สารบัญ

หน้า

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

บทที่

1 บทนำ

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

2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฏี

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

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

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

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.3 ค่าการสะท้อนแสงกลับบนผิวของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกที่สร้างขึ้น 37
3.5 การสร้างขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิก (Ohmic contact) 37-41
3.6 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างต่างๆ 42-43
3.7 สรุป..44

4 ผลการวัดทางแสง ค่าทางไฟฟ้า และการวิเคราะห์ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างผสมผสาน SE และ LBSF

4.1 บทนำ...45-46
4.2 ผลและการวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์ 46
4.2.1 การวิเคราะห์ผลค่าความต้านทานบนฟิล์มที่สร้างขึ้น 46-47
4.2.2 การวิเคราะห์ลวดลายช่องเปิดชั้นBSG สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF 47-49
4.3 ผลการวัดค่าทางแสงของชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ (Anti-Reflection Coating,ARC)...49-52
4.4 ผลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE and LBSF , LBSF , SE และทั่วไป...53-55
4.5 สรุป...56

5 การวิเคราะห์ต้นทุน และ ความคุ้มค่า

5.1 บทนำ 57
5.2 การวิเคราะห์ต้นทุนต่อหน่วย และความคุ้มค่า 57-64
5.3 สรุป 64

6 สรุปงานวิจัย และ ข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปงานวิจัย.. 65-66
6.2 ข้อเสนอแนะ 66

รายการเอกสารอ้างอิง... 67-70

ภาคผนวก ก 71

ภาคผนวก ก การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยวิธี Radio Corporation of America (RCA).....72

ภาคผนวก ข 73

ภาคผนวก ข บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 74-80

ประวัติผู้เขียน 81

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

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

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ **หน้า**

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

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.1 แผ่นภาพขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เปรียบเทียบระหว่างการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างทั่วไปอุตสาหกรรมและในห้องปฏิบัติการ.....26
3.2 ขั้นตอนภาพการเตรียมสารละลาย PSG.....27
3.3 โครงสร้าง selective emitter solar cell.....28
3.4 เครื่อง Spin coater รุ่น WS-400B-8NPP/LITE.....29
3.5 กราฟ อัตตราการขึ้น และ ลง ในระหว่างกระบวนการอบชั้นฟิลม์ PSG.....29
3.6 ลวดลายของไหมพิมพ์ลายสำหรับพิมพ์สารละลาย PSG ความเข้มข้นสูงและอุปกรณ์ที่ใช้ในการพิมพ์ลาย.....30
3.7 กราฟอัตตราการขึ้น และ ลงของอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการอบชั้น p/n-Si เพื่อแพร่สารเจือฟอสฟอรัส.....31
3.8 เครื่องมือวัดความต้านทานแบบหัวเข็มสี่จุด (4-point probes).....31
3.9 ลักษณะการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะแผ่นของชั้น n-Si ด้วย 4-point probes.....32
3.10 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าของชั้นฟิลม์ PSG ในเงื่อนไขต่างๆ.....33
3.11 แผนภาพการสกัดชั้น PSG film และ BSG film ที่ผิวบนแผ่นฐาน p/n-Si.....34
3.12 (ก)ลวดลายบนฟิลม์ใสที่ถ่ายทอดลงบนแฟรชโฟมที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นช่องเปิด (ข) ลักษณะของลวดลายที่เกิดขึ้นบน Flash foam ภายหลังการแฟลชแสงที่กำลังขยาย 10 เท่า และ (ค) ลักษณะ พื้นผิวของบริเวณช่องเปิดและช่องปิดของ Flash foam ที่กำลังขยาย 50 เท่า.....35
3.13 เครื่อง Flash Stamp กึ่งอัตโนมัติ.....35
3.14 เครื่องประทับลายกึ่งอัตโนมัติ.....36
3.15 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer (UV-Vis) รุ่น Cary 300.....37
3.16 (ก) เตาเผาด้วยความร้อนสูงอย่างรวดเร็วรุ่นที่ 2 และ (ข) แบบจำลองภายในของเตาเผารุ่นที่ 2.....38
3.17 เครื่องวัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยระบบจำลองแสงเทียม.....40
3.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด : Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) รุ่น JSM-7800F.....41
3.19 ขั้นตอนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างมาตรฐานเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE and LBSF.....43

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.1 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างผสมผสาน SE and LBSF...45
4.2 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าของชั้นฟิลม์ PSG ในเงื่อนไขต่างๆ.........................47
4.3 ลวดลายช่องเปิดชั้นฟิล์ม BSG โดยมีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (ก) 8% (ข) 12% 48
4.4 ลวดลายการเปิดช่องไดอิเล็กติกด้วยกรด บนแผ่นฐานซิลิคอนจากการประทับลายโดยมีสัดส่วนพื้นที่ช่องเปิด (ก) 8% (ข) 12% 48
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกลับของแสงและความยาวคลื่นช่วง 200-800 นาโนเมตรของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกPSGด้านหน้า..50
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนกลับของแสงและความยาวคลื่นช่วง 200-800 นาโนเมตรของชั้นฟิล์มไดอิเล็กทริกBSGด้านหลัง...50
4.7 (ก) ภาพถ่ายอิเล็กตรอนที่ตัดขวางของแผ่น p-Si (ข) ภาพถ่ายอิเล็กตรอนที่ตัดขวางของแผ่นแสดงลักษณะของ Al ที่มีการแพร่ซึมลงไปในชิ้นงานและ (ค) ภาพถ่ายอิเล็กตรอนที่ตัดขวางของแผ่น p-Si ที่โดนอลูมิเนียมแพร่ซึมเข้าไป..52
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า(V) และกระแสไฟฟ้า(mA)ของเซลล์แสงอาทิตย์ในเงื่อนไขต่าง ๆ..55
5.1 สัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของประเภทต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนในเชิงพาณิชย์..60
5.2 สัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของประเภทต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนในแลปวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์..60