

## ผลของความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าคลื่นความถี่สูงที่มีต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดฟิล์มบางไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน

### Effects of VHF power density on the efficiency of thin film microcrystalline silicon solar cell

ชาญณรงค์ ภิมรัมย์จิตร ภูมิภาณ กรุดตาด จรรย์ ศรีธาราธิคุณ อมรรัตน์ ลิ้มมณี กอบศักดิ์ ศรีประภา  
สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (SOLARTEC)  
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA)  
111 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120  
โทร 02 564 7000 ต่อ 2716 แฟกซ์ 02 564 7059, E-mail: [channarong@nstda.or.th](mailto:channarong@nstda.or.th)

Channarong Piromjit Patipan Krudtad Jaran Sriitharathikhun Amornrat Limmanee Kobsak Sriprapha  
SOLARTEC, NSTDA, 111 Phahonyothin Rd., Klong 1, Klong Luang, Pathumthani, 12120, Thailand  
Tel: 02 564 7000 ext 2716 Fax: 02 564 7059, E-mail: [channarong@nstda.or.th](mailto:channarong@nstda.or.th)

#### บทคัดย่อ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน (microcrystalline silicon,  $\mu\text{c-Si:H}$ ) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถดูดกลืนแสงช่วงความยาวคลื่นยาวประมาณ 700 – 1100 nm จึงเหมาะต่อการนำไปพัฒนาเป็นชั้นล่างของเซลล์ชั้นชนิดหลายรอยต่อ (multi-junction solar cell) ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเงื่อนไขในการสร้างชั้นดูดกลืนแสงหรือชั้นไอ (i layer)  $\mu\text{c-Si:H}$  จากผลของความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (power density) ของเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่สูงที่มีผลต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ ทั้งในเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างเซลล์เดี่ยวชนิด  $\mu\text{c-Si:H}$  และเซลล์ชั้นชนิดอะมอร์ฟัสและไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน ( $\text{a-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$ ) ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวถูกสร้างขึ้นโดยใช้คลื่นความถี่สูงขนาด 60 MHz เป็นตัวกระตุ้นให้ก๊าซวัตถุดิบแตกตัวด้วยเทคนิค Plasma Enhance Chemical Vapor Deposition (PECVD) จากผลการปรับความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าพบว่าค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่  $60 \text{ mW/cm}^2$  ได้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงที่สุด คือ เซลล์เดี่ยว 7.0% และเซลล์ชั้น 10.8% ซึ่งเมื่อปรับความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเฉพาะในชั้น i seed เป็น  $100 \text{ mW/cm}^2$  พบว่าสามารถพัฒนาให้ประสิทธิภาพเซลล์ชั้นชนิด  $\text{a-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$  เพิ่มสูงขึ้นเป็น 11.2%

#### Abstract

Thin film microcrystalline silicon ( $\mu\text{c-Si:H}$ ) is the material which can absorb light in the wavelength of 700 ~ 1100 nm, so it is suitable for applying as an absorber in bottom cell for multi -

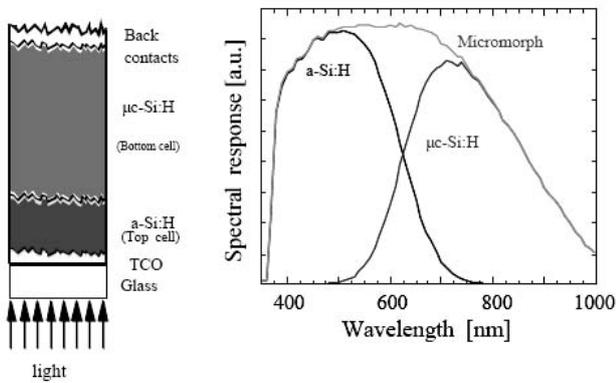
junction Si solar cells. In this study, we investigated the effects of VHF power density for depositing i  $\mu\text{c-Si}$  layer in  $\mu\text{c-Si:H}$  single cell and  $\text{a-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$  tandem cell. We used 60 MHz Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (VHF-PECVD) technique to fabricate the solar cells. We obtained the best efficiency of 7.0% for single cell and 10.8% for tandem cell at the power density of  $60 \text{ mW/cm}^2$ . And the efficiency of the tandem  $\text{a-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$  solar cell reached 11.23% when the power density of i seed layer deposition was adjusted to be  $100 \text{ mW/cm}^2$ .

#### 1. บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนมีการพัฒนาขึ้นในปี 1976 โดย D. Carlson และ C. Wronski [1] เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน ( $\text{a-Si:H}$ ) โครงสร้าง p-i-n ต่อมาเมื่อมีการค้นพบปรากฏการณ์ Staebler-Wronski effect [2] ที่อธิบายถึงการลดลงของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง  $\text{a-Si:H}$  เมื่อถูกฉายแสงไว้เป็นเวลานานๆ ซึ่งเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของพันธะในฟิล์ม  $\text{a-Si:H}$  หลังจากนั้นในปี 1994 J. Meier และทีมวิจัยของ IMT มหาวิทยาลัย Neuchatel [3] ได้มีการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน ( $\mu\text{c-Si:H}$ ) ขึ้น และพบว่าผลของปรากฏการณ์ Staebler-Wronski effect เกิดขึ้นกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด  $\mu\text{c-Si:H}$  น้อยมาก งานวิจัยที่เตรียมเซลล์แสงอาทิตย์  $\mu\text{c-Si:H}$  มีหลายเทคนิคด้วยกันแต่เทคนิคที่นิยมใช้กันมากคือ เทคนิค PECVD เพราะจุดเด่นที่สามารถพัฒนาให้ฟิล์มมีพื้นที่ขนาดใหญ่ได้ และอัตราการก่อตัวของ

ฟิล์มที่สูง รวมถึงฟิล์มที่เตรียมได้มีคุณภาพที่ดีด้วย จึงเป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับการพัฒนาเพื่อนำไปสู่เชิงอุตสาหกรรม เทคนิคการเตรียมฟิล์ม  $\mu\text{-Si:H}$  ด้วยวิธี PECVD จะใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ต่าง ๆ (13.56 – 200 MHz) และอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนต่อไฮเลน ( $\text{H}_2/\text{SiH}_4$ ) มากๆ นอกจากนี้ฟิล์ม  $\mu\text{-Si:H}$  ยังมีการตอบสนองทางแสงในช่วงความยาวคลื่น 700 – 1100 nm ได้ดีจึงทำให้สามารถพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเซลล์ชั้นชนิด  $\text{a-Si:H}/\mu\text{-Si:H}$  หรือที่เรียกว่า micromorph [4] ดังรูปที่ 1 ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บอนุภาคโฟตอนที่ความยาวคลื่นแสงช่วงยาวทำให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเซลล์ชั้นสูงกว่าชนิดเซลล์เดี่ยว

ในรายงานวิจัยนี้มุ่งที่การศึกษาผลของความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่มีผลต่อคุณสมบัติของฟิล์ม  $\mu\text{-Si:H}$  และการนำไปใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างเซลล์เดี่ยว  $\mu\text{-Si:H}$  และโครงสร้างเซลล์ชั้น  $\text{a-Si:H}/\mu\text{-Si:H}$  รวมถึงผลของความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าในชั้น i seed ต่อประสิทธิภาพของเซลล์ชั้น  $\text{a-Si:H}/\mu\text{-Si:H}$



รูปที่ 1 โครงสร้างและการตอบสนองทางแสง (QE) ของเซลล์ชั้นโครงสร้าง  $\text{a-Si:H}/\mu\text{-Si:H}$  [4]

## 2. วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ระบบเคลือบฟิล์มที่ประกอบด้วยหลาย 챔เบอร์ แต่ละ 챔เบอร์จะมีหน้าที่เคลือบฟิล์มต่างชนิดกัน เช่น ฟิล์ม Ag, ZnO, p- $\mu\text{-SiO}$ , i- $\mu\text{-Si:H}$  และ n- $\text{a-Si:H}$  โดยระบบดังกล่าวนี้สามารถเคลือบฟิล์มขนาดพื้นที่ 30 x 40 cm ได้ วัสดุฐานรองที่ต้องการเคลือบฟิล์มนั้นสามารถเคลื่อนที่เข้า-ออกแต่ละ 챔เบอร์ด้วยแขนกลที่อยู่ภายใน 챔เบอร์กลางและมีประตูเพื่อเปิด-ปิดเชื่อมติดต่อกันกับทุกๆ 챔เบอร์

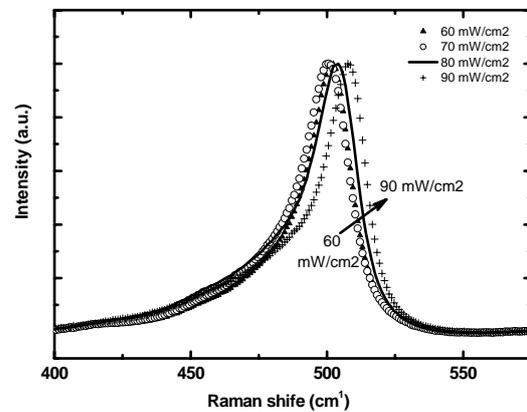
ฟิล์ม i- $\mu\text{-Si:H}$  ถูกสร้างบนกระจกด้วยวิธี PECVD โดยมีอัตราส่วนของก๊าซ  $\text{H}_2/\text{SiH}_4$  20 เท่า อุณหภูมิของฐานรอง 180 °C ความดันก๊าซขณะเคลือบ 1.0 Torr และใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ 60 MHz เป็นตัวกระตุ้นให้ก๊าซแตกตัว โดยทำการปรับความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าในการสร้างชั้น i- $\mu\text{-Si:H}$  ตั้งแต่ 60 - 90  $\text{mW}/\text{cm}^2$  ฟิล์มที่สร้างขึ้นจะถูกนำไปวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy หลังจากนั้นได้ศึกษาผลของความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งโครงสร้างเซลล์เดี่ยวและเซลล์ชั้น โดยเซลล์เดี่ยวมีโครงสร้าง ดังนี้ glass /  $\text{SnO}_2$  / ZnO / p- $\mu\text{-SiO}$  / i- $\mu\text{-Si:H}$  / n- $\text{a-Si:H}$  / ZnO / Ag เซลล์ชั้นมีโครงสร้าง ดังนี้ glass /  $\text{SnO}_2$  / ZnO / p- $\mu\text{-SiO}$  / i- $\text{a-Si:H}$  / n- $\mu\text{-Si}$  / p- $\mu\text{-SiO}$  / i seed /

i- $\mu\text{-Si:H}$  / n- $\text{a-Si:H}$  / ZnO / Ag ตามลำดับ นอกจากนี้ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาผลความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าในการสร้างชั้น i seed ของเซลล์ชั้นด้วย เมื่อเสร็จกระบวนการเคลือบฟิล์มครบทุกชั้นแล้วเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกนำไปตัดด้วยแสงเลเซอร์ เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์มีพื้นที่ 0.75  $\text{cm}^2$  แล้วนำไปวัดประสิทธิภาพภายใต้แสง AM 1.5, 100  $\text{mW}/\text{cm}^2$  ที่ 25 °C และ วัดการตอบสนองทางแสงด้วยเครื่อง Quantum Efficiency (QE)

## 3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

### 3.1 ฟิล์มไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน

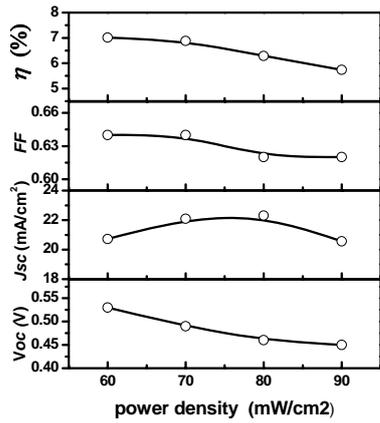
ผลวิเคราะห์ฟิล์ม i- $\mu\text{-Si:H}$  ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy แสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2 พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าจาก 60 ถึง 90  $\text{mW}/\text{cm}^2$  ตำแหน่งรามานพีคจะเลื่อนเข้าไปใกล้ตำแหน่ง 521  $\text{cm}^{-1}$  แสดงว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าให้มากขึ้นความเป็นผลึกของฟิล์ม i- $\mu\text{-Si:H}$  จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย



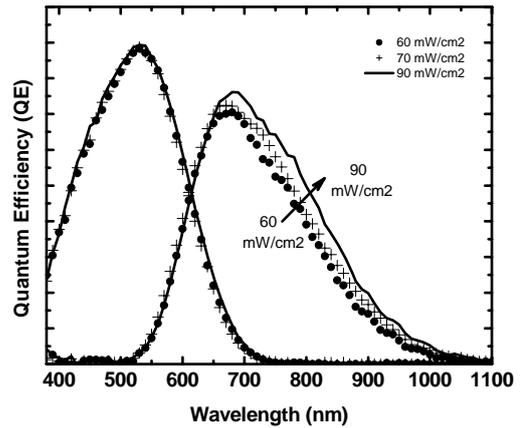
รูปที่ 2 Raman peak ของฟิล์ม i- $\mu\text{-Si:H}$  ที่ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า 60 – 90  $\text{mW}/\text{cm}^2$

### 3.2 การประยุกต์ใช้ฟิล์มไมโครคริสตัลไลน์ในเซลล์เดี่ยว

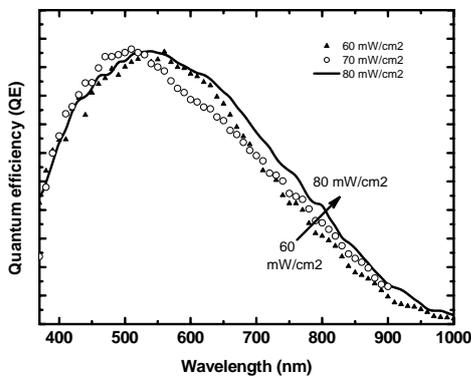
จากการใช้ฟิล์ม  $\mu\text{-Si:H}$  เป็นชั้นไอโนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเซลล์เดี่ยวโครงสร้าง p-i-n พบว่าได้ประสิทธิภาพดังรูปที่ 3 โดยแนวโน้มของค่ากระแสไฟฟ้ลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า โดยมีค่าที่สูงสุดที่ 80  $\text{mW}/\text{cm}^2$  หลังจากนั้นค่า  $J_{sc}$  จะลดลง ส่วนศักย์ไฟฟ้าวงจเปิด ( $V_{oc}$ ) มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า ค่า  $V_{oc}$  ที่ลดลงสอดคล้องกับตำแหน่งพีคที่เลื่อนเข้าใกล้ตำแหน่ง 521  $\text{cm}^{-1}$  ของฟิล์ม  $\mu\text{-Si:H}$  ดังรูปที่ 2 แสดงว่าเมื่อชั้นไอโนมีความเป็นผลึกมากขึ้นค่า  $V_{oc}$  ก็จะลดลง [5] และจากกราฟการตอบสนองทางแสง (QE) ในรูปที่ 4 พบว่าเมื่อค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้ามากขึ้น การตอบสนองที่ความยาว 700 -1100 nm จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งเป็นเพราะอัตราส่วนของความเป็นผลึกของชั้นไอโนที่เพิ่มมากขึ้น [6] ที่ค่าความหนา 1.5  $\mu\text{m}$  เท่ากัน



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเซลล์เดี่ยวที่ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 60 – 90 mW/cm<sup>2</sup>



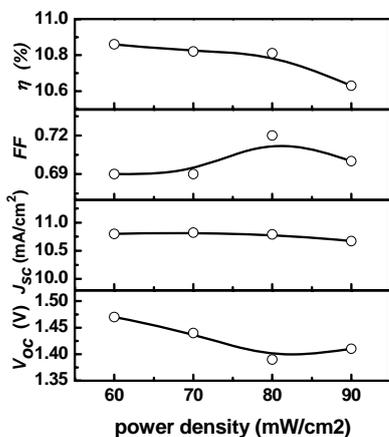
รูปที่ 6 การตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H/μc-Si:H ที่เปลี่ยนความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า 60 – 90 mW/cm<sup>2</sup>



รูปที่ 4 การตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเปลี่ยนค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า

### 3.3 การประยุกต์ใช้ไมโครคริสตัลไลน์เป็นเซลล์ล่างของเซลล์ซ้อน

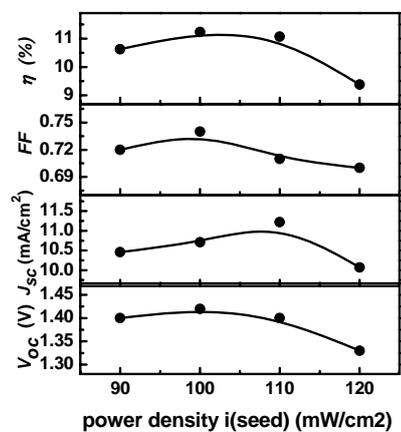
ผลของความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าในชั้นไอของเซลล์ชั้นล่างของเซลล์ซ้อนโครงสร้าง a-Si:H/μc-Si:H พบว่าแนวโน้มของ Voc คล้ายกับแนวโน้มของเซลล์เดี่ยวคือ Voc จะลดลง (รูปที่ 5) ขณะที่การตอบสนองทางแสง (QE) ช่วง 700 – 1100 nm ดังในรูปที่ 6 จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าให้ชั้นไอมีความเป็นผลึกมากขึ้น



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเซลล์ซ้อนที่ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า 60 – 90 mW/cm<sup>2</sup>

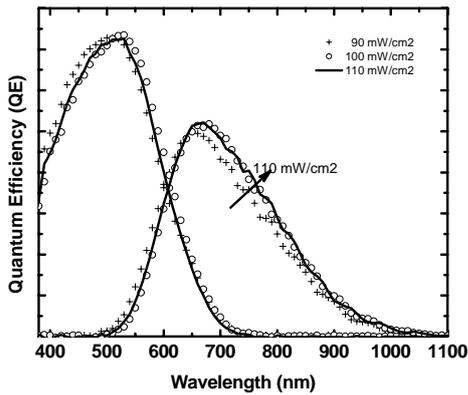
### 3.4 การปรับความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าในชั้น i seed

จากผลการปรับความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าในขณะสร้างชั้น i-μc-Si:H ถึงแม้จะช่วยทำให้กระแส Jsc เพิ่มขึ้นทั้งในเซลล์เดี่ยวและเซลล์ซ้อน แต่เพราะว่าค่า Voc ลดลงจึงทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) ลดลงด้วย ทั้งนี้เพราะความเป็นผลึกในชั้นไอที่เพิ่มสูงขึ้นมากเกินไปทำให้เกิดความไม่สมดุลของการเกิดฟิล์ม เพื่อช่วยให้เกิดความผลึกได้ง่ายและทำให้ความเป็นผลึกในชั้น i-μc-Si:H มีค่าใกล้เคียงกันตลอด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เพิ่มชั้น i seed อยู่ระหว่างชั้นพีและชั้น i-μc-Si:H โดยผลของการปรับค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าในชั้น i seed จาก 90 – 120 mW/cm<sup>2</sup> (รูปที่ 7) พบว่าแนวโน้มของค่า Jsc มีค่าเพิ่มสูงขึ้นสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า 110 mW/cm<sup>2</sup> แล้วจึงลดลง ขณะที่แนวโน้มของค่า Voc ยังคงมีค่าคงที่ และค่า QE ในรูปที่ 8 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า โดยผลจากการปรับค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าในชั้น i seed สามารถพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง a-Si:H/μc-Si:H มีประสิทธิภาพเพิ่มจาก 10.80% เป็น 11.2%



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H/μc-Si:H ที่ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 90 – 120 mW/cm<sup>2</sup>

- [5] Meier, J. Vallat-Sauvain, E. Dubail, S. Kroll, U. Dubail, J. Golay, S. Feitknecht, L. Torres, P. Fay, S. Fischer, D. and Shah, A., Sol. Energy Mater. Sol. Cells 66 (2001) 73.
- [6] Bailat, J. Vallat-Sauvain, E. Feitknecht, L. Droz, C. and Shah, A., J. Non-Cryst. Solids 299–302 (2002) 1219.



รูปที่ 8 การตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H เมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าในชั้น i seed จาก 90 – 120 mW/cm<sup>2</sup>

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างชั้น i- $\mu$ c-Si:H พบว่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นทำให้ฟิล์มไอโมโครคริสตัลไลน์มีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดด้วยเทคนิครามานและค่าการตอบสนองทางแสงทั้งในเซลล์เดี่ยว ( $\mu$ c-Si:H) และเซลล์ซ้อน (a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H) การเพิ่มความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าในการสร้างชั้นไอของเซลล์เดี่ยวและเซลล์ซ้อนทำให้ค่า  $J_{sc}$  เพิ่มขึ้น และ  $V_{oc}$  ลดลง จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าในการสร้างชั้นไอ โดยประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์เดี่ยว 7.0% และเซลล์ซ้อน 10.8% แต่เมื่อเพิ่มชั้น i seed ระหว่างรอยต่อของชั้นพีและชั้นไอ แล้วปรับความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าในชั้น i seed แทน จะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ซ้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 11.2% ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าและชั้น i seed ช่วยทำให้ฟิล์มชั้น i- $\mu$ c-Si:H มีความเป็นผลึกที่สม่ำเสมอมากขึ้นและช่วยพัฒนาให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง a-Si:H/ $\mu$ c-Si:H เพิ่มขึ้นได้

#### เอกสารอ้างอิง

1. Staebler, D. L., "Optically induced conductivity changes in amorphous silicon: A historical perspective" Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 467, pp. 3-5, 1997.
2. Wronski, C.R., "The Light induced changes in a-Si:H material and solar cells" Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 467, pp. 7-17, 1997.
3. Shah, A.V. Meier, J. Vallat-Sauvain, E. Wyrsh, N. Kroll, U. Droz, C. and Graf, U. " Material and solar cell research in microcrystalline silicon" Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 78 pp. 469–491, 2003.
4. Meier, J. Dubail, S. uckiger, R. Fl. Fischer, D. Keppner, H. And Shah, A., Proceedings of the First World Conference on