

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร โครงสร้างรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีชั้นเอ็นอะมอร์ฟัสซิลิคอนเป็นชั้นด้านหลัง

ณัฐพงษ์ บรรณรักษ์สันติกุล^{1,2*}, อภิชาต มุลละคร³, ทวีวัฒน์ กระจ่างสังข์, กอบศักดิ์ ศรีประภา³, จรัญ ศรีธาราธิคุณ³

¹สถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)

²สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

³ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (STL)

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

*Corresponding author, E-mail: nattaphong.b@pttplc.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้เสนอการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร โครงสร้างรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดเอ็นโดยพัฒนาต่อยอดจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร โครงสร้างรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดเอ็น ที่มีฟิล์มไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอนออกไซด์ชนิดพี (p- μ c-SiO:H) เป็นด้านรับแสง โดยทำการเคลือบชั้นอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิดเอ็น (n-a-Si:H) เป็นชั้นด้านหลัง (Back Surface Field Layer) ซึ่งจะทำหน้าที่หลักประจุบวก (โฮล) บริเวณด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ให้กลับไปยังด้านหน้าบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์มบาง p- μ c-SiO:H กับแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ชนิดเอ็น n-c-Si ซึ่งจะส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีกระแสลัดวงจร (Short-circuit current; J_{sc}) สูงขึ้น โดยฟิล์มบาง n-a-Si:H จะถูกเคลือบโดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของก๊าซ H_2/SiH_4 และ PH_3/SiH_4 เพื่อศึกษาคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรฯ จากนั้นทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรฯ โดยมีโครงสร้างเซลล์ฯ ประกอบด้วย front grid/ ITO/ p- μ c-SiO:H/ n-c-Si/ n-a-Si:H/back contact (Ag/Al) จากการพัฒนาโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรฯ ที่มีชั้น n-a-Si:H เป็นชั้นด้านหลัง J_{sc} ของเซลล์เพิ่มจาก 31.9 เป็น 34.7 mA/cm² ส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากเดิม 14.6 % เป็น 16.4 %

Keywords: เอ็นอะมอร์ฟัสซิลิคอน, เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนรอยต่อเฮเทอโร, ชั้นฟิล์มบางซิลิคอน

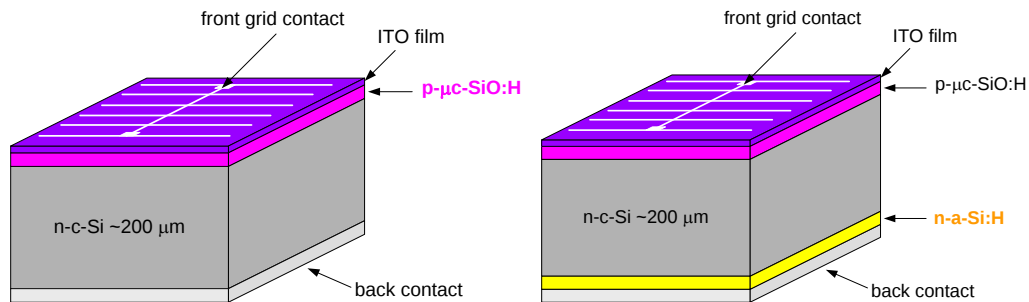
1. บทนำ

ด้วยบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ซึ่งเป็นบริษัทพลังงานแห่งชาติของประเทศไทยได้ตระหนักว่าบทบาทของพลังงานจากแสงอาทิตย์จะเป็นพลังงานที่มีบทบาทต่อการดำรงชีวิต และเป็นพลังงานที่สะอาดก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย จึงได้ร่วมกับสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค) โดยห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (STL) ได้มีโครงการร่วมวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร โครงสร้างรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดเอ็น เพื่อศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีต้นน้ำของขบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกเดี่ยวซิลิคอนที่มีประสิทธิภาพสูง

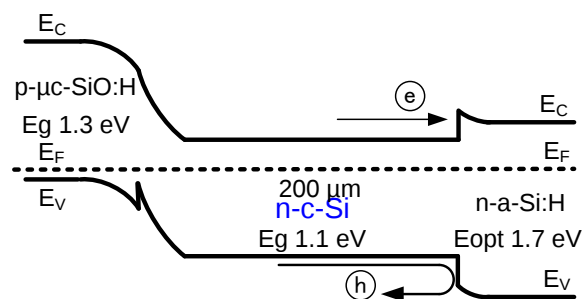
งานวิจัยนี้ได้เน้นการพัฒนาชั้นขั้วด้านหลัง (Back surface field) โดยใช้ชั้นอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิดเอ็น (Hydrogenated amorphous silicon n-type: n-a-Si:H) ระหว่างชั้น n-c-Si/ back metal contact เป็น n-c-Si/ n-a-Si:H/back contact ดังแสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 1(a) front grid/ ITO/ p- μ c-SiO:H/ n-c-Si/ back metal contact และ 1(b) front grid/ ITO/ p- μ c-SiO:H/ n-c-Si/ n-a-Si:H/ back metal contact เนื่องจากเซลล์โครงสร้างชนิด 1(a) ยังมีการสูญเสีย

<http://jeet.siamtechu.net>

ประจุพาหะจากการรวมตัวที่ผิวด้านหลังระหว่างรอยต่อ n-c-Si/ back contact ซึ่งชั้น n-a-Si:H สามารถเตรียมได้จากวิธี 60 MHz Very High Frequency-Plasma enhanced chemical vapor deposition (VHF-PECVD) โดยมีอุณหภูมิในการสร้างต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ จากภาพจำลองลักษณะแผนภูมิแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรในรูปแบบที่ 2 นั้น แสงจะส่องเข้าทางด้านชั้น ITO /p- μ c-SiO:H และแผ่นผลึก n-c-Si ตามลำดับ โดยแสงส่วนใหญ่จะทะลุผ่านชั้น ITO /p- μ c-SiO:H เข้าไปเนื่องจากมีค่าของช่องว่างพลังงานกว้างกว่าแผ่นผลึก n-c-Si ดังนั้น ชั้น p- μ c-SiO:H จึงทำหน้าที่เสมือนชั้นหน้าต่างและสร้างแรงดันไฟฟ้าภายใน (Built-in Potential) ให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ แสงจะถูกดูดกลืนโดยแผ่นผลึก n-c-Si ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้น ซึ่งโฮลที่เกิดขึ้นจะถูกสนามไฟฟ้าภายในแยกให้ไหลออกสู่ภายนอกผ่านทางด้านชั้น p- μ c-SiO:H /ITO และ front grid สวิตช์อิเล็กตรอนก็จะไหลไปทางด้านชั้น n-a-Si:H และ back contact ในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์นี้ ชั้น n-a-Si:H ที่อยู่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าของช่องว่างพลังงานกว้างกว่าแผ่นผลึก n-c-Si ทำให้มีค่าความต่างของแถบวาเลนซ์ (Valence band offset) เกิดเป็นกำแพงด้าน (barrier) ทำให้โฮลที่เกิดบริเวณรอยต่อของ n-c-Si/n-a-Si:H ถูกผลักกลับออกไปทางด้านชั้น p- μ c-SiO:H ได้มากขึ้น ทำให้การรวมตัว (Recombination) ของอิเล็กตรอนกับโฮลที่บริเวณรอยต่อ n-c-Si/n-a-Si:H ลดลง [1] ส่งผลให้กระแสของเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 1 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกซิลิคอน (a) front grid /ITO / p- μ c-SiO:H /n-c-Si wafer /back contact (b) front grid /ITO / p- μ c-SiO:H /n-c-Si wafer /n-a-Si:H /back contact



รูปที่ 2 ภาพจำลองลักษณะแผนภูมิแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีชั้น n-a-Si:H back surface field

2. วิธีการทดลอง

2.1 การสร้างฟิล์ม n-a-Si:H

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการสร้างฟิล์ม n-a-Si:H

อุณหภูมิของฐานรอง (°C)	160
คลื่นความถี่ (MHz)	60
ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (W/cm^2)	0.025
SiH_4 (sccm)	10
H_2 (sccm)	30-100
PH_3 3% H_2 diluted (sccm)	2.1-5.7
ความดันก๊าซ (mTorr)	500
ความหนาฟิล์ม (nm)	~ 200

ฟิล์ม n-a-Si:H จะถูกสร้างบนฐานรองกระจกชนิด soda lime ขนาด 3 cm x 3 cm ด้วยเทคนิค Very high frequency plasma enhanced chemical vapor deposition (VHF PECVD) ที่ความถี่ 60 MHz โดยมีก๊าซดิบประกอบด้วย Silane (SiH_4) Hydrogen (H_2) และ Phosphine (PH_3) โดยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์ม n-a-Si:H ต่ออัตราส่วน ก๊าซ H_2/SiH_4 และ PH_3/SiH_4 เพื่อให้เหมาะสมแก่การนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดเอ็น จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าความนำไฟฟ้าและ ค่า Activation energy ของฟิล์ม n-a-Si:H รายละเอียดเงื่อนไขการสร้างฟิล์มแสดงในตารางที่ 1

2.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดเอ็น

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร เริ่มจากนำแผ่นผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีความต้านทาน (Resistivity) ประมาณ 1 ถึง 5 $\Omega\cdot\text{cm}$ มาทำความสะอาด จากนั้นทำการสร้างชั้น p- $\mu\text{c-SiO:H}$ ที่ด้านหน้า [2] และสร้างชั้น n-a-Si:H ที่ด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น โดยเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของอัตราส่วนของก๊าซ PH_3/SiH_4 และความหนาของฟิล์ม n-a-Si:H จากนั้นทำการเคลือบขั้วนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO และสร้างขั้วโลหะที่ด้านหน้าและด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 1(b) และรายละเอียดเงื่อนไขการสร้างชั้น n-a-Si:H ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขการสร้างชั้น n-a-Si:H ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดเอ็น

อุณหภูมิของฐานรอง (°C)	160
คลื่นความถี่ (MHz)	60
ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (W/cm^2)	0.025
SiH_4 (sccm)	10
H_2 (sccm)	80
PH_3 3% H_2 diluted (sccm)	4-6
ความดันก๊าซ (mTorr)	500
ความหนาฟิล์ม (nm)	0-40

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

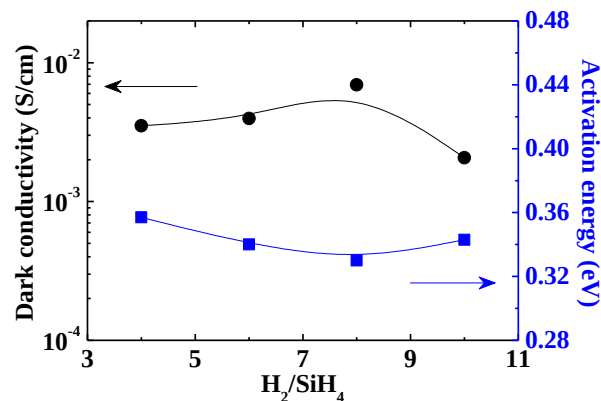
3.1 ฟิล์ม n-a-Si:H

- ผลของอัตราส่วน H_2/SiH_4

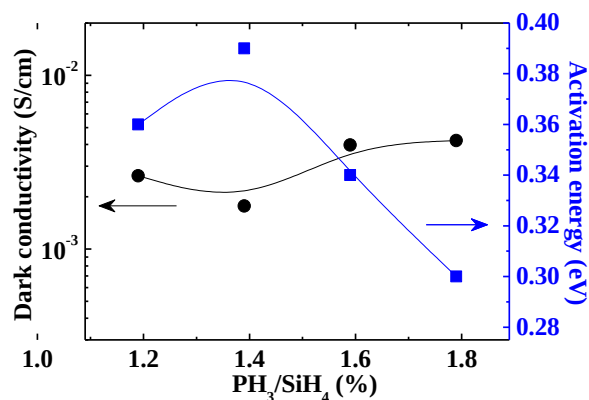
เพื่อที่จะศึกษาการปลูกฟิล์ม n-a-Si:H ให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมแก่การนำไปประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร จึงได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ H_2/SiH_4 ที่มีผลต่อค่าความนำไฟฟ้าและค่า E_a ในการทดลองนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลง อัตราส่วนของ H_2/SiH_4 จาก 3 ถึง 10 และใช้อัตราส่วนของก๊าซ PH_3/SiH_4 ที่ 0.13 รูปที่ 4 แสดงค่าความนำไฟฟ้าและค่า E_a ของฟิล์ม n-a-Si:H จากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน H_2/SiH_4 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของ H_2/SiH_4 เพิ่มขึ้นจาก 4 ถึง 8 เท่า ค่าความนำไฟฟ้าของฟิล์ม n-a-Si:H มีแนวโน้มสูงขึ้น โดยจะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 3.5×10^{-3} S/cm ถึง 6.9×10^{-3} S/cm ในขณะที่ค่า E_a มีค่าเฉลี่ยประมาณ 0.35 eV

- ผลของอัตราส่วน PH_3/SiH_4

จากนั้นได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ PH_3/SiH_4 ที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม n-a-Si:H โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ PH_3/SiH_4 จาก 1.2 ถึง 1.8 เท่า และใช้อัตราส่วนของก๊าซ H_2/SiH_4 เท่ากับ 6 เท่า รูปที่ 5 แสดงค่าความนำไฟฟ้าและค่า E_a ของฟิล์ม n-a-Si:H จากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน PH_3/SiH_4 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของ PH_3/SiH_4 เพิ่มขึ้นจาก 1.2 ถึง 1.8 เท่า ค่าความนำไฟฟ้ามีแนวโน้มสูงจาก 1.8×10^{-3} S/cm ถึง 4.2×10^{-3} S/cm ในขณะที่ค่า E_a มีค่าลดลงจาก 0.39 eV เป็น 0.30 eV ที่อัตราส่วนของ PH_3/SiH_4 เพิ่มขึ้นจาก 1.4 ถึง 1.8 เท่า



รูปที่ 4 ความนำไฟฟ้าและ E_a ของฟิล์ม n-a-Si:H จากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน H_2/SiH_4



รูปที่ 5 ความนำไฟฟ้าและ E_a ของฟิล์ม n-a-Si:H จากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน PH_3/SiH_4

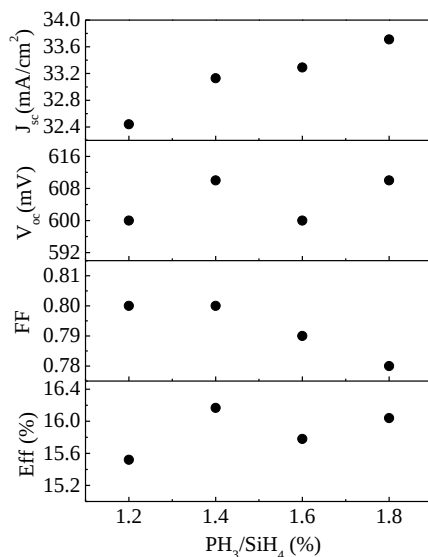
3.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดเอ็น

- ผลของอัตราส่วน PH_3/SiH_4

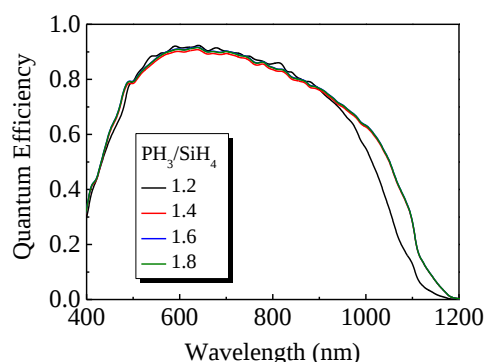
การศึกษาผลของควมนำไฟฟ้าในฟิล์มชั้น n-a-Si:H ที่มีต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรฯ คณะวิจัยได้ทำการทดลองการเปลี่ยนอัตราส่วนของก๊าซ PH_3/SiH_4 จาก 1.2 เป็น 1.8 เท่า จากรูปที่ 6(a) พบว่าค่า J_{sc} มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจาก 31.5 mA/cm^2 เป็น 32.6 mA/cm^2 กับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน PH_3/SiH_4 จาก 1.2 เป็น 1.8 ในขณะที่ค่า V_{oc} เพิ่มขึ้นจาก 592 mV เป็น 600 mV และมีแนวโน้มลดลงที่อัตราส่วน PH_3/SiH_4 เท่ากับ 1.8 ส่วนค่า FF มีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่มากซึ่งค่าอยู่ระหว่าง 0.78 ถึง 0.79 จากการทดลองนี้ได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่อัตราส่วนของก๊าซ PH_3/SiH_4 ที่ 1.4 เท่า จากรูปที่ 6 (b) แสดงผล QE กับการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน PH_3/SiH_4 พบว่าที่ความยาวคลื่นระหว่าง 900 nm ถึง 1200 nm ที่อัตราส่วนของ PH_3/SiH_4 เท่ากับ 1.2 เท่า มีค่า QE ต่ำที่สุดซึ่งเป็นผลมาจากฟิล์ม n-a-Si:H มีค่า Activation energy (E_a) ไม่ต่ำพอจึงอาจทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะที่ด้านหลังเซลล์ที่สูงขึ้น [3]

- ผลความหนาของชั้น n-a-Si:H

ในส่วนนี้ได้ทำการพัฒนาโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรฯ ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นด้วยการเพิ่มชั้น n-a-Si:H ที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ จากผลการทดลองพบว่าค่า J_{sc} ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น n-a-Si:H เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีชั้น n-a-Si:H ดังแสดงในรูปที่ 7(a) ค่า J_{sc} เพิ่มขึ้นจาก 31.9 mA/cm^2 เป็น 34.7 mA/cm^2 และค่า V_{oc} เพิ่มขึ้นจาก 569 mV เป็น 599 mV ที่ชั้น n-a-Si:H มีความหนาระหว่าง 15 nm ถึง 26 nm จากผลการทดลองนี้ทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ชั้น n-a-Si:H หนาเท่ากับ 26 nm และในรูปที่ 7(b) แสดงผลการวัดค่า QE ของเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น n-a-Si:H เป็นชั้นด้านหลังจะมีการตอบสนองทางแสงในช่วงความยาวคลื่นยาวสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีชั้น n-a-Si:H เป็นชั้นด้านหลัง แต่การเพิ่มความหนาของชั้น n-a-Si:H ที่มากขึ้นจะทำให้การตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นยาว 800 nm ถึง 1200 nm มีค่าลดลงเนื่องมาจากการดูดกลืนแสงที่สะท้อนกลับมายังแผ่น นฟลิคซิลิคอนจากข้อโหลหะที่ด้านหลังเซลล์ได้ น้อยลงไปด้วยตามความหนาที่เพิ่มขึ้น [3]

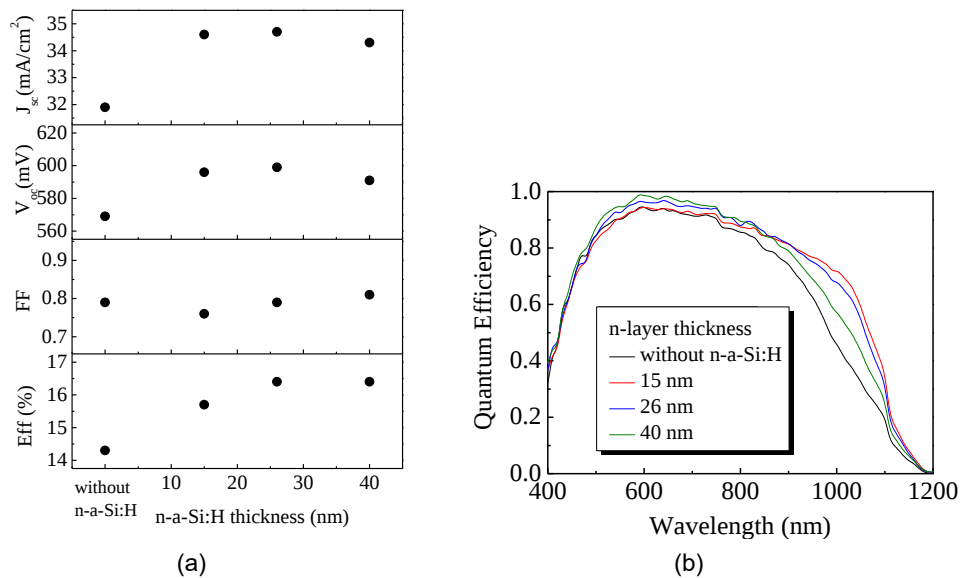


(a)



(b)

รูปที่ 6 (a) เปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้า และ (b) การตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงของเซลล์ แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรกับการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของก๊าซ PH_3/SiH_4 ในชั้น n-a-Si:H



รูปที่ 7 (a) เปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้า และ (b) การตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรที่ความหนาของชั้น n-a-Si:H ต่างๆ

4. สรุปผลการทดลอง

คณะวิจัยได้ทดลองสร้างต้นแบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดเอ็น โดยมีชั้น n-a-Si:H เป็นชั้นด้านหลังระหว่าง n-c-Si และ back contact เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จากการทดลองพบว่าสามารถเพิ่มค่า J_{sc} จาก 31.9 เป็น 34.7 mA/cm² ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เพิ่มขึ้น คณะวิจัยได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร โดยเพิ่มชั้น n-a-Si:H เป็นชั้นด้านหลัง ซึ่งต้นแบบที่ถูกพัฒนาขึ้นได้มีการศึกษาผลของอัตราส่วนของก๊าซ H_2/SiH_4 และก๊าซ PH_3/SiH_4 ที่มีผลต่อคุณสมบัติฟิล์ม n-a-Si:H ให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ซึ่งจากการพัฒนาต้นแบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร พบว่าสามารถเพิ่มค่า J_{sc} จาก 31.9 เป็น 34.7 mA/cm² ได้ เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 14.6 เป็น 16.4 % ($V_{oc} = 599$ mV, $J_{sc} = 34.7$ mA/cm², FF = 0.79) บนพื้นที่ 1 cm² เป้าหมายการพัฒนาประสิทธิภาพต่อไปจะเน้นการเพิ่มความต่างศักย์วงจรเปิดของเซลล์ โดยศึกษาการเพิ่มค่าเวลาการรวมตัวของประจุพาหะต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากวิจัยจาก ปตท. (P1201021) และ เนคเทคแพดดิฟอร์ม (P1100904)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wilfried G.J.H.M. van Sark, Lars Korte and Francesco Roca(Eds)., "Physics and Technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure Silicon", Engineering Materials, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2012
- [2] C. Leendertz and R. Stang., "Modiling an a-Si:H/c-Si solar cell with AFORS-HET in physics and technology of amorphous-crystralline heterostructure silicon solar cells", Eds., Springer, 2012
- [3] Silvia Matrin Denicolas., "a-Si:H/c-Si heterojunction solar cell : back side assessment and improvement"., PhD Thesis, Laboratoire de Gene Electrique. Universite Paris-Sud, Paris (France), 2012