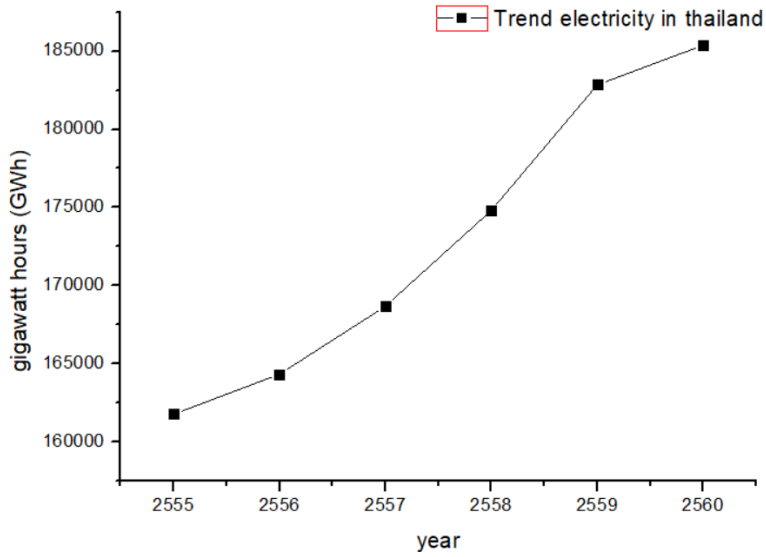
บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงานทำการเก็บสถิติการใช้พลังงานตั้งแต่ปี พ.ศ.2555 ถึงปัจจุบัน ชี้ว่าการใช้ไฟฟ้าในการอุปโภคบริโภคของประเทศไทยได้สูงขึ้นทุกปีตามรูปที่ 1.1 (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน)

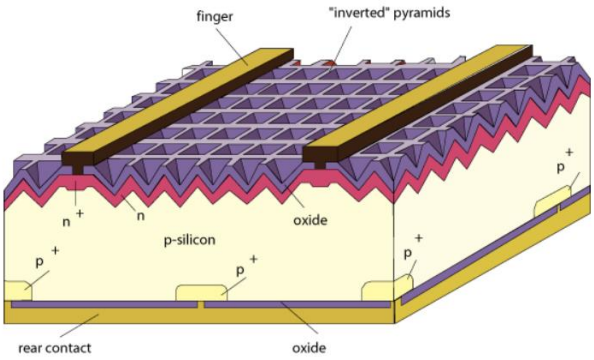


รูปที่ 1.1 แนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าในประเทศไทย

จากรายงานสถิติพลังงานรายปี พ.ศ.2561 สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ได้สรุปไว้ว่า ช่วง 4 ปีที่ผ่านมาแหล่งพลังงานที่ประเทศไทยนำมาใช้เพื่อแปลงรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าเปรียบเทียบปีพ.ศ.2557 ถึงปี พ.ศ. 2561 พลังงานหมุนเวียนถูกนำมาใช้เพิ่มสูงขึ้นในประทศไทยร้อยละ 3 % ซึ่งมีค่ากำลังผลิตจากเดิม1,298.5MW เป็น 2,962.5 MW โดยส่วนใหญ่ที่นำมาใช้เป็นพลังงานที่ได้มาจาก ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และ ฟอสซิล ซึ่งพลังงานเหล่านี้มีปริมาณที่จำกัดและมีผลกระทบต่อสภาวะโลกร้อน ที่ผ่านมาประเทศไทยใช้การผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานน้ำซึ่งมีกำลังการผลิตทั่วประเทศ 3,107.4 MW (รายงานสถิติพลังงานทดแทนของประเทศไทย 2561) และมีแนวโน้มการพัฒนาที่คงที่ เนื่องจากพื้นที่ความเหมาะสมและขั้นตอนการก่อสร้างเขื่อนกักเก็บน้ำเกิด

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสังคม ดังนั้นจึงหันมาศึกษาวิจัยและพัฒนาพลังงานหมุนเวียนและทดแทนอย่างอื่นมาใช้ประโยชน์มากขึ้น เช่น พลังงานลม ชีวะมวล และพลังงานจากแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดไม่มีวันหมดสิ้นและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสังคมน้อยกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล จากปัญหาและข้อจำกัดดังกล่าวของพลังงานทางเลือกอื่นๆ จึงมีการศึกษาและวิจัยพลังงานทางเลือกโดยเฉพาะอย่างยิ่งคือเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจาก เป็นการแปลงพลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้าได้ทันที ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้วัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอน ซึ่งสามารถหาพบได้บนโลกและมีราคาต่ำ สามารถแปรรูปได้จากแร่ควอต หรือ ทราย โดยการแบ่งเป็นสามกลุ่ม คือ ซิลิคอนผลึกเดี่ยว , ฟิลม์บางอะมอร์ฟัสซิลิคอน และ ฟิลม์บางนาโนซิลิคอน (green M.A. 2000)

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างต่างๆ เพื่อประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงานสูงมากขึ้น โดยโครงสร้างแบบ PERL (Passivated emitter and rear locally diffused cell) มีค่าการแปลงผันพลังงานได้สูงถึง 24% ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Passivated emitter and rear locally diffused cell (PERL) (Green, 2001)

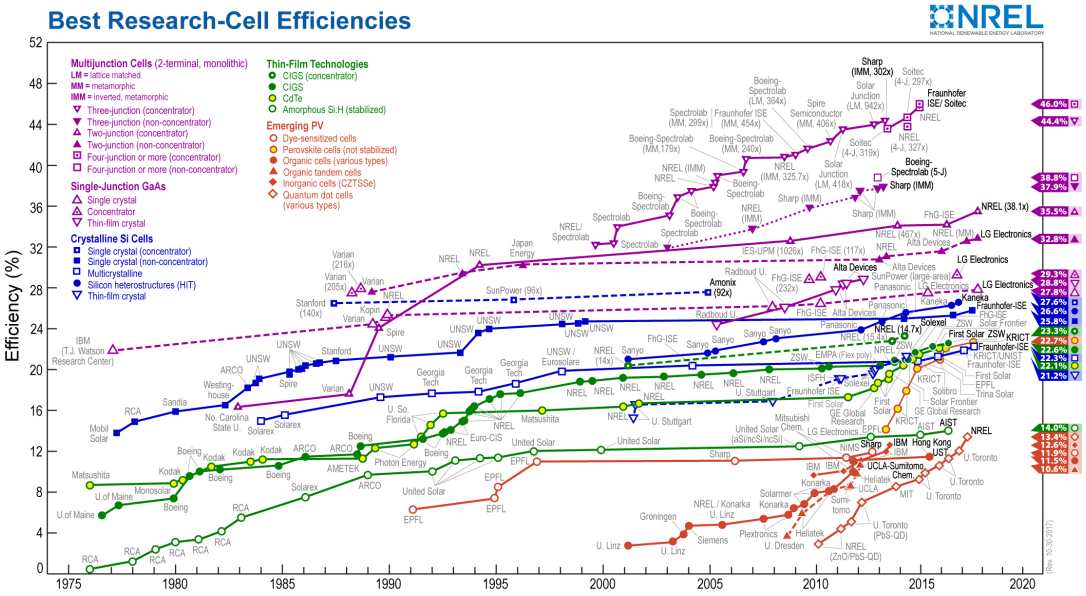
ส่วนสำคัญหลักของโครงสร้าง PERL ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแปลงผันพลังงานและลดการสูญเสียภายในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก

1.พีระมิดหัวกลับที่ผิวรับแสง (Inverted pyramids) ช่วยลดการสะท้อนกลับที่พื้นผิว และเพิ่มพื้นที่รับแสงมากขึ้นทำให้กระแสโฟตอนมากขึ้น

2.ผิวพาสซิเวชัน(Surface passivation) เป็นชั้นฉนวนบางๆที่ผิวด้านบนและด้านหลัง เพื่อลดจุดบกพร่องของรอยสัมผัสทำให้เกิดการรวมรวมของพาหะดีขึ้น ช่วยลดการรวมตัวใหม่ของพาหะที่ผิว(Surface recombination)และเกิดสนามไฟฟ้าที่บริเวณชั้นฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ

3. บริเวณซีเลคทีฟอิมิตเตอร์(Selective emitter) ประกอบด้วยบริเวณรับแสงที่เจือสารความเข้มข้นต่างกัน เพื่อแปลงพลังงานในย่านแสงความยาวคลื่นสั้นสีน้ำเงินมากขึ้น และเกิดความต้านทานไฟฟ้าที่รอยสัมผัสโลหะน้อย

โครงสร้างPERLที่กล่าวมาข้างต้นนี้ไม่เหมาะกับกระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์พาณิชย์ เพราะใช้เทคนิคการถ่ายทอดลวดลาย (photolithography) ซึ่งมีกระบวนการที่ซับซ้อน ต้นทุนผลิตสูง อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อหากระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่ซับซ้อน ลดขั้นตอนการผลิตเพื่อสามารถสร้างความมั่นคงในการวิจัยและพัฒนาประเทศด้านพลังงานทดแทน รูปที่ 1.3 แสดงความก้าวหน้าของการพัฒนาประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1976 ถึงปัจจุบัน จาก NREL (National Renewable Energy Laboratory)



รูปที่ 1.3 กราฟสรุปวิวัฒนาการของเซลล์แสงอาทิตย์รวบรวมโดย NREL (Energy, 2017)

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้สนใจการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง Selective emitter และ Local back passivation ด้วยเทคนิค Spin on dopant ที่ใช้การเตรียมแบบโซล-เจล ซึ่งมีต้นทุนต่ำด้วยการสังเคราะห์หมึกฟอสฟอรัสความเข้มข้นต่างกันเพื่อเป็นสารเจือสำหรับการผลิตชั้น n-Si และผ่านกระบวนการ พิมพ์ลาย(Screen printing) เพื่อถ่ายทอดลวดลายและกำหนดบริเวณ n-Si (Lightly doped area)และ n^{++} Si (Heavy doped area) ที่มีความเข้มข้นของสารเจือฟอสฟอรัสต่างกัน มาสร้างเป็นโครงสร้างชั้นรับแสง แม้ว่า บริเวณn-Si สามารถดูดกลืนแสงสีฟ้า(Blue wavelength) ที่มีความยาวคลื่นสั้นพลังงานสูงได้ดีกว่า n^{+}-Si แต่พื้นที่ n-Si จะทำให้ความต้านทานรอยสัมผัส(Contact resistance) ค่าสูงทำให้ประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นในการผลิตระดับอุตสาหกรรมจึงผลิตชั้น n^{+}-Si เพื่อลดผลค่าความต้านทานไฟฟ้าใต้ขั้วไฟฟ้า(R_C) ด้านบน แต่จะตอบสนองต่อแสงช่วงความยาวคลื่นสั้นได้ไม่ดี ในการศึกษานี้ได้นำวิธีการแพร่สารเจือเข้มข้นต่างกัน เพื่อให้ได้บริเวณ n^{++}-

Si และ n^+-Si จากสารละลายโซล-เจล ที่พิมพ์ลายและแพร่ด้วยความร้อนในขั้นตอนเดียวโดยการกำหนดค่าความเข้มข้นของสารละลายในการทำลวดลาย 2 บริเวณ ที่ต้องการคือ

1.บริเวณสารเจือฟอสฟอรัสเข้มข้นต่ำ(Lightly doped n^+-Si) เป็นบริเวณรับแสงที่มีค่า ρ_{sheet} อยู่ในช่วง 100-200 ohm/sheet เพื่อเพิ่มการตอบสนองการดูดกลืนแสงสีน้ำเงิน

2.บริเวณสารเจือฟอสฟอรัสเข้มข้นสูง(Heavy doped n^{++} layer) เป็นบริเวณใต้ขั้วโลหะไฟฟ้ากริดที่มีค่า ρ_{sheet} ต่ำกว่า 50 ohm/sheet เพื่อให้เกิดคุณสมบัติ Ohmic contact ที่ดีส่งผลต่อค่า R_c มีค่าต่ำทำให้ประสิทธิภาพการแปลงผันพลังงานสูงขึ้นและ ใช้เทคนิคการเปิดช่องด้วยกรด (Acid stamp) และ การเปิดช่องด้วยระดับพลังงานสูง (Laser open pattern) เพื่อการเปรียบเทียบราคาการผลิตต่อ 1 ชิ้นงานที่สร้าง เพื่อที่จะสามารถคาดการณ์การผลิตเชิงพาณิชย์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1) เพื่อศึกษาและออกแบบขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขั้นตอนการผสมผสานระหว่างพิมพ์ลาย (Screen) และประทับลาย (Stamp) ของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นซีเลคทีฟอิมิเตอร์ (SE) และสนามไฟฟ้าบางบริเวณ (LBSF)
2) เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างจุลภาค ทางแสง ทางไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ของชั้นซีเล็คทีฟและสนามไฟฟ้าบางบริเวณที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนที่สร้างขึ้น
3) ศึกษาการใช้เทคนิคที่สอดคล้องกับเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันเพื่อให้ได้องค์ความรู้ด้วยเทคนิคการพิมพ์ลาย(Screen)และประทับลาย(Stamp)เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนด้วยโครงสร้าง Selective Emitter (SE) และ Local back surface field (LBSF)

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1) ศึกษาและผลิตชั้นรับแสงSelective Emitter (SE) และชั้นสนามไฟฟ้าที่ด้านหลังในโครงสร้าง Local Back Surface Field (LBSF) ด้วยวิธี Spin on Dopant(SOD) พิมพ์ลาย(Screen) และ ประทับลาย (Stamp)
2) ศึกษาสมบัติทางโครงสร้างจุลภาค สมบัติทางแสง ทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ของเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้าง SE และ LBSF

3) ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนต้นแบบโครงสร้าง SE และ LBSF ซึ่งขนาดไม่น้อยกว่า 9 ตารางเซนติเมตร ด้วยการผสมผสานวิธี Spin on dope (SOD) พิมพ์ลาย (Screen) และประทับลาย(Stamp)และวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1) ทบทวนการศึกษา รวบรวมข้อมูลของวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2) ศึกษาและทดลองเกี่ยวกับเงื่อนไขสารละลายตั้งต้นเพื่อผลิตฟิล์ม PSG และ BSG สำหรับเป็นแหล่งสารเจือฟอสฟอรัสและสารเจือโบรอนในห้องปฏิบัติการ SUT
3) ทดลองและสร้างลวดลายโดยเทคนิคการ spin on dopant(SOD) เพื่อสร้างบริเวณ n-Si emitter และ บริเวณ n^{++} -Si บนแผ่นฐานซิลิคอนและวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้า
4) ทดลองและสร้างลวดลายโดยเทคนิคพิมพ์ลาย(Screen) เพื่อสร้างชั้น n^{++} บนแผ่นฐานซิลิคอนและวัดค่าเปรียบเทียบสองบริเวณ
5) ศึกษาวรรณกรรมและที่เหมาะสมสำหรับการแพร่ (Diffusion) ของสารเจือ Lightly dope และ Heavy dope และวัดด้วยเทคนิคการวัด 4-point probe ทวนซ้ำเดิมจากงานวิจัย ในห้องปฏิบัติการ SUT
6) ทดลองและทบทวนวรรณกรรม การสร้างซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้าง SE ให้ได้ผลเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ผ่านการพิมพ์ลาย(Screen) Heavy dope และ เซลล์โครงสร้างมาตรฐาน
7) ศึกษาการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง LBSF ด้วยวิธีการพิมพ์ลาย(Screen) ให้เหมาะสมกับการแพร่ และใช้การ Fast Firing เพื่อใช้ทำขั้วโลหะในห้องปฏิบัติการ SUT
8) ศึกษาการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง SE และ LBSF ด้วยวิธีการพิมพ์ลาย(Screen) และ ประทับลาย (Stamp) ให้เหมาะสมกับการแพร่ และใช้การ Fast Firing เพื่อใช้ทำขั้วโลหะในห้องปฏิบัติการ SUT
9) วัดและวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบโครงสร้างรวมกันของ SE และ LBSF
10) สรุปผลการศึกษาและจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้องค์ความรู้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ และแนวทางในการปรับปรุงหรือเพื่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานให้สูงขึ้นจากโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ PER

2) ได้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์PERLออกมาด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำซึ่งอาจเป็นแนวทางในการผลิตเชิงอุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป
3) ได้เผยแพร่บทความวิจัยระดับชาติ หรือ นานาชาติ ตามภาพผนวก ข

1.6 รูปแบบการจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยการเขียนวิทยานิพนธ์ทั้งหมด 6 บทดังนี้

บทที่ 1 ประกอบไปด้วยความสำคัญและที่มาของปัญหาในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตในการวิจัย วิธีดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการทำงานและองค์ประกอบของเซลล์แสงอาทิตย์ หลักการทางานของรอยต่อ p/n-Si ค่าต่างๆที่มีความสำคัญในเซลล์แสงอาทิตย์ การสูญเสียในเซลล์แสงอาทิตย์ การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโครงสร้างแบบ Selective Emitter แสงอาทิตย์ การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโครงสร้างแบบ Local Back Surface Field Solar Cell และ แหล่งสารเจือสำหรับการสร้างรอยต่อ p/n-Si ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 3 การสร้างชั้นฟิล์ม ARC ในระดับอุตสาหกรรม ขั้นตอนการเตรียม PSG เพื่อเป็นแหล่งสารเจือฟอสฟอรัสให้กับ SE cell การแพร่สารเจือด้วยความร้อน (Thermal Diffusion) และการสร้าง SE cell ด้วยเทคนิคการประทับลาย การเตรียมสารละลายกรดเพื่อประทับลายช่องเปิดให้กับโครงสร้าง LBSF cell เครื่องมือการวิเคราะห์เพื่อหาผลทางแสงบนชั้นฟิลม์ที่สร้างขึ้น การทำขั้วไฟฟ้าโดยใช้ความร้อนสูงอย่างรวดเร็ว การวิเคราะห์หาผลทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น อุปกรณ์ เครื่องมือวัดที่ใช้ดูการแพร่ของขั้วโลหะเข้าไปในโครงสร้างช่องเปิดที่สร้างขึ้น และการผลิตโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต่างๆในงานวิจัย โดยแบ่งเป็น 4 โครงสร้าง คือ โครงสร้างมาตรฐาน STANDARD cell โครงสร้าง SE cell โครงสร้าง LBSF cell และโครงสร้างแบบ ผสมผสาน SE and LBSF cell

บทที่ 4 การทดสอบวัดและวิเคราะห์ผลทางแสง ทางไฟฟ้า ของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น ผลการวิเคราะห์บนชั้นฟิลม์เพื่อหาค่าความต้านทานที่เหมาะสมในงานวิจัย การวิเคราะห์ผลลวดลายช่องเปิดที่สร้างขึ้นจากการเปิดช่องด้วยเทคนิคการประทับลายด้วยโฟมโพลีไอมาย และผลของการสกัดชั้น ARC โดยทำการแช่ชิ้นงานในสารละลายกรดเพื่อวิเคราะห์หาเงื่อนไขค่าความเหมาะสมโดยชั้น PSG เกิดบนพื้นผิวด้านหน้าและ BSG เกิดบนพื้นผิวด้านหลังก่อนจะทำการแพร่ของ

อลูมิเนียมที่ช่องเปิดด้านหลังและเงินที่ด้านหน้าเข้าในในชิ้นงาน และ วัดผลทางไฟฟ้าของโครงสร้าง 4 โครงสร้างที่สร้างขึ้น

บทที่ 5 ได้กล่าวถึง การวิเคราห์หาต้นทุนและความคุ้มค่า เปรียบเทียบต้นทุนในการผลิตที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ และ ต้นทุนที่ใช้ในแลปวิจัย เพื่อหาค่าความคุ้มค่าต่อไป

บทที่ 6 สรุปการทดลองทั้งหมดที่ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้ รวมถึงข้อเสนอแนะ