Photoconductance Lifetime Tester รุ่น Sinton WCT-120 เพื่อวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ในเงื่อนไขต่าง ๆ แผนภาพส่วนประกอบแสดงในรูปที่ 5.2 เครื่องวัดมีหลักการแบบ Quasi-Steady-State Photoconductance (QSSPC) ที่มีโลหะสัมผัสที่ขึ้นงานด้านหลังเพื่อเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อมีแหล่งพลังงานภายนอกมากระตุ้นด้วยการใช้แสงเลเซอร์แบบพัลส์ ส่งกระทบลงแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ และเกิดการสร้างพาหะอิสระขึ้นในรอยต่อ p-n หลังจากนั้นพาหะจะกลับสู่สภาวะสมดุลด้วยกลไกการรวมตัวใหม่ เป็นผลให้กระแสไฟฟ้าลดลงเป็นศูนย์ สัญญาณไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงนี้ถูกตรวจจับได้ในฟังก์ชันของเวลา ซึ่งเรียกค่านี้อีกว่าค่าช่วงชีวิตของพาหะ แสดงในสมการที่ (5.2)

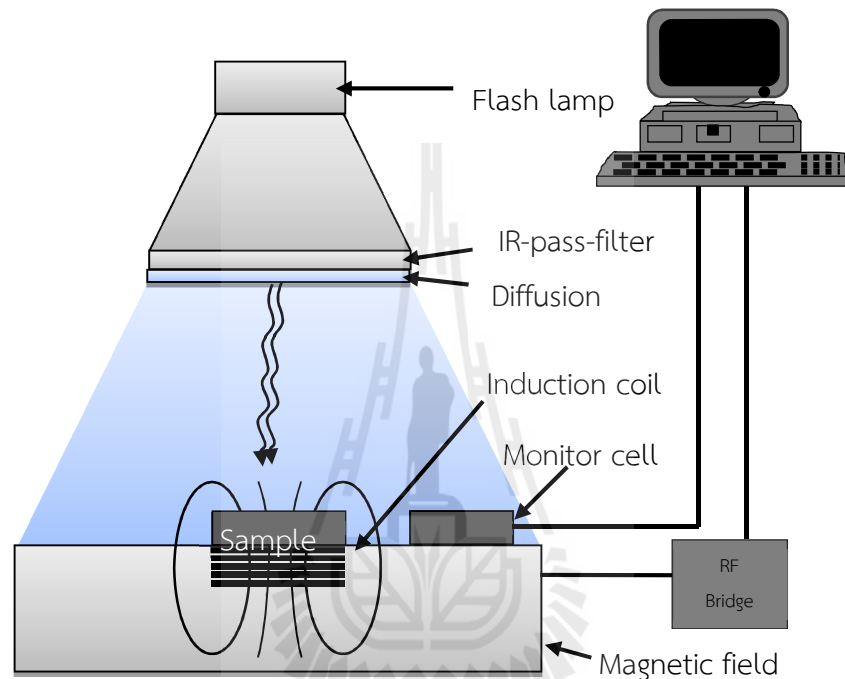
$$\frac{1}{\tau_{meas}} = \frac{1}{\tau_{bulk}} + \frac{1}{\tau_{diff} + \tau_{surf}} \quad (5.2)$$

$$\tau_{diff} = \frac{d^2}{\pi^2 \cdot D_{n,p}} \quad (5.3)$$

$$\tau_{surf} = \frac{d}{2 \cdot S} \quad (5.4)$$

โดยที่ τ_{bulk} คือ ค่าช่วงชีวิตของพาหะที่เนื้อวัสดุ

- τ_{surf} คือ ค่าช่วงชีวิตของพาหะที่ผิว
- τ_{mea} คือ ค่าช่วงชีวิตของพาหะที่วัดได้
- $D_{n,p}$ คือ ค่าคงที่สัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะข้างน้อย
- τ_{diff} คือ ระยะเวลาการแพร่ของพาหะจากเนื้อวัสดุไปยังผิว
- d คือ ความหนาของแผ่นฐานซิลิคอน
- S คือ อัตราความเร็วของการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิว (Surface recombination velocity)



รูปที่ 5.2 ระบบการทำงานของเครื่อง Photoconductance Lifetime Tester รุ่น WCT-120

ในกรณีศึกษานี้ได้ใช้แผ่นฐานผลึก Si ชนิดพีที่มีการเติมสารเจือปนเข้มข้นประมาณ 10^{14}atom/cm^3 เมื่อนำไปแทนค่าในเทอมของ τ_{diff} ทำให้มีค่าน้อยมากในระดับ 10^{-9} วินาที เมื่อเปรียบเทียบกับเทอมของ τ_{surf} และ τ_{bulk} แล้ว แสดงให้เห็นว่าผลของ τ_{diff} ไม่มีผลต่อค่า τ_{mea} ที่วัดได้ซึ่ง τ_{mea} คือค่าประสิทธิผลของช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อย (Effective lifetime : τ_{eff}) เทคนิคนี้ใช้หลักการวัดแสงเลเซอร์แบบพัลส์ ภายใต้สภาวะแสงเงื่อนไข Steady หรือ quasi-steady-state ความหนาแน่นของกระแสจากอัตราการเกิดของพาหะที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง (J_{ph}) และความหนาแน่นของกระแสจากอัตราการรวมตัวใหม่ (J_{rec}) มีค่าเท่ากันดังสมการที่ (5.5)

$$J_{ph} = J_{rec} \quad (5.5)$$

ความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนและพาหะโฮลจะมีความสมดุลในวัสดุ ผลรวมของการรวมตัวใหม่ในวัสดุในเทอมของความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยเฉลี่ย (Δn_{av}) และค่าช่วงชีวิตของพาหะ โดยที่มีความหนาแน่นของตัวอย่างเท่ากับ W แสดงได้ดังสมการที่ (5.6)

$$J_{ph} = \frac{q\Delta n_{av}W}{\tau_{eff}} \quad (5.6)$$

จากความสัมพันธ์ $\Delta n = G\tau_{eff}$ ความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนและพาหะโฮลที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงจะมีค่าเท่ากันทำให้ $\Delta n = \Delta p$ เป็นผลทำให้ค่าความนำของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความนำไฟฟ้าสุทธิแสดงได้ดังสมการที่ (5.7)

$$\sigma_L = q(\Delta n_{av}\mu_n + \Delta p_{av}\mu_p)W = q\Delta n_{av}(\mu_n + \mu_p)W \quad (5.7)$$

โดยที่ μ_n และ μ_p คือค่าความคล่องตัวของพาหะอิเล็กตรอนและพาหะโฮล (mobility) ตามลำดับ

จากสมการที่ (5.7) สามารถหาค่า Δn_{av} และ $\mu_n + \mu_p$ ได้จากการวัดค่าความนำทางไฟฟ้าจากการกระตุ้นด้วยแสง ส่วนค่าประสิทธิภาพของช่วงชีวิตของพาหะข้างน้อย τ_{eff} นั้นหาจากการแทนเทอมของ $q\Delta n_{av}W$ ด้วย $J_{ph}\tau_{eff}$ ในสมการที่ (5.7) แล้วจะได้ว่า

$$\tau_{eff} = \frac{\sigma_L}{J_{ph}(\mu_n + \mu_p)} \quad (5.8)$$

ข้อมูลที่ได้จากเทคนิคการวัดแบบ quasi-steady-state สามารถเขียนสมการแรงดันเปิดวงจร V_{oc} ให้อยู่ในรูปของความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยเฉลี่ย Δn_{av} ได้ดังสมการที่ (5.9)

$$V_{oc} = \left(\frac{kT}{q}\right) \ln \left[\left(\Delta n_{av} \frac{N_A + \Delta p}{n_i^2} \right) + 1 \right] \quad (5.9)$$

การวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะในงานวิจัยนี้ได้นำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบด้วยชั้นพาสซีเวชันที่มีลวดลายช่องเปิดด้วยเครื่องมือแบบฉีดยึดเนื้อใยการสร้ารอยต่อพี-เอ็นด้วยการเติมสารเจือฟอสฟอรัสด้วยอัตราส่วน TEOS: H_3PO_4 = 4: 1 ที่อุณหภูมิการแพร่ซึม $1,000^\circ C$ นาน 60 นาที ความหนาแน่นของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และระยะห่างช่องเปิดค่าต่าง ๆ ซึ่งความหนาแน่นและระยะห่างช่องเปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้มีผลต่อค่าช่วงชีวิตของพาหะ โดยค่าช่วงชีวิตพาหะที่ได้จากการวัดนี้เป็นค่าช่วงชีวิตพาหะก่อนที่

พาหะจะรวมตัวใหม่ที่บริเวณเนื้อวัสดุ (Bulk recombination lifetime) และมีค่าที่แตกต่างกันไปตามความหนาและระยะห่างของช่องเปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ รูปแบบโครงสร้างเซลล์แสดงรายละเอียดในตารางที่ 5.1 กำหนดให้ชิ้นงานมีขนาด $1 \times 1 \text{ cm}^2$ ในการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น เน้นการศึกษาผลของชั้นพาสซีเวชันที่มีอัตราส่วนของพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ส่วนที่ไม่ถูกเปิดช่อง ที่มีต่อค่าประสิทธิภาพของช่วงชีวิตของพาหะที่เกี่ยวข้องกับอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะ ดังนั้นในส่วนของงานวิจัยนี้จะไม่นำผลของความต้านทานอนุกรมที่ขั้วไฟฟ้าด้านบนมาพิจารณา

ตารางที่ 5.1 เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อพี-เอ็นในเงื่อนไขที่มีความหนาและระยะห่างของช่องเปิดที่ต่างกัน เปรียบเทียบโครงสร้างที่ไม่มีการเปิดช่องชั้นพาสซีเวชัน

ชื่อชิ้นงาน	ความหนาชั้น SiO_2	ระยะห่างช่องเปิดตลอดสายตรง	อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ส่วนที่ไม่เปิดช่อง(%)	เงื่อนไขที่ใช้ร่วมกันในทุกชิ้นงาน
S ₁ . n ⁺ emitter/p-Si /Al	ไม่มี	ไม่มี	-	อัตราส่วนต่อปริมาตร TEOS/ H ₃ PO ₄ = 4:1 ความต้านทานแผ่นของ n ⁺ emitter = 128 Ω/square Al ด้านหลังหนาประมาณ 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 - 200 μm	100 nm	200 μm	50.50	
S ₅ . Localized p ⁺ contacts_100 nm - 350 μm	100 nm	350 μm	28.86	
S ₆ . Localized p ⁺ contacts_100 nm - 780 μm	100 nm	780 μm	12.95	

ตารางที่ 5.1 เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อพี-เอ็นในเงื่อนไขที่มีความหนาและระยะห่างของช่องเปิดที่ต่างกันเปรียบเทียบโครงสร้างที่ไม่มีการเปิดช่องชั้นพาสซีเวชัน (ต่อ)

ชื่อชิ้นงาน	ความหนาชั้น SiO ₂	ระยะห่างช่องเปิดลวดลายเส้นตรง	อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ส่วนที่ไม่ปิดช่อง (%)	เงื่อนไขที่ใช้ร่วมกันในทุกชิ้นงาน
S ₇ . Localized p ⁺ contacts_150 nm-200 μm	150 nm	200 μm	50.50	อัตราส่วนต่อปริมาตร TEOS/ H ₃ PO ₄ = 4:1
S ₈ . Localized p ⁺ contacts_150 nm-350	150 nm	350 μm	28.86	ความต้านทานแผ่นชั้นเอ็น ประมาณ 128 Ω/square
S ₉ . Localized p ⁺ contacts_150 nm-780	150 nm	780 μm	12.95	ชั้นอะลูมิเนียมหนา 30 μm

นิยามของชื่อชิ้นงานดังนี้

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 และชั้น BSF จาก p⁺ Si จากการอบ Al ที่เคลือบด้านหลังที่อุณหภูมิ 500 °C นาน 15 นาที

S₄. Localized p⁺ contacts_100 nm -200 μm เป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 100 nm เคลือบแผ่นด้านหลังมีขนาดกว้างของช่องเปิด 105 μm เมื่อผ่านการอบที่ความร้อน 577 °C นาน 30 นาที แล้วจะมีบริเวณ p⁺-Si เกิดในช่องเปิดขนาดกว้างเฉลี่ย 101 μm และระยะห่างของช่องเปิดเฉลี่ยประมาณ 200 μm และมีชั้นอะลูมิเนียมเคลือบด้านหลัง

S₅. Localized p⁺ contacts_100 nm -350 μm เป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 100 nm เคลือบแผ่นด้านหลังมีขนาดกว้างของช่องเปิด 105 μm เมื่อ

ผ่านการอบที่ความร้อน 577°C นาน 30 นาที แล้วจะมีบริเวณ $\text{p}^+\text{-Si}$ เกิดในช่องเปิดขนาดกว้างเฉลี่ย $101\ \mu\text{m}$ และระยะห่างของช่องเปิดเฉลี่ยประมาณ $350\ \mu\text{m}$ และมีชั้นอลูมิเนียมเคลือบด้านหลัง

S₆. Localized p^+ contacts_100 nm -780 μm เป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา $100\ \text{nm}$ เคลือบแผ่นด้านหลังมีขนาดกว้างของช่องเปิด $105\ \mu\text{m}$ เมื่อผ่านการอบที่ความร้อน 577°C นาน 30 นาที แล้วจะมีบริเวณ $\text{p}^+\text{-Si}$ เกิดในช่องเปิดขนาดกว้างเฉลี่ย $101\ \mu\text{m}$ และระยะห่างของช่องเปิดเฉลี่ยประมาณ $780\ \mu\text{m}$ และมีชั้นอลูมิเนียมเคลือบด้านหลัง

S₇. Localized p^+ contacts_150 nm -200 μm เป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา $150\ \text{nm}$ เคลือบแผ่นด้านหลังมีขนาดกว้างของช่องเปิด $105\ \mu\text{m}$ เมื่อผ่านการอบที่ความร้อน 577°C นาน 30 นาที แล้วจะมีบริเวณ $\text{p}^+\text{-Si}$ เกิดในช่องเปิดขนาดกว้างเฉลี่ย $101\ \mu\text{m}$ และระยะห่างของช่องเปิดเฉลี่ยประมาณ $200\ \mu\text{m}$ และมีชั้นอลูมิเนียมเคลือบด้านหลัง

S₈. Localized p^+ contacts_150 nm -350 μm เป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา $150\ \text{nm}$ เคลือบแผ่นด้านหลังมีขนาดกว้างของช่องเปิด $105\ \mu\text{m}$ เมื่อผ่านการอบที่ความร้อน 577°C นาน 30 นาที แล้วจะมีบริเวณ $\text{p}^+\text{-Si}$ เกิดในช่องเปิดขนาดกว้างเฉลี่ย $101\ \mu\text{m}$ และระยะห่างของช่องเปิดเฉลี่ยประมาณ $350\ \mu\text{m}$ และมีชั้นอลูมิเนียมเคลือบด้านหลัง

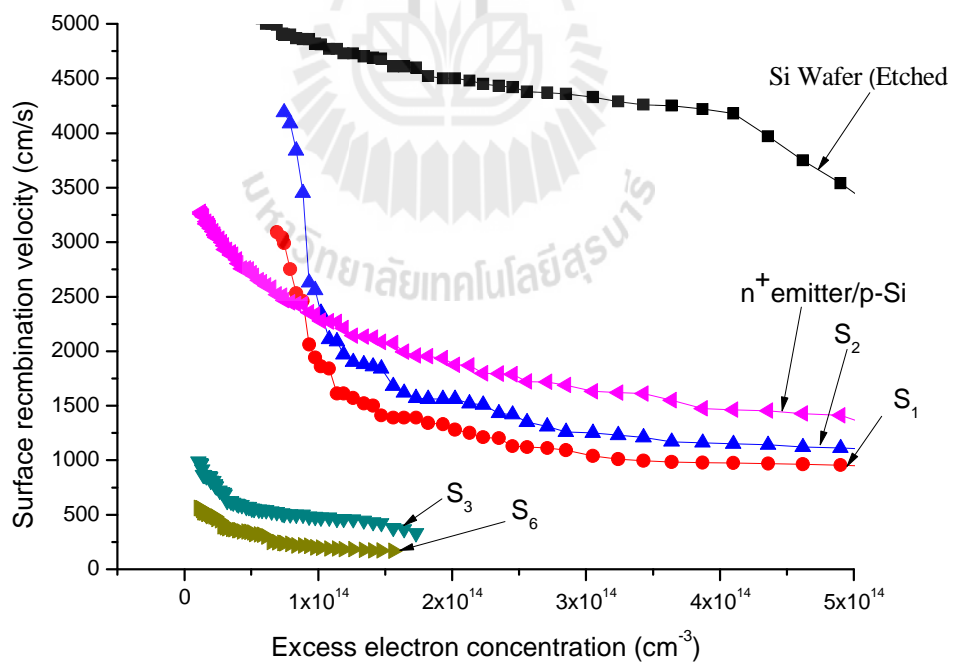
S₉. Localized p^+ contacts_150 nm -780 μm เป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา $150\ \text{nm}$ เคลือบแผ่นด้านหลังมีขนาดกว้างของช่องเปิด $105\ \mu\text{m}$ เมื่อผ่านการอบที่ความร้อน 577°C นาน 30 นาที แล้วจะมีบริเวณ $\text{p}^+\text{-Si}$ เกิดในช่องเปิดขนาดกว้างเฉลี่ย $101\ \mu\text{m}$ และระยะห่างของช่องเปิดเฉลี่ยประมาณ $780\ \mu\text{m}$ และมีชั้นอลูมิเนียมเคลือบด้านหลัง

ค่าช่วงชีวิตที่วัดได้แสดงในตารางที่ 5.2 จากผลพบว่าตัวอย่างที่มีชั้นพาสซิเวชันหนาประมาณ $100\ \text{nm}$ ระยะห่างช่องเปิดเฉลี่ยประมาณ $780\ \mu\text{m}$ นั้นมีค่าช่วงชีวิตของพาหะที่มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอื่น ๆ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการทำการเปิดช่องที่ระยะห่างมากกว่า $780\ \mu\text{m}$ นั้นผู้วิจัยยังไม่ได้คำนึงถึง แต่จากความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการแปลงพลังงานกับอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ส่วนที่ไม่ถูกเปิดช่อง (%) ในกราฟความสัมพันธ์ของรูปที่ 2.25 พบว่าอัตราส่วนที่น้อยกว่า 20% ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานก็ไม่ต่างกันมากนัก เมื่อนำค่าช่วงชีวิตของพาหะที่วัดได้นั้นไปแทนในสมการที่ (5.4) จะได้ค่าอัตราความเร็วในการรวมตัวของพาหะที่ผิว (S) ในกรณีนี้วัดที่ด้านหลังจึงเป็นค่าอัตราความเร็วในการรวมตัวของพาหะที่ผิวด้านหลัง (S_{eff})

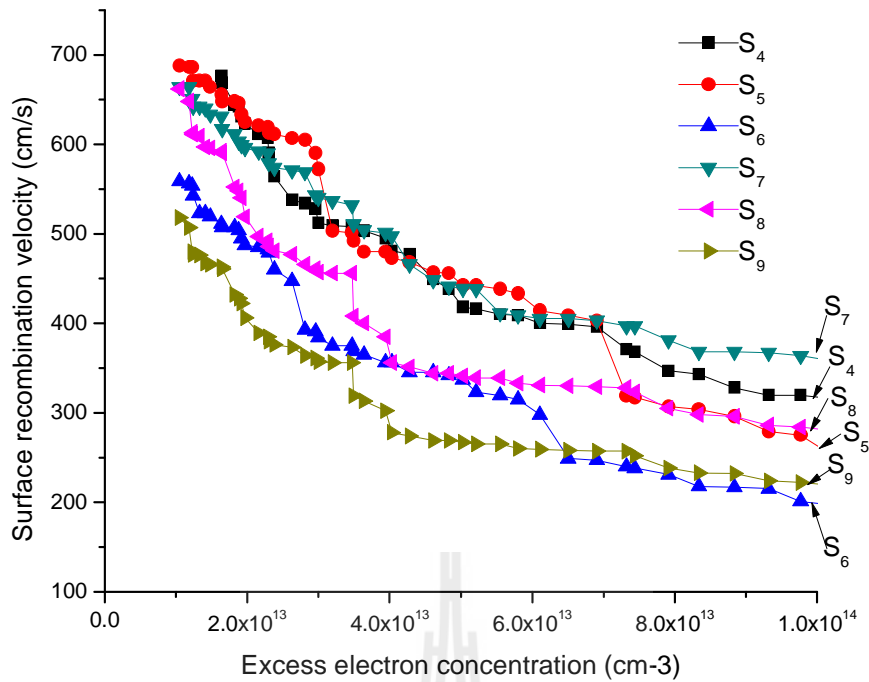
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนส่วนเกินกับอัตราความเร็วในการรวมตัวของพาหะที่ผิวด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เปรียบเทียบระหว่างโครงสร้าง BSF และ LBSF แสดงในรูปที่ 5.3 จากผลพบว่าในแต่ละโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อพี-เอ็นมีผลต่ออัตราความเร็วในการรวมตัวของพาหะที่ผิวด้านหลังของพาหะ โครงสร้างที่มีชั้นพาสซิเวชันแบบเปิดช่องชั้น SiO_2 หรือ LBSF นั้นได้ให้ค่า S_{eff} มีค่าน้อยกว่าโครงสร้าง BSF ที่ความหนาแน่นพาหะส่วนเกินที่ค่าต่างๆ ทำให้มีการคงค่าความหนาแน่นของพาหะส่วนเกิน Δn_{av} มีปริมาณสูงส่งผลไปยังค่า V_{oc} ที่ได้มีค่าสูงดังสมการที่ (5.9)

ตารางที่ 5.2 ค่าช่วงชีวิตและอัตราความเร็วของการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิวของชิ้นงานในเงื่อนไขโครงสร้างพาสซีเวชันที่แตกต่างกัน

ชิ้นงาน	ค่าช่วงชีวิต (τ_{eff} , μs)	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 -200 μm	61.44	316
S ₅ . Localized p ⁺ contacts_100 nm -350 μm	76.62	248
S ₆ . Localized p ⁺ contacts_100 nm -780 μm	98.18	194
S ₇ . Localized p+ contacts_150 nm-200 μm	57.88	348
S ₈ . Localized p+ contacts_150 nm-350 μm	70.79	268
S ₉ . Localized p+ contacts_150 nm-780 μm	90.52	210



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพาหะส่วนเกินกับอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ที่เปรียบเทียบระหว่างโครงสร้าง BSF และ LBSF



รูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นพาหะส่วนเกินกับอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะในเซลล์ตัวอย่างที่มีชั้นพาสซีเวชันกับระยะห่างช่องเปิดค่าต่าง ๆ

จากรูปที่ 5.4 พบว่าโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ LBSF ของตัวอย่าง S_6 และ S_9 ที่มีระยะห่างของช่องเปิด SiO_2 และความกว้างของช่องเปิดประมาณ $100 \mu\text{m}$ และ $150 \mu\text{m}$ ตามลำดับนั้นให้ค่าอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิวด้านหลังมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 194 และ 210 cm/sec ตามลำดับที่ตำแหน่งความหนาแน่นพาหะส่วนเกิน $10^{14} \text{ atoms/cm}^3$ เมื่อเทียบกับโครงสร้างอื่น ๆ แล้วค่า S_{eff} มีค่าน้อยนั้นเป็นผลดีต่อค่า V_{oc} และ I_{sc} เนื่องจากมีค่าช่วงชีวิตของพาหะที่สูงขึ้น พารามิเตอร์ที่ได้เหล่านี้มีความสำคัญต่อค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ในกรณีการศึกษานี้ได้คำนวณหาประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น ด้วยโปรแกรม PC1D ซึ่งแสดงรายละเอียดและการวิเคราะห์ในหัวข้อ 5.4

5.4 การวิเคราะห์การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จากพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองด้วยแบบจำลอง PC1D

ในการศึกษานี้ได้ใช้โปรแกรม PC1D สำหรับจำลองการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำเช่น ทรานซิสเตอร์ ไดโอด รวมถึงเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับกรณีแบบจำลองของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนนั้นแสดงหน้าตาการทำงานของโปรแกรมดังรูปที่ 5.5 ที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่าง ๆ

ที่เกี่ยวข้องกับชั้นต่าง ๆ ในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีการจำลองแหล่งแสงเทียมมาตรฐาน AM1.5 ใช้ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน

ตารางที่ 5.3 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการกำหนดในแบบจำลอง PC1D เพื่อนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานในเซลล์แสงอาทิตย์

ชื่อพารามิเตอร์	ค่ามาตรฐานที่ใช้
Device area (cm ²)	100 cm ²
Thickness (μm)	300 μm
Texture angle (degrees)	54.74
Front, Texture depth (μm)	10
Front Reflectance (%)	8%
τ_{mea} (μs)	ในตารางที่ 5.2
S_{front} (cm/s)	1×10^6
S_{back} (cm/s)	ในตารางที่ 5.2
1st front diff. (cm ⁻³)	6.2×10^{20} cm ⁻³
1st rear diff. (cm ⁻³)	1×10^{20} cm ⁻³

เมื่อนำค่าช่วงชีวิตของพาหะ (τ_{mea}) และค่าความเร็วการรวมตัวที่ผิวด้านหลัง (Back surface recombination velocity, BSRV: S_{eff}) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดชิ้นงานแสดงในตารางที่ 5.2 นำมาคำนวณในแบบจำลอง PC1D โดยกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองแสดงในตารางที่ 5.3 เพื่อหากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{sc}) แรงดันเปิดวงจร (V_{oc}) กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ (P_{max}) ค่า Fill factor (FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η)

รูปที่ 5.5 แสดงหน้าต่างการทำงานของโปรแกรมจำลอง PC1D โดยได้พิจารณาพารามิเตอร์ของตัวอย่าง S_6 และกำหนดค่าความต้านทานไฟฟ้าภายในของขั้วไฟฟ้าตามมาตรฐาน ค่าทางไฟฟ้าต่าง ๆ ซึ่งได้จากแบบจำลองผลสามารถสรุปและเปรียบเทียบตัวอย่างของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF และ BSF ได้ในตารางที่ 5.4 ได้ค่า I_{sc} ประมาณ 3.73 A ค่า V_{oc} ประมาณ 600.2 mV และให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุด 18.01% เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ในโครงสร้าง BSF ที่ให้ค่า I_{sc} ประมาณ 3.67 A ค่า V_{oc} ประมาณ 597.6 mV และให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุด 17.64% แสดงให้เห็นถึงโครงสร้าง LBSF ให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงกว่าประมาณ 2% ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายไปยังโหลดนั้นแสดงในรูปที่ 5.6

File: C:\Program Files\PC1D5\LBSF.prm

This is a PC1D test problem. It is a 100-cm² silicon solar cell with parameters typical of low-cost commercial products, including series resistance and shunt conductance. It has a shallow diffused emitter that has been pyramidally textured. The front reflectance is 10% across the solar spectrum. The file scans the one-sun I-V curve of the cell. To solve for the spectral response, select scan-qe.exc for the Excitation file.

DEVICE

Device area: 100 cm²
 Front surface texture depth: 10 μm
No surface charge
 Exterior Front Reflectance: 8%
No Exterior Rear Reflectance
 Internal optical reflectance enabled
 Front surface optically rough
 Emitter contact enabled
 Base contact: $1 \times 10^{-4} \Omega$
 Internal conductor: 0.2 S

REGION 1

Thickness: 300 μm
 Material from si.mat
 Carrier mobilities from internal model
 Dielectric constant: 11.9
 Band gap: 1.124 eV
 Intrinsic conc. at 300 K: $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
 Refractive index from si.inr
 Absorption coeff. from si300.abs
 Free carrier absorption enabled
 P-type background doping: $1.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
 1st front diff.: N-type, $6.215 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ peak
No 2nd front diffusion
 1st rear diff.: P-type, $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ peak
No 2nd rear diffusion
 Bulk recombination: $\tau_n = \tau_p = 98.18 \mu\text{s}$
 Front-surface recom.: S model, $S_n = S_p = 1 \times 10^6 \text{ cm/s}$
 Rear-surface recom.: S model, $S_n = S_p = 194 \text{ cm/s}$

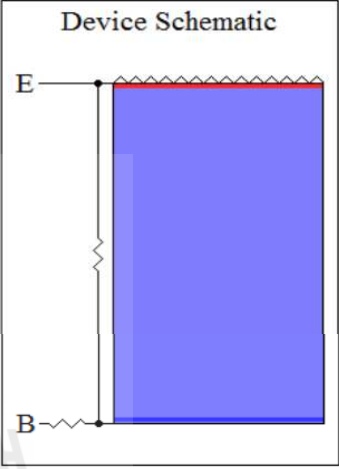
EXCITATION

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 Ib: -3.726 amps
 Max base power out: 1.801 watts
 Open-circuit Vb: 0.6002 volts

Device Schematic



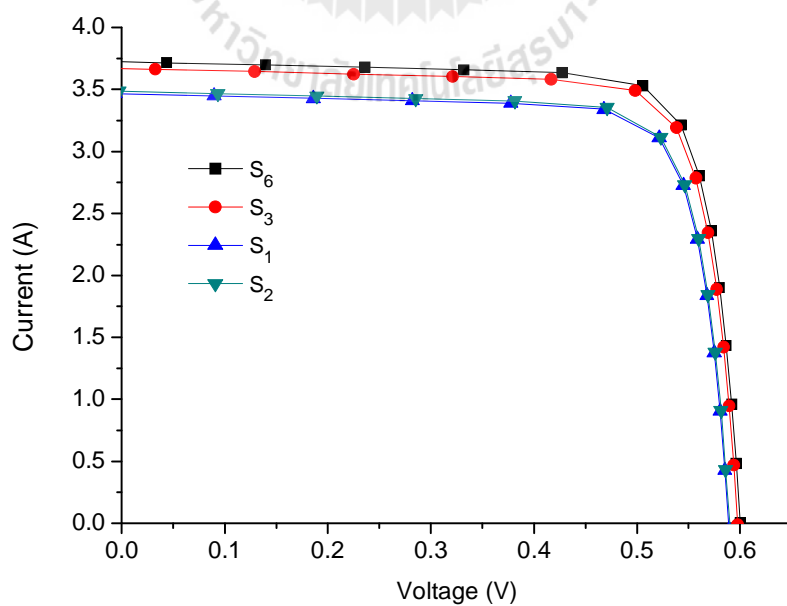
For Help, press F1

155 elements Trans 16

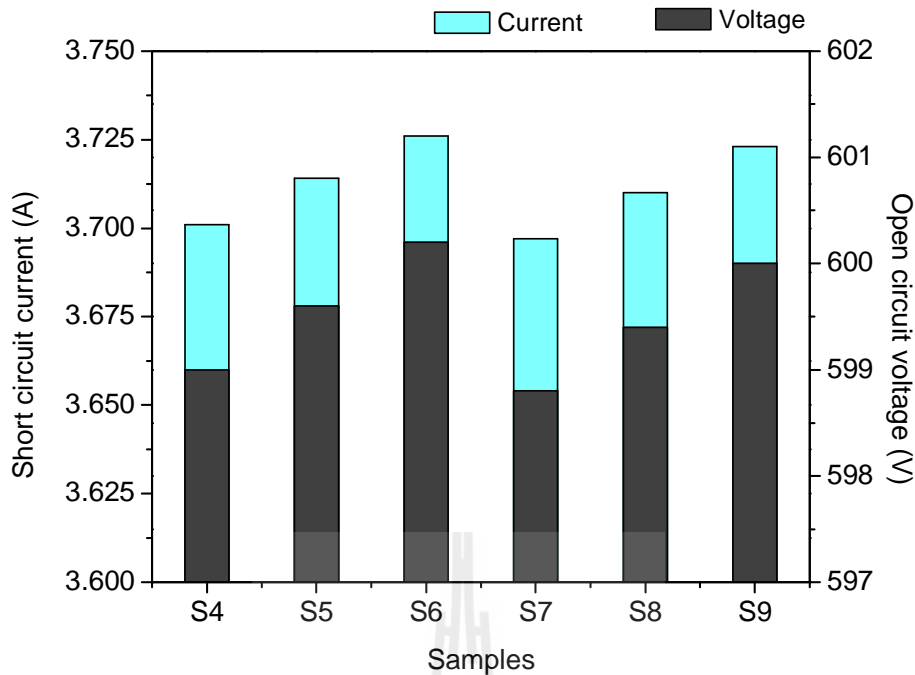
รูปที่ 5.5 หน้าต่างการทำงานของโปรแกรมแบบจำลอง PC1D สำหรับตัวอย่าง S₆

ตารางที่ 5.4 ค่าทางไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างต่าง ๆ ด้วยการจำลองจาก PC1D

ชื่อชิ้นงาน	I_{SC} (A)	V_{oc} (mV)	P_{max} (W)	FF	η (%)
S ₁ . n ⁺ emitter/p-Si /Al	3.48	589.80	1.64	0.795	16.35
S ₂ . MIS: n ⁺ emitter/p-Si/SiO ₂ /Al	3.46	589.00	1.63	0.796	16.25
S ₃ . BSF: n ⁺ emitter/pSi/p ⁺ Si/Al	3.67	597.60	1.76	0.796	17.64
S ₄ . Localized p ⁺ contacts_100 nm -190	3.70	599.00	1.78	0.804	17.84
S ₅ . Localized p+ contacts_100 nm -350	3.71	599.60	1.79	0.805	17.93
S ₆ . Localized p+ contacts_100 nm -780	3.72	600.20	1.80	0.805	18.01
S ₇ . Localized p+ contacts_150 nm-190	3.69	598.80	1.78	0.805	17.82
S ₈ . Localized p+ contacts_150 nm-350	3.71	599.40	1.79	0.805	17.90
S ₉ . Localized p+ contacts_150 nm-780	3.72	600.00	1.80	0.805	17.99



รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบกราฟ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF (S₆) กับ BSF (S₃)



รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรจากเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีระยะและขนาดช่องเปิด SiO₂ ต่าง ๆ กัน

รูปที่ 5.7 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ที่มีระยะช่องเปิดและความหนาของชั้นออกไซด์ตามเงื่อนไขในตารางที่ 5.4 ซึ่งพบว่าทั้งความหนาของออกไซด์และระยะช่องเปิดเพื่อให้เกิดพื้นที่ BSF นั้นมีผลต่อค่า I_{sc} และ V_{oc} จากการทดสอบพบว่าอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ส่วนที่ไม่ปิดช่องประมาณ 15% และมีความหนาของออกไซด์ที่เหมาะสมประมาณ 100 nm และมีระยะช่องเปิด และระยะห่างเหมาะสมประมาณ 101 μm และ 780 μm ตามลำดับนั้น

5.5 สรุป

โครงสร้าง LBSF ให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจากการจำลองผลด้วย PC1D มีค่า η ประมาณ 18.01% ภายใต้แสง AM1.5 ค่าประสิทธิภาพที่สูงขึ้นเป็นผลมาจากการมีชั้นออกไซด์และบริเวณ BSF บางส่วนเนื่องจากชั้นออกไซด์นั้นสามารถลดผลของการรวมตัวที่ผิวสัมผัสได้จากการลดจุดบกพร่องที่ผิวสัมผัสนั้น อีกทั้งส่วนของบริเวณ BSF บางส่วนยังช่วยให้เกิดสนามไฟฟ้าด้านหลังทำให้ช่วงอายุของพาหะยาวขึ้น ปัจจัยทั้งสองส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF สูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสร้างชั้น LBSF ด้วยวิธีการฉีดด้วยเครื่องพิมพ์แบบฉีดอย่างง่ายสามารถให้ผลการปรับปรุงประสิทธิภาพเพื่อเป็นแนวทางการผลิตในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

บทที่ 6

สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 ผลลัพธ์จากการตัดแปลงเครื่องพิมพ์แบบฉีดสำหรับการสร้างชั้น LBSF

เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างแบบ LBSF (Local back surface field) ประกอบด้วยชั้นพาสซีเวชันด้านหลังด้วยฟิล์ม SiO_2 บาง ๆ และเพื่อให้เกิดบริเวณสนามไฟฟ้าจากความแตกต่างของความหนาแน่นอะตอมสารเจือหรือเรียกว่าบริเวณ BSF โครงสร้างนี้จึงมีการเปิดส่วน SiO_2 บางส่วนเพื่อให้เกิดบริเวณ BSF ลักษณะดังกล่าวสามารถสร้างได้หลายวิธีเช่นใช้ soft mask จากสารไวแสงที่มีลวดลายตามช่องเปิด และผ่านกระบวนการ lift-off หรืออาจใช้กระบวนการ etching ชั้น SiO_2

ในการศึกษานี้มีแนวคิดลดขั้นตอนการใช้ mask เพื่อเปิดช่องชั้น SiO_2 ด้วยวิธีการฉีด และประสบความสำเร็จในขั้นตอนในการตัดแปลงเครื่องพิมพ์แบบฉีดให้ใช้กับแผ่นฐานซิลิคอนได้ และหาได้เงื่อนไขจำนวนครั้งของการฉีดเพื่อให้ลวดลายช่องเปิดของ SiO_2 เป็นแนวเส้นตรงที่มีขนาดกว้างเล็กสุดประมาณ $105 \mu\text{m}$ ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% และระยะห่างตั้งแต่ $195 \mu\text{m}$ ถึง $1000 \mu\text{m}$ ความคลาดเคลื่อนจากแบบไม่เกิน 5% เนื่องจากลักษณะการฉีดสารอะซิโตนมีการกระจายเป็นละอองฝอย ทำให้ลวดลายที่ได้มีขนาดใหญ่กว่ารูปแบบที่กำหนดในโปรแกรมภาพ ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าจำนวนการฉีดหลายครั้งส่งผลให้ขนาดของช่องเปิดชั้นสารไวแสงเล็กลง เพราะสารไวแสงที่ถูกละลายด้วยอะซิโตนนั้นได้แยกออกและเคลื่อนไปยังขอบ จำนวนครั้งในการฉีดที่เหมาะสมนี้เท่ากับ 10 ครั้ง

6.2 ผลลัพธ์จากการสร้างรอยต่อ p-n ด้วยเทคนิค Spin-on-doping (SOD)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนโครงสร้าง LBSF ในงานวิจัยนี้ได้ผลิตรอยต่อ p-n ด้วยวิธี Spin-on doping (SOD) ที่ใช้ฟิล์ม Phosphosilicate glass (PSG) จากการสังเคราะห์สารละลายฟอสฟอรัสที่มีส่วนประกอบหลักของสารละลายเตตระเอธิลโอโรซิลิเกต (Tetraethyl orthosilicate, TEOS) และสารละลายกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เพื่อให้ได้ฟิล์ม PSG ที่ใช้เป็นแหล่งของสารเจือนั้นสามารถควบคุมปริมาณสารเจือฟอสฟอรัสได้จากความเข้มข้นของ H_3PO_4 ในอัตราส่วนโดยปริมาตรของ TEOS: H_3PO_4 เป็น 4:1 5:1 และ 6:1

ความเข้มข้นของฟอสฟอรัส และอุณหภูมิการแพร่สารเจือมีผลต่อค่าความต้านทานแผ่น (ρ_s) ของชั้น n จากการทดสอบที่อุณหภูมิการแพร่ระหว่าง 800°C ถึง 1000°C พบว่าค่า ρ_s สูงเท่ากับ $800 \Omega/\text{square}$ ที่เงื่อนไข TEOS: $\text{H}_3\text{PO}_4 = 6:1$ ภายใต้อุณหภูมิการแพร่ 800°C และ ρ_s ต่ำลงเป็น $128 \Omega/\text{square}$ ที่เงื่อนไข TEOS: $\text{H}_3\text{PO}_4 = 4:1$ ภายใต้อุณหภูมิการแพร่ 1000°C จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแหล่งสารเจือในรูปของ sol-gel นั้นสามารถมาเคลือบบนแผ่นฐานซิลิคอนสำหรับสร้างรอยต่อ p-n ที่ให้ค่า ρ_s ตามต้องการจากการควบคุมปริมาณสารเจือที่แตกต่างกัน ภายใต้อุณหภูมิการแพร่

เดียวกัน จากผลการศึกษาที่ไม่เพียงได้ชั้น n จากเทคนิค SOD แต่สามารถได้แนวทางการแพร่สารเจือที่ให้ชั้น n ที่มีค่า ρ_s แตกต่างกันในบริเวณ emitter และบริเวณ Metal contact หรือเรียกว่าโครงสร้างแบบ Selective emitter

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ค่า ρ_s มีค่าเท่ากับ 128 Ω/square ที่เงื่อนไข TEOS:H₃PO₄ = 4:1 ภายใต้อุณหภูมิการแพร่ 1000 °C เพื่อให้ได้ชั้น n-emitter เป็นแบบ lightly doped emitter ที่สามารถตอบสนองต่อแสงสีน้ำเงินได้ดี อย่างไรก็ตามเมื่อทำการสร้างขั้วไฟฟ้าด้านบนและด้านล่างผ่านกระบวนการ firing ในเตาเผาที่ไม่มีระบบการควบคุม profile temperature ส่งผลให้ค่า R_s ที่ได้มีค่าสูงมาก ดังนั้นเพื่อลดผลของตัวแปรอื่นที่เกิดขึ้นจากระบวนการผลิตขั้วไฟฟ้าที่ยังมีประสิทธิภาพไม่ดีพอในห้องปฏิบัติการนั้น ผลของประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์จึงวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง PC1D ที่ใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ จากการวัดตัวอย่างจริง เช่นค่าการสะท้อนแสงที่ผิว ค่าความต้านทานแผ่นของชั้น n ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่นฐาน p ค่าช่วงชีวิตของพาหะ และค่าอัตราความเร็วในการรวมตัวใหม่

6.3 ผลลัพธ์จากการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ด้วยวิธีการฉีดยุติ

จากผลสำเร็จในการเปิดช่อง SiO₂ ด้านหลังด้วยวิธีการฉีดยุติ ได้สร้างบริเวณ p⁺ ภายในช่องเปิดที่เรียกว่า LBSF Local back ด้วยกระบวนการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่าง Al-Si เป็น Al-Si อัลลอยในบริเวณช่องเปิด SiO₂ ภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิที่ 577 °C นาน 30 นาที ส่งผลเซลล์ LBSF สำหรับการศึกษานี้ได้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ส่วนที่ไม่เปิดช่องต่าง ๆ กันประกอบด้วย 12.95% 28.86% และ 50.50% และความหนาของออกไซด์ที่ 100 nm และ 150nm จากผลการวัดค่าช่วงชีวิตของพาหะกับเซลล์แสงอาทิตย์ LBSF ต้นแบบในเงื่อนไขการผลิตต่าง ๆ พบว่าระยะช่องเปิดของชั้นพาสซีเวชันออกไซด์ที่ 105 μm และระยะห่างประมาณ 780 μm ที่มีค่าอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ส่วนที่ไม่เปิดช่องเท่ากับ 12.95% และความหนาของออกไซด์ที่ 100 nm นั้นผลิต V_{oc} และ I_{sc} สูงสุดเท่ากับ 600 mV และ 3.72 A ตามลำดับ เพิ่มขึ้น 0.5% และ 1.5% ตามลำดับเมื่อเทียบกับเซลล์โครงสร้าง BSF เซลล์ LBSF นี้มีค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจากการจำลองผลด้วย PC1D มีค่า η ประมาณ 18.01% ภายใต้แสง AM1.5

6.4 ข้อเสนอแนะ

ระบบหัวฉีดที่ใช้ศึกษาเป็นแบบหยดตามคำสั่ง (drop-on-demand) ด้วยระบบความร้อน (Thermal inkjet or Bubble jet) มีข้อเสียขณะทำงานจากการอุดตัน เนื่องจากชุดขดลวดความร้อนทำให้เกิดไอน้ำขยายตัวและดันให้สารละลายพุ่งแตกออกเป็นฝอยเล็กๆ กระจายทำให้ปริมาณน้ำในสารละลายระเหยอย่างรวดเร็ว ในการพัฒนาต่อไปควรนำการฉีดสารละลายด้วยการสั่นของแผ่นเพียโซจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับวัสดุ การสั่นดังกล่าวสามารถดันปริมาณสารละลายให้ไหลออกไปเป็นจังหวะตามระดับการป้อนแรงดันไฟฟ้า ซึ่งระบบนี้สามารถลดผลการแตกกระจายฝอยของสารละลาย

ระบบ firing contact เป็นส่วนที่สำคัญอย่างยิ่งสำหรับการลดผลกระทบของความต้านทาน
แฝงโดยเฉพาะ R_s ส่งผลต่อการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลด ดังนั้นการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จึงจำเป็นต้อง
มี Profile temperature สำหรับการ firing contact ที่เหมาะสมเพื่อให้ค่า R_s ต่ำที่สุด



บรรณานุกรม

- ณัฐพงศ์ ผิวผา และทิพย์วรรณ ฟิงสุวรรณรักษ์ (1-3 ธันวาคม 2553). “การพัฒนาเครื่อง *Inkjet Printer* ต้นทุนต่ำเพื่อเปิดช่องทางขึ้นสารกึ่งตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน” 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.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- 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.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- 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 3O/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.
- Fangsuwannarak, T., & Kunchana, K. (2013). **Optical Properties of Nano-crystalline Silicon Films Prepared by Using Sol-Gel Spin Coating Process**. *The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics*, No. 43.
- 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.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- 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

ภาคผนวก ก

การคำนวณความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลายตั้งต้น

การคำนวณหาความเข้มข้นของสารเจือฟอสฟอรัส H_3PO_4

กรณีกำหนดใช้สัดส่วนของสารละลายผสม $TEOS : H_3PO_4 = 4 : 1$

อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารละลายประกอบด้วย

$$TEOS : C_2H_5OH : H_2O : H_3PO_4 = 5 : 1.5 : 10 : 1.25 \text{ ml}$$

การคำนวณปริมาตรสารที่อยู่ในสารละลายที่ต้องการ เพื่อหาความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดที่เตรียมสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมสารละลายสำหรับการผลิตฟิล์ม PSG มีดังนี้

$$TEOS \text{ มีมวลจากสูตรของสารละลาย (MW) } = 208.33 \text{ g/mol}$$

$$C_2H_5OH \text{ มีมวลจากสูตรของสารละลาย (MW) } = 46.07 \text{ g/mol}$$

$$H_3PO_4 \text{ มีมวลจากสูตรของสารละลาย (MW) } = 98.00 \text{ g/mol}$$

$$H_2O \text{ มีมวลจากสูตรของสารละลาย (MW) } = 18.00 \text{ g/mol}$$

การคำนวณหาจำนวนโมลของกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เข้มข้น 85%

พิจารณาสารละลายกรด H_3PO_4 100 g มีส่วนของกรดเท่ากับ 85 g มีส่วนของน้ำเท่ากับ

$$100\text{g} - 85\text{g} = 15\text{g}$$

กำหนดปริมาตร $H_3PO_4 = 1.25 \text{ ml}$ หามวลของ H_3PO_4 ได้จาก

$$m = D \times V$$

โดยที่ D คือความหนาแน่นมีหน่วยเป็นกรัมต่อมิลลิลิตร (g/ml)

m คือมวล หน่วย (g)

V คือปริมาตร หน่วย ml

$$\text{ดังนั้นมวลของ } H_3PO_4 \text{ มีค่าเท่ากับ } m = 1.69 \text{ g/ml} \times 1.25 \text{ ml} = 2.1125 \text{ g}$$

$$\text{และส่วนของกรด } H_3PO_4 = (2.115 \text{ g} \times 85 \text{ g}) / 100 \text{ g} = 1.796 \text{ g}$$

$$\text{และส่วนของน้ำในกรด } H_3PO_4 = (2.115 \text{ g} \times 15 \text{ g}) / 100 \text{ g} = 0.317 \text{ g}$$

$$\text{ดังนั้นจะได้จำนวนโมลของกรด } H_3PO_4 = \frac{1.796 \text{ g}}{98 \text{ g/mol}} = 0.0183 \text{ mol}$$

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

คำนวณหาจำนวนโมลของเอทานอล (C₂H₅OH)

$$\text{มวลของ C}_2\text{H}_5\text{OH} = 0.79 \text{ g/ml} \times 1.5 \text{ ml} = 1.185 \text{ g}$$

$$\text{ดังนั้นจะได้จำนวนโมลของกรด C}_2\text{H}_5\text{OH} = \frac{1.185 \text{ g}}{46.07 \text{ g/mol}} = 0.0257 \text{ mol}$$

คำนวณหาจำนวนโมลของเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (TEOS)

$$\text{มวลของ TEOS คือ } m = 0.933 \text{ g/ml} \times 5 \text{ ml} = 4.665 \text{ g}$$

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

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

โดยที่ N คือ ความหนาแน่นของสารมีหน่วยเป็นอะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

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

$$\text{ความหนาแน่นของฟอสฟอรัส} = 0.0183 \text{ mol} \times 6.02 \times 10^{23} \text{ atom/mol}$$

$$\text{ดังนั้น จะได้ปริมาณของฟอสฟอรัสในสารละลาย } 17.75 \text{ ml} = 1.102 \times 10^{22} \text{ atom}$$

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

การคำนวณหาจำนวนโมลของสารละลายที่มีสัดส่วน TEOS : H₃PO₄ ในอัตราส่วน 1:5 และ 1:6 มีขั้นตอนการคำนวณเช่นเดียวกับข้างต้น

ดังนั้นจะได้อัตราส่วนของสารตั้งต้นแสดงในตารางด้านล่างดังนี้

ตารางแสดงอัตราส่วนของสารละลายตั้งต้นสำหรับฟิล์ม PSG

	TEOS : C ₂ H ₅ OH : H ₂ O : H ₃ PO ₄ (ml)				ปริมาตรสุทธิ
อัตราส่วนโดยปริมาตร	5	1.5	10	1.25	17.75ml
อัตราส่วนโดยโมล (mol)	0.0224	0.0257	0.5732	0.0183	(1:4)
อัตราส่วนโดยปริมาตร	5	10	1.5	1	17.5ml
อัตราส่วนโดยโมล(mol)	0.0224	0.5732	0.0257	0.0146	(1:5)
อัตราส่วนโดยปริมาตร	5	10	1.5	0.83	17.33 ml
อัตราส่วนโดยโมล(mol)	0.0224	0.5732	0.0257	0.0122	(1:6)

ภาคผนวก ข

การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้สร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์

การสร้างฟิล์มบาง SiO_2 สำหรับเป็นชั้นพาสซีเวชันด้านหลังในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการเตรียมสารละลายตั้งต้นจากส่วนผสมของ TEOS $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ และ H_2O เพื่อก่อตัวเป็นฟิล์ม SiO_2 สำหรับเป็นชั้นพาสซีเวชันที่ด้านหลังแผ่นฐานรอง p-Si สารละลายได้เคลือบด้วยวิธีการหมุนเหวี่ยงภายใต้เงื่อนไขค่าอัตราการหมุนเหวี่ยง และเวลาที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ความหนาประมาณ 100 และ 150 nm การเตรียมสารละลายตั้งต้นและขั้นตอนการเตรียมสำหรับผลิตฟิล์ม SiO_2 มีดังนี้

1. การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์

กำหนดสารตั้งต้นสำหรับผลิตซิลิคอนไดออกไซด์ใช้อัตราส่วนโมลของ TEOS : $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$: H_2O = 1 : 2 : 2 และเติมสารละลาย CTAB = 0.0009 M และ HCl = 0.1M ผสมในสารละลายทั้งหมด 20 ml แสดงค่า MW ของสารแต่ละชนิดโดยคำนวณดังต่อไปนี้

TEOS มีมวลจากสูตรของสารละลาย (MW) = 208.33 g/mol มี D = 0.933 g/ml ความเข้มข้น 98% (%v/v)

$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ มีมวลจากสูตรของสารละลาย (MW) = 46.07 g/mol มี D = 0.79 g/ml ความเข้มข้น 99.9 (%v/v)

H_2O มีมวลจากสูตรของสารละลาย (MW) = 18 g/mol มี D = 1 g/ml

HCl มีมวลจากสูตรของสารละลาย (MW) = 36.5 g/mol มี D = 1.19 g/ml ความเข้มข้น 37 (%w/v)

CTAB มีมวลจากสูตรของสารละลาย (MW) = 364.5 g/mol ความเข้มข้น 98 %

เนื่องจากสารตั้งต้นที่ผลิต sol-gel คือ TEOS และ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ซึ่งมีความบริสุทธิ์มากกว่า 98% ดังนั้นในการเตรียมสารละลายด้วยอัตราส่วนโมล (mole ratio) จึงสามารถเทียบเท่ากับอัตราส่วนปริมาตร (Volume ratio) ได้ดังนี้

TEOS \rightarrow 1 mol = 1 ml

$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ \rightarrow 2 mol = 2 ml

H_2O \rightarrow 2 mol = 2 ml

ถ้าหากต้องการเตรียมสารปริมาณ 20 ml จะต้องใช้ TEOS = 4 ml และ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ = 8 ml ซึ่งได้ปริมาณสารตั้งต้นทั้งสิ้น 12 ml ส่วนน้ำไม่นำไปรวมกับสารตั้งต้น เนื่องจากน้ำเป็นส่วนประกอบของ HCl ซึ่งมีหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) และในสารลดแรงตึงผิว CTAB

HCl 0.1M มีมวลจากสูตรของสารละลาย (MW) = 36.5 g/mol มี D = 1.19 g/ml ความเข้มข้น 37% (%w/v)

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

ดังนั้น
$$\text{HCl } 37\% = \frac{\text{HCl (g)}}{100 \text{ (ml)}} \times 100 \quad \text{หมายถึง สารละลาย } 100 \text{ ml มีตัวถูกละลาย (HCl) } 37 \text{ g}$$

หาความเข้มข้นของกรด HCl ในหน่วย M

สารละลายกรด 100 ml มีเนื้อกรด 37 g

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

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

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad \text{จะได้ว่า } 10.14\text{M} \times V_1 = 0.01\text{M} \times 10\text{ml}$$

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

หมายความว่า ได้ใช้กรด HCl เข้มข้น 37% มีปริมาตร 0.02 ml ผสมในสารละลาย 20 ml ขณะนี้มีสารละลายถูกผสมทั้งสิ้น $12 + 0.02 = 12.02 \text{ ml}$ และจะเหลือสารที่ต้องถูกเติมเพิ่มอีกซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิว $20 - 12.2 = 7.98 \text{ ml}$

ถ้าต้องการเตรียมสารละลาย 0.0009 M CTAB จำนวน 7.98 ml คำนวณได้จาก

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

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

CTAB มีมวลจากสูตรของสารละลาย (MW) = 364.5 g/mol ความเข้มข้น 99 (%w/v)

ปริมาณของ CTAB ที่ใช้ $m = n \times \text{MW} = 0.000226 \text{ mol} \times 364.5 \text{ g/mol} = 0.08241 \text{ g}$
ผสมกับน้ำกลั่นบริสุทธิ์อีก 7.98 ml

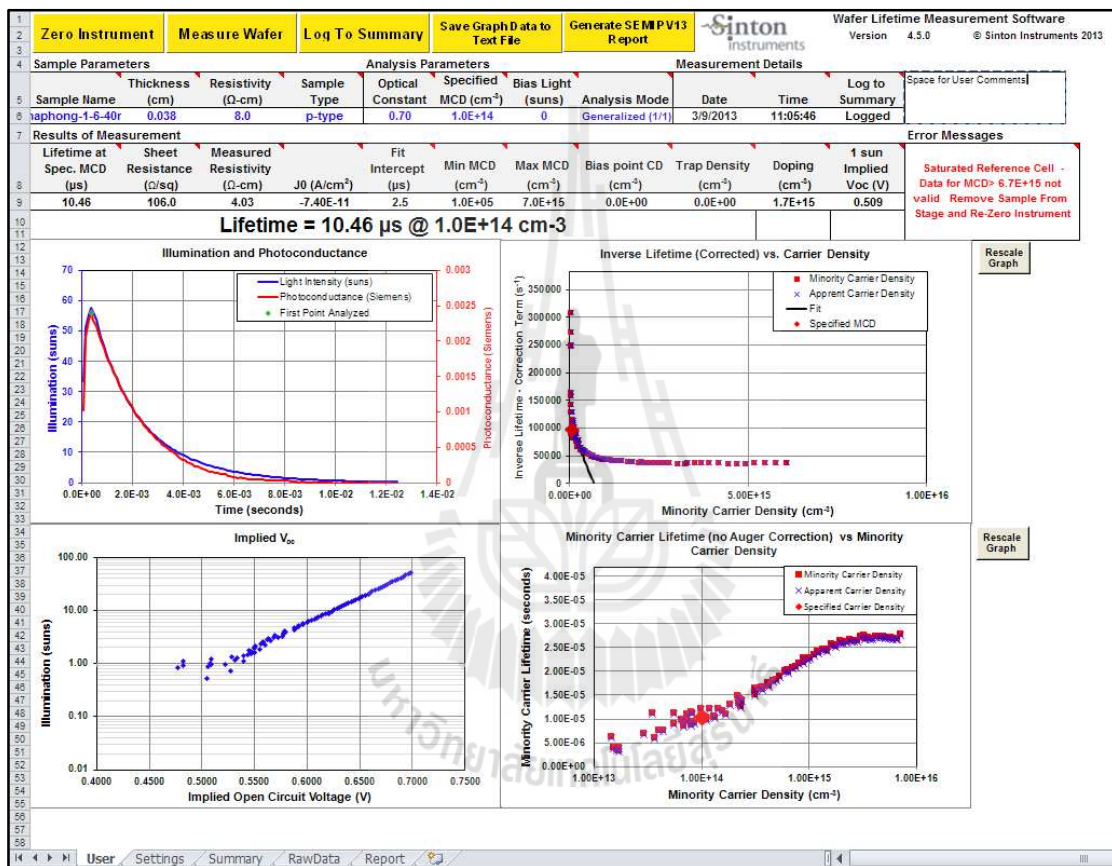
ภาคผนวก ค

ผลการวัดค่าช่วงชีวิตพาหะที่ได้จากเครื่อง WCT-120 Sinton

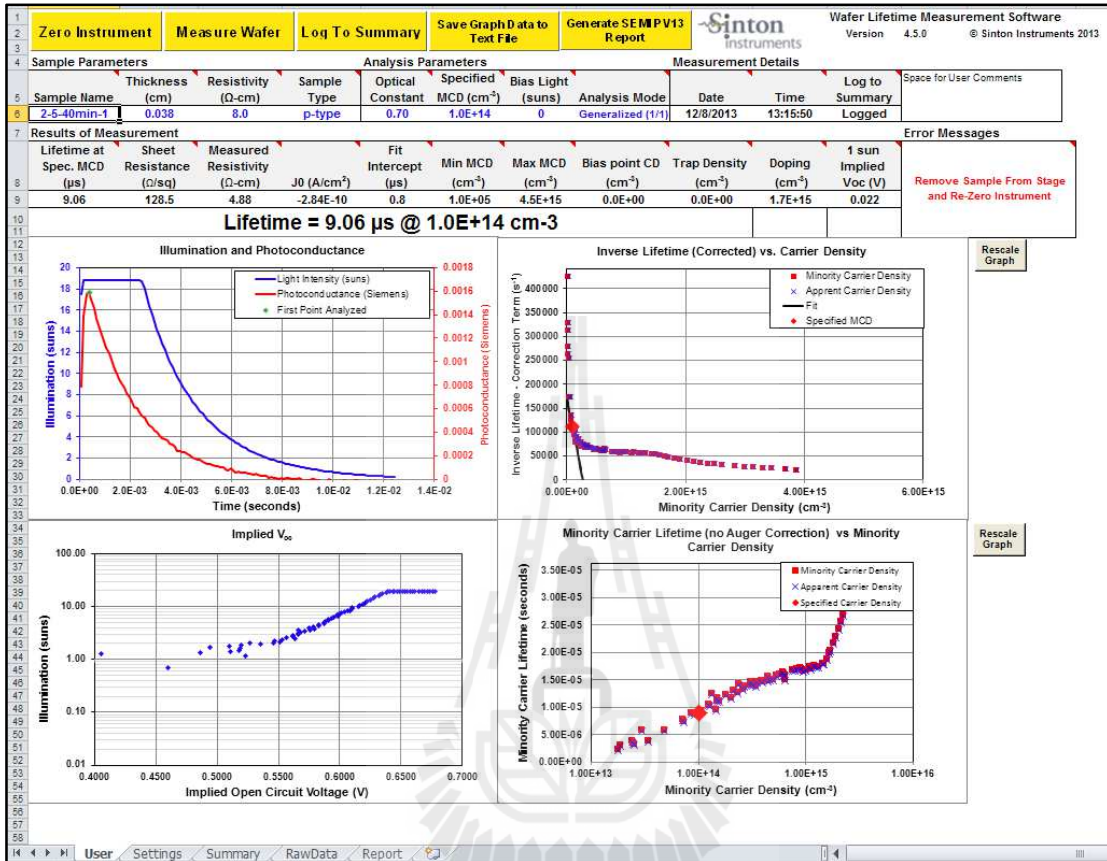
การวัดค่าช่วงชีวิตพาหะที่ได้จากเครื่อง WCT-120 Sinton

แสดงตัวอย่างหน้าจอจากเครื่อง WCT-120 Sinton จากการวัดตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์

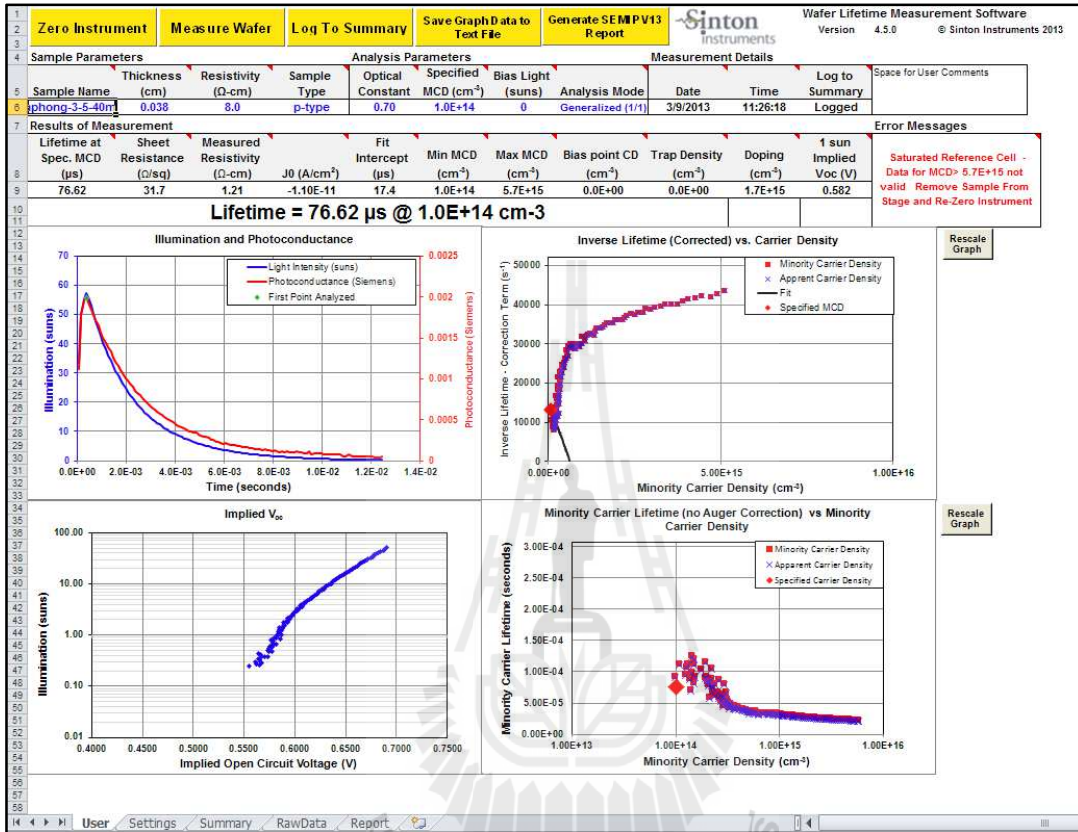
โครงสร้าง n⁺emitter/p-Si /Al ที่ได้รอยต่อพี-เอ็นจากเทคนิคการแพร่ซึมแบบ SOD



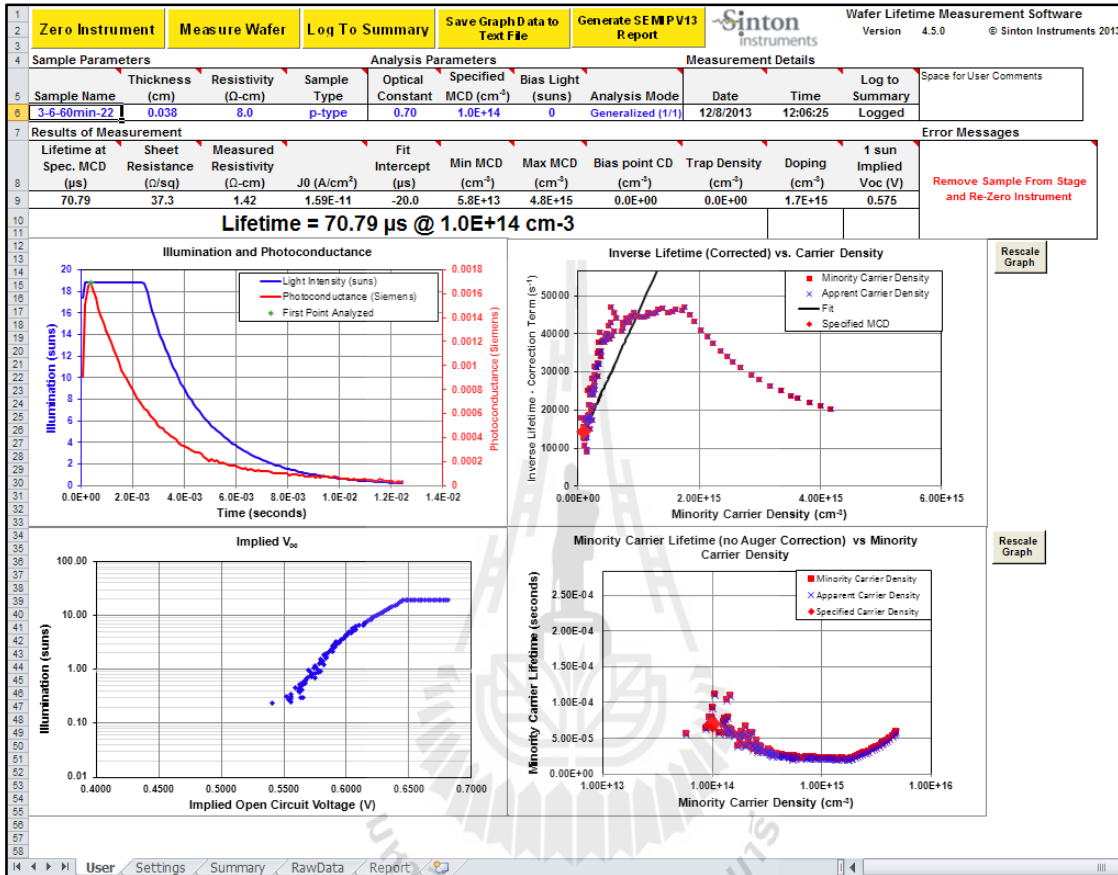
แสดงตัวอย่างหน้าจอจากเครื่อง WCT-120 Sinton จากการวัดตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้าง โครงสร้าง n⁺emitter/p-Si/SiO₂/Al อาจเรียกว่าโครงสร้าง MIS เป็นโครงสร้างของพลีทซิลิคอน ชั้นรอยต่อพี-เอ็น และชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนา 100 nm และชั้นอะลูมิเนียมเคลือบด้านหลัง



แสดงตัวอย่างหน้าจอจากเครื่อง WCT-120 Sinton จากการวัดตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้าง Localized p⁺ contacts_100 nm -350 μm เป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 100 nm เคลือบแผ่นด้านหลังมีขนาดกว้างของช่องเปิด 105 μm ระยะห่างของช่องเปิด 350 μm และมีชั้นอลูมิเนียมเคลือบด้านหลัง



แสดงตัวอย่างหน้าจอจากเครื่อง WCT-120 Sinton จากการวัดตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้าง Localized p⁺ contacts_150 nm -350 μm เป็นโครงสร้างของผลึกซิลิคอนรอยต่อพี-เอ็น ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 150 nm เคลือบแผ่นด้านหลังมีขนาดกว้างของช่องเปิด 105 μm ระยะห่างของช่องเปิด 350 μm และมีชั้นอลูมิเนียมเคลือบด้านหลัง



ภาคผนวก ง

สารไวแสง และสารละลายอะซีโตน

เงื่อนไขในการใช้งานสารไวแสง SUMIRESIST PFI-34

แผ่นฐานที่ใช้ : แผ่นฐานซิลิคอนขนาด 4 นิ้ว

การทำ HDMS : ปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง ครึ่งนาที

หลังจากนั้นล้างทำความสะอาดที่มุม 50° (น้ำบริสุทธิ์)

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

ความบางของฟิล์มที่ทำได้ : $0.9\ \mu\text{m}$ (Bottom of swing curve of silicon)

$1.16\ \mu\text{m}$ (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)

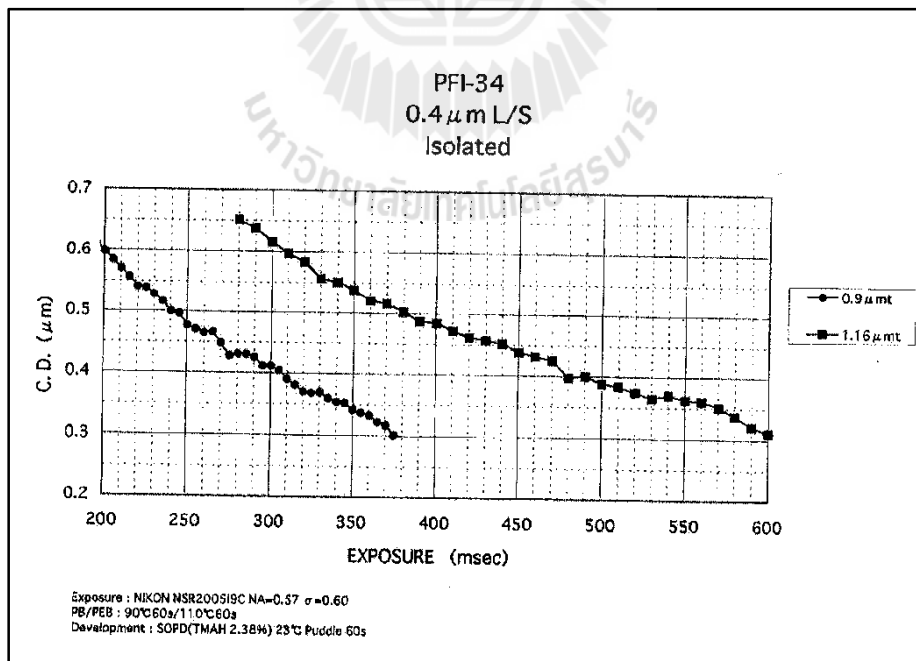
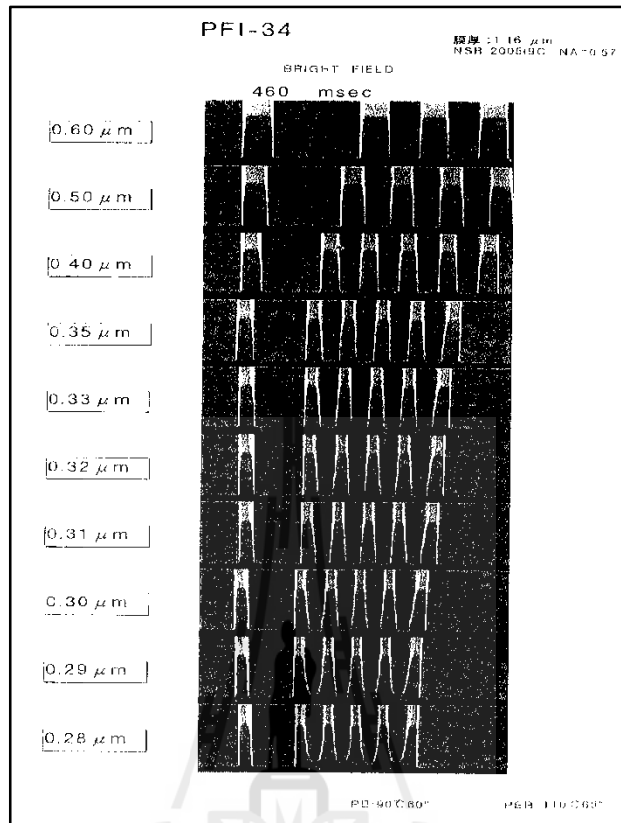
SUMIRESIST PFI-34



Sumiresist positive-type photoresist.

รูปที่ ก สารไวแสง SUMIRESIST PFI-34 ชนิด Positive

ภาพแสดงลักษณะความหนาต่าง ๆ ที่ได้จาก Sumiresist PFI-34



อะซีโตน : Acetone

ชื่อเรียกอื่น	Dimethyl ketone; beta-ketopropane; pyroacetic ether; 2-propanone.
CAS No.	67-64-1
สูตรโมเลกุล	C ₃ H ₆ O
น้ำหนักโมเลกุล	58.08
จุดเดือด	56.5 องศาเซลเซียส
คุณสมบัติ	เป็นของเหลวไม่มีสี ระเหยได้ มีรสหวาน มีกลิ่นเฉพาะตัว
การใช้ที่ผิดกฎหมาย	ใช้เป็นตัวทำละลายในการสกัดฝิ่น(opium) และใบโคคา (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 ที่ภาษาหรือบทรู • ผู้ผลิต ผู้นำเข้า หรือผู้ขายสารระเหย ไม่จัดให้มีฉลากข้อความ คำเตือน ที่ภาษาหรือบทรู

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



thipwan@g.sut.ac.th

ผศ.ดร.ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์

Assistant Professor Dr. Thipwan Fangsuwannarak

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญาตรี

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

ระดับปริญญาโท

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

ระดับปริญญาเอก

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

ประวัติการทำงาน

2540-ปัจจุบัน อาจารย์ประจำ และนักวิจัย วิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี จ.นครราชสีมา

2555 ที่ปรึกษา R&D group, Innovative Harvesting Energy, China

2554 ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินข้อเสนอโครงการวิจัย ให้แก่วิทยาลัยนวัตกรรมการ
จัดการข้อมูล HDD สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2552-2554 วิทยากรผู้เชี่ยวชาญฝึกอบรมการผลิตและวิเคราะห์ฟิล์มบาง
อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสไดฟ์ ให้แก่บริษัทซีเกต บริษัทเวสเทินทีดีจีตอล
บริษัทอิตาซียาร์ดิสไดฟ์

2553 ออกแบบระบบเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อการเรียนรู้ และจัดบรรยาย อบรม
ภาคสนาม ให้แก่โรงเรียนบ้านเฉลียงวิทยา และผู้นำชุมชน อ.ครบุรี จ.
นครราชสีมา

2548-2550 นักวิจัยในกลุ่มโครงการ Global Climate and Energy Project
(GCEP) แหล่งทุนจาก Stanford University, USA

2540 นักวิจัยห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor
Devices Research Laboratory, SDRL) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพฯ

ประวัติการทำงาน

2536-2537 อาจารย์ประจำวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ บางเขน กรุงเทพฯ

สาขาวิชาการที่มีความเชี่ยวชาญ

- การวิเคราะห์วัสดุสารกึ่งตัวนำ และวัสดุเก็บเกี่ยวพลังงาน (Physical, Optical and Electrical Measurements)
- การผลิตเซลล์อาทิตย์และพัฒนาประสิทธิภาพด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ
- ออกแบบระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ในแบบระบบอิสระและระบบที่เชื่อมต่อบริเวณสายส่ง
- ออกแบบระบบไฮบริดพลังงานทดแทนจากระบบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ และระบบเก็บเกี่ยวพลังงานด้วยเพียโซอิเล็กทริก

ผลงานและรางวัล

1. Patent (2012) อนุสิทธิบัตรการประดิษฐ์ “การใช้วัสดุเทฟลอนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โดยไม่ใช้สารละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์” เลขที่อนุสิทธิบัตร 6976
2. บทความยอดเยี่ยม Energy Materials paper award for 7th Conference on Energy Network of Thailand, 2011 “การสร้างชั้นพาสซีเวชันด้านหลังสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีการทะลุของอะลูมิเนียม และการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างชั้น”
3. Research Group Scholarship: Global Climate and Energy Project (GCEP) 2005-2007, Stanford University, USA
4. Ph.D. Scholarship สำนักงานแผนนโยบายพลังงานแห่งชาติ ประเทศไทย ในหัวข้อ วิทยานิพนธ์เกี่ยวกับ Third-generation of Silicon Solar cells ศึกษาที่ Centre of Excellence for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, UNSW, Australia

ภาระงานสอนและที่ปรึกษางานวิทยานิพนธ์

สอนในระดับปริญญาตรี ปริญญาโท และปริญญาเอก ในรายวิชาดังนี้
อิเล็กทรอนิกส์วิศวกรรม วิศวกรรมไฟฟ้า1 สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เซลล์แสงอาทิตย์
ประยุกต์ เซลล์แสงอาทิตย์และระบบ เทคโนโลยีวงจรรวม วงจรรวมดิจิทัล
ที่ปรึกษางานวิทยานิพนธ์
ฟิล์มบาง ZnO:Bi สำหรับป้องกันการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์
หมึกพอสพอร์สสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงแบบ Selective Emitter Cell
เครื่องฉีดสารสำหรับสร้างชั้นพาสซีเวชันให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธี
ต้นทุนต่ำ
สังเคราะห์ฟิล์มบางผลึกนาโนซิลิคอนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ Third Generation

การบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

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

งานวิจัยที่กำลังทำ

1. งานวิจัยเรื่อง การสังเคราะห์หมึกผสมผลึกนาโนซิลิคอนสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบใหม่และต้นทุนต่ำ
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 2 ปี
แหล่งทุน วช. 2557 ล่วงไปแล้ว 35%
2. งานวิจัยเรื่อง การปรับปรุงค่าความนำไฟฟ้าและช่องว่างอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงของผลึกนาโนซิลิคอนควอนตัมดอทสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน วช. 2556 ล่วงไปแล้ว 80%
3. งานวิจัยเรื่อง การสร้างผิวซิลิคอนขรุขระรูปทรงพีระมิดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการใช้หน้ากากกริดในสารละลายเคมีที่ไม่ใช่ไฮโดรฟลูออริกแอซิด
สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัยระยะเวลา 1 ปี
แหล่งทุน วช. 2555 ล่วงไปแล้ว 99%

ผลงานตีพิมพ์

1. J. Kaewphoka, **T. Fangsuwannarak**, S.T. Rattanachan “Synthesis of surfactant-assisted nanostructured Bidoped Zinc oxide for photo-sensing application”, Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2014 11th International Conference ID paper 1396, 15-17 May (2014)
2. Phiwpha N., **Fangsuwannarak T.** and Sopitpan S. “Locally contacted rear surface passivated solar cells by inkjet printing”, Proc. of SPIE Vol. 9234 92341B-1 (2014)
3. Natthaphong Phiwpha and **Thipwan Fangsuwannarak**, “Surface Passivation of Point-Contacted Solar Cells by Inkjet Printing” Integrated Ferroelectrics, 149: pp.102-106, (2013)
4. Rattanachan S.T., Krongarrom, P., **Fangsuwannarak, T.** “Influence of annealing temperature on characteristics of bismuth doped zinc oxide films” American Journal of Applied Sciences Volume 10, Issue 11, 1 October 2013, Pages 1427-1438 (2013)
5. **T. Fangsuwannarak**, K. Kunchana, “Optical Properties of Nano-crystalline Silicon Films Prepared by Using Sol-Gel Spin Coating Process” The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics, No. 43: pp.106-110 (2013)
6. **T. Fangsuwannarak** , K. Amonsurintawong and S. Sopitpan, “Aluminum-induced crystallization of p⁺silicon pinholes for the formation of rear passivation contact in solar cell” Key Engineering Materials Vol. 547 (2013) pp. 31-40 (2013) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.547.31
7. **T. Fangsuwannarak**, K. Khunchana and S.T. Rattanachan “Optical Band Gaps and Electrical Conductance of Si nanocrystals in SiO₂ Matrix for Optoelectronic Applications” Key Engineering Materials Vol. 545 (2013) pp 134-140 (2013) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.545.134
8. **T. Fangsuwannarak**, P. Krongarrom, J. kaewphoka and S. T. Rattanachan, “Bismuth doped ZnO films as anti-reflection coatings for solar cells” Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 978-1-4799-0545-4/13 ©2013 IEEE
9. K. Kunchana and **T. Fangsuwannarak**, “Thin Film preparation of silicon nanocrystals embedded in silicon oxide by sol-gel method” Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information

Technology (ECTI-CON), 978-1-4673-2025-2/12/ ©2012 IEEE

10. **T. Fangsuwannarak**, P. Krongarrom, and S. T. Rattanachan, "Synthesis and characterizations of bismuth doped zinc oxide via sol-gel technique for solar cells applications" 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, 5-9 Sep. (2011)
11. Krongarrom P., Rattanachan S.T. and **Fangsuwannarak T.**, "Structural and optical characterizations of n-type doped ZnO by sol-gel method for photovoltaic", Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2011 8th International Conference on, On page(s): 50 - 53, Volume: Issue: , 17-19 May (2011)
12. **ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์** กิตติศักดิ์ อมรสุรินทวงศ์ และ สุวัฒน์ โสภิตพันธ์ "การสร้างชั้นพาสซีเวชันด้านหลังสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยวิธีการทะลุของอะลูมิเนียม และการแลกเปลี่ยนเฟสระหว่างชั้นอะลูมิเนียมกับชั้นอะมอร์ฟัสซิลิคอน" การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 7 จ.ภูเก็ต 5 - 7 พฤษภาคม 2554 CEN12-562 (*บทความยอดเยี่ยมประเภทวัสดุพลังงาน*)
13. กิตติศักดิ์ อมรสุรินทวงศ์ และ **ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์** "ผลของการสะท้อนแสงของผิวเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีลวดลายพีระมิด" การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6, 5 - 7 พฤษภาคม 2553 ENETT6-1193
14. **T. Fangsuwannarak** and K. Amonsurintawong "Texturisation of monocrystalline Si wafer by wet chemical etchants without surfactant additive through PTFE masks", 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition and 5th World Photovoltaics Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, 6-10 Sep. (2010)
15. **T. Fangsuwannarak** and G. Scardera, "Effect of Annealing Temperature on Dark Current Density of Silicon nanocrystals embedded in a Nitride Matrix for Photovoltaic Application," Proc. the 5th International Conference in Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology, On page(s): 797 - 800, Volume: Issue: , 14-17 May (2008)
16. **T. Fangsuwannarak**, E.C. Cho, G. Conibeer, Y. Huang, T. Trupke and M.A. Green, "Analysis of The Effect of Silicon Quantum Dot Density on The Photoluminescence Spectra of Silicon Dot/Silicon Dioxide Superlattices," Proc. 21th European Photovoltaic Solar Energy Conf. Dresden, Germany, (2006)
17. **T. Fangsuwannarak**, E. Pink, Y. Huang, G. Scardera, G. Conibeer, M. A.

- Green, “Effects of Silicon Nanocrystallite Density on The Raman-Scattering Spectra of Silicon Quantum Dot Superlattices,” *Proc. SPIE* **6415-07** (2006)
16. G. Conibeer, M. A. Green, R. Corkish, Y. Cho, E-C. Cho, C-W Jiang, **T. Fangsuwannarak**, E. Pink, Y. Huang, T. Puzzer, “Silicon Nanostructures for Third Generation Photovoltaic Solar Cells,” *Thin Solid Film*, **511-512**, 654 (2006).
 17. M. A. Green, E-C. Cho, Y. Cho, Y. Huang, E. Pink, T. Trupke, A. Lin, **T. Fangsuwannarak**, T. Puzzer, G. Conibeer, and R. Corkish, “All-Silicon Tandem Cells Based on “Artificial” Semiconductor Synthesised Using Silicon Quantum Dots in Dielectric Matrix,” *The 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Dresden* (2006)
 18. G. Scardera, T. Puzzer, D. McGrouther, E. Pink, **T. Fangsuwannarak**, G. Conibeer, and M. A. Green, “Investigating Large Area Fabrication of Silicon Quantum dots in a Nitride Matrix for Photovoltaic Applications,” *IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii*, **122** (2006)
 19. **T. Fangsuwannarak**, E. Pink, Y. Huang, Y. H. Cho, G. Conibeer, T. Puzzer, and M. A. Green, “Conductivity of Self-Organized Silicon Quantum Dots Embedded in Silicon Dioxide,” *Proc. SPIE* **6037**, 60370T (2005)
 20. M. A. Green, E-C. Cho, Y. Cho, Y. Huang, E. Pink, T. Trupke, A. Lin, **T. Fangsuwannarak**, T. Puzzer, G. Conibeer, and R. Corkish, “Artificial Semiconductor Synthesised Using Si Quantum Dots in a Dielectric Matrix,” *The 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Barcelona* (2005)
 21. D. Kruangam, **T. Sujaridchai**, . Chirakawikul, B. Ratwises and S. Panyakeow, “Novel amorphous silicon alloy optoelectronic integrated circuits,” *Journal of Non-Crystalline Solids* 227-330, 1146-1150 (1998)
 22. K. Chirakawikul, **T. Sujaridchai**, B. Ratwises, D. Kruangam, S. Panyakeow, W. Boonkosum, T. Sugino and J. Shirafuji, “Preparation of p-type polycrystalline diamond films and their applications to hole injection layers in amorphous SiC:H thin film light emitting diodes,” *Journal of Non-Crystalline Solids*, 227-230, 1156-1159 (1998)
 23. W. Boonkosum, D. Kruangam, B. Ratwises, **T. Sujaridchai**, S. Panyakeow, S. Fujikake and H. Sakai, “Amorphous SiO:H thin film visible light emitting diode,” *Journal of Non-Crystalline Solids*, **198-200**,1226-1229 (1998)
 24. D. Kruangam, B. Ratwiset, **T. Sujaridchai**, S. Panyakeow, and W.

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