

## ผลของก๊าซไดโบเรนต่อคุณสมบัติชั้นพีไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอนออกไซด์และการประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนบนพื้นที่ขนาด 0.79 ตารางเมตร

### Effect of B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> gas on the properties of p-type microcrystalline silicon oxide layer and its applications to 0.79 m<sup>2</sup> thin film silicon solar cell module

นพดล สิทธิพล<sup>1</sup>, วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง<sup>2</sup>, ทรงเกียรติ กิตติสนธิรักษ์<sup>1</sup>, อมรรัตน์ ลิ้มมณี<sup>1</sup>  
จรัญ ศรีธาราธิคุณ<sup>1</sup>, กอบศักดิ์ ศรีประภา<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (Solartec), สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA)

111 ถ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

<sup>2</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

Nopphadol Sitthiphol<sup>1</sup> Wisut Titiroongruang<sup>2</sup> Songkiate Kittisontirak<sup>1</sup> Amornrat Limmanee<sup>1</sup>  
Jaran Sriharathikhun<sup>1</sup> Kobsak Sriprapha<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Solar Energy Technology Development (SOLARTEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA),  
111 Thailand Science Park, Paholyothin RD, Klong nueng, Klong luang, Pathumthani 12120, Thailand Tel: 0-2564-7000 ext 2722 Fax:  
0-2564-7059, E-mail: nopphadol@nstda.or.th

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok 10520, Tel: 02-739 2385

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลของก๊าซไดโบเรน (B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) ในฟิล์มพีไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอนออกไซด์ (p-μc-SiO:H) ของเซลล์ชั้นล่าง (bottom cell) ที่มีต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอน ชนิดโครงสร้างแบบเซลล์ชั้นอะมอร์ฟัสซิลิคอน/อะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H/a-Si:H) ที่ถูกสร้างบนฐานรองกระจกชั้นนำไฟฟ้าโปร่งแสง (TCO) พื้นที่ประมาณ 0.79 ตารางเมตร โดยใช้เทคนิคการเคลือบแบบ Radio frequency-plasma enhanced chemical vapor deposition (RF-PECVD) ในแคมเบอร์เดี่ยวชนิด Batch type เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของความเข้มข้นของสารเจือโบรอน (boron doping concentration) ในชั้น p-μc-SiO:H สำหรับใช้เป็นชั้นหน้าต่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยอัตราการเจือโบรอนจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางแสงและไฟฟ้ารวมถึงความเป็นผลึกของชั้น p-μc-SiO:H จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการเจือโบรอน ฟิล์มชั้นพี (p-layer) จะเปลี่ยนสถานะจากไมโครคริสตัลไลน์เป็นอะมอร์ฟัส ซึ่งจะส่งผลต่อการลดลงของค่าความนำไฟฟ้าของฟิล์ม เราพบว่าอัตราส่วนของ B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>/SiH<sub>4</sub> ที่เหมาะสมคือ 0.25 เท่าหรือคิดเป็นความเข้มข้นของการเจือโบรอนเท่ากับ 2500 ppm จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้น p-μc-SiO:H และใช้ชั้นมาตรฐาน p-a-Si:H เป็นชั้นหน้าต่าง พบว่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 3 วัตต์ จาก 51 เป็น 54 วัตต์ หรือคิดเป็นประสิทธิภาพประมาณ 6.8 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากจากการเพิ่มขึ้นของค่ากระแสไฟและค่าฟิลล์แฟกเตอร์ เนื่องจากชั้น p-μc-SiO:H มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงลดลง และค่าความนำไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งยืนยันถึงศักยภาพของชั้น p-μc-SiO:H สำหรับการใช้งานเป็นชั้นหน้าต่างสำหรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอน

#### Abstract

This paper presents the effect of Diborane (B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) gas in p-type microcrystalline silicon oxide layer (p-μc-SiO:H) in bottom cell on the performance of tandem (a-Si:H/a-Si:H) thin film solar cell deposited on TCO glass substrate with the module area of 0.79 m<sup>2</sup> using

radio frequency-plasma enhanced chemical vapor deposition (RF-PECVD) technique in single chamber (batch type). We aimed to optimize boron doping concentration in p- $\mu$ c-SiO:H layer for the use as a window layer in solar module. It is widely known that the doping concentration affects the optical and electrical properties as well as crystallization of p- $\mu$ c-SiO:H layer. Experimental results showed that with, increasing of the boron doping concentration, crystalline-phase of the p- $\mu$ c-SiO:H tended to decrease while amorphous-phase increased leading to the films with low conductivity. We found that, an optimum flow rate ratio of  $B_2H_6/SiH_4$  is 0.25, equaling to the boron doping concentration of 2500 ppm. The comparison of performance between solar cells using the p- $\mu$ c-SiO:H and the conventional p-a-Si:H as a window layer was carried out. The output power of solar cell with p- $\mu$ c-SiO:H window layer was improved by 3 watt from 51 to 54 watt with a conversion efficiency of 6.8% due to the increasing in short circuit current and fill factor which were caused by a decrease in light absorption coefficient and an increase in conductivity. These results verified to the potential of p- $\mu$ c-SiO:H layer for the use as a window layer in thin film silicon solar module.

## 1. บทนำ

จากการที่ความนิยมการใช้พลังงานทดแทน ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้เข้ามามีบทบาทหลัก เพื่อลดการใช้ทรัพยากรของโลกที่มีอยู่อย่างจำกัด หนึ่งในนั้นก็คือพลังงานจากดวงอาทิตย์ ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายมากขึ้นโดยเฉพาะชนิดฟิล์มบางซิลิคอน (thin film silicon solar cell) เนื่องจากเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนต่ำและมีราคาถูกสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ง่าย อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ยังไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน (crystalline silicon solar cells) ซึ่งด้วยเหตุผลดังกล่าวการพยายามพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนอย่างต่อเนื่อง หนึ่งในประเด็นสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนขึ้นอยู่กับชั้นหน้าต่าง (window layer) ซึ่งก็คือชั้นพี ซึ่งวัสดุที่ใช้ได้แก่ ฟิล์มชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย เช่น อะมอร์ฟัสซิลิคอนคาร์ไบด์ (amorphous silicon carbide, a-SiC:H) อะมอร์ฟัสซิลิคอนออกไซด์ (amorphous silicon oxide, a-SiO:H) หรือไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน (microcrystalline silicon,  $\mu$ c-Si:H) โดยสร้างจากเทคนิค radio frequency-plasma enhanced chemical vapor deposition (RF-PECVD) ซึ่งมีก๊าซวัตถุดิบที่ใช้ในการสร้างได้แก่ ก๊าซซิลเลน ( $SiH_4$ ) ก๊าซไดโบเรน ( $B_2H_6$ ) ก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) และก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) เป็นต้น โดยทั่วไปคุณสมบัติที่ดีของฟิล์มชั้นพีจะต้องมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงต่ำค่าช่องว่างทางแสง (optical band gap) กว้างพร้อมกับค่าความนำไฟฟ้าที่ดีด้วย ปัจจุบันฟิล์มบางไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอนได้รับความสนใจอย่างมาก โดยนำไปเป็นชั้นหน้าต่างรับแสงเนื่องจากมีค่าความโปร่งใสและค่าความนำไฟฟ้าที่ดีกว่าฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน ซึ่งจะช่วยให้แสงในย่านความยาวคลื่นสั้น (350-600 nm) สามารถทะลุผ่านชั้นพีไปยังชั้น i-a-Si:H ได้มากขึ้น เป็นผลทำให้ค่ากระแสจลจรปิด ( $J_{sc}$ ) เพิ่มขึ้น ในการวิจัยนี้จึงได้ทดลองสร้างฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H โดยใช้สารเจือที่เป็นก๊าซไดโบเรน  $B_2H_6$  เพื่อหาเงื่อนไขความเข้มข้นของการเจือโบรอน (boron doping concentration) ในชั้น p- $\mu$ c-SiO:H ที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นชั้นหน้าต่างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

## 2. วิธีการทดลอง

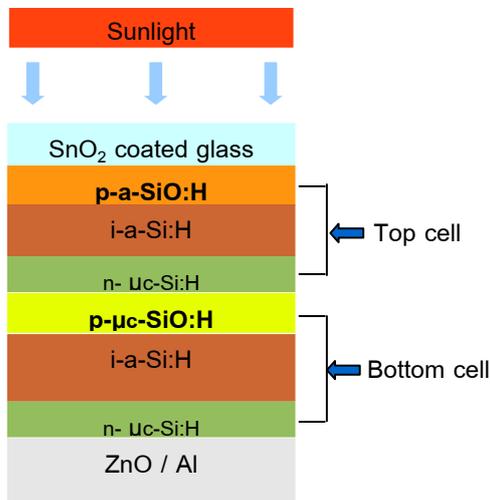
ทำการทดลองเคลือบฟิล์มโดยใช้เทคนิคการเคลือบแบบ radio frequency-plasma enhanced chemical vapor deposition ในแชมเบอร์เดี่ยวชนิด Batch Type ดังแสดงในรูปที่ 1 ระบบนี้จะสร้างฟิล์มชั้น p-i-n layer ใน chamber เดียวกันทั้งหมดทำให้มีการปนเปื้อนได้ แต่ข้อดีคือราคาถูกและใส่กระจกฐานรองได้ที่หลาย ๆ แผ่นพร้อมกัน



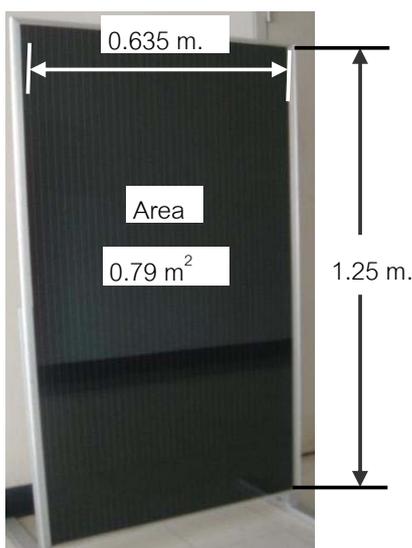
รูปที่ 1. ระบบ PECVD แบบแชมเบอร์เดี่ยวชนิด Batch type

ฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H จะถูกเคลือบลงบนฐานรองกระจกขั้วนำไฟฟ้าโปร่งแสง (TCO) ขนาดพื้นที่ประมาณ 0.79 ตารางเมตร ภายใต้ความดัน 1.0 – 2.0 torr อุณหภูมิห้องเคลือบ (deposition temperature) 180 – 220 °C โดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุความถี่ 13.56 MHz เป็นตัวกำเนิดคลื่นความถี่เพื่อทำให้ก๊าซแตกตัว โดยค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (power density) ของเครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ 60 – 90  $\text{mw}/\text{cm}^2$  ก๊าซ  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{H}_2$  และ  $\text{CO}_2$  จะถูกใช้เป็นก๊าซหลัก ในขณะที่  $\text{B}_2\text{H}_6$  ถูกใช้เพื่อเป็นสารเจือฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H โดยเปลี่ยนอัตราส่วน  $\text{B}_2\text{H}_6/\text{SiH}_4$  เพื่อหาเงื่อนไขความเข้มข้นที่เหมาะสม โดยจะเปลี่ยนความเข้มข้นระหว่าง 1500 - 9400 ppm ความหนาจะถูกกำหนดให้อยู่ในช่วง 350 - 400 nm ค่าอัตราการปลูกฟิล์ม (deposition rate) ถูกวัดโดยเครื่องมือวัดความหนาของฟิล์ม (step profile), ค่าความเป็นผลึกถูกวัดโดยเครื่อง Raman spectroscopy และวัดค่าความนำไฟฟ้าของฟิล์มตามลำดับ

ฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H ที่ถูกสร้างภายใต้เงื่อนไขการเจือด้วย  $\text{B}_2\text{H}_6$  ต่างกัน จะถูกนำไปใช้เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงในชั้น p-bottom ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน โครงสร้างแบบเซลล์ชั้นอะมอร์ฟัสซิลิคอน/อะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H/a-Si:H) แบบ p-i-n/p-i-n โดยมีโครงสร้างของเซลล์คือ glass/SnO<sub>2</sub>/ p-a-Si:H / i-a-Si:H / n-  $\mu$ c-Si:H / p- $\mu$ c-SiO:H/ i-a-Si:H / n-  $\mu$ c-Si:H ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2 หลังจากเสร็จกระบวนการเคลือบฟิล์มครบทุกชั้นแล้วเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกนำไปตัดด้วยแสงเลเซอร์เพื่อแยกแต่ละเซลล์ ให้ขาดออกจากกัน และยังเป็น การกำหนดพื้นที่ของเซลล์ให้มีขนาดเท่ากันทุกเซลล์ เพื่อจะเข้าสู่กระบวนการเคลือบขั้วโลหะเพื่อให้แต่ละเซลล์ต่อกันเป็นโมดูลแสดงดังรูปที่ 3 จากนั้นจึงนำไปวัดประสิทธิภาพของโมดูลภายใต้สภาวะมาตรฐาน (standard test condition, STC) ที่ AM 1.5, 1000  $\text{W}/\text{m}^2$  ที่ 25 °C โดยใช้เครื่องจำลองแสงอาทิตย์เทียม (solar simulator)



รูปที่ 2. โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนแบบเซลล์ชั้นอะมอร์ฟัสซิลิคอน/อะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H/a-Si:H) ที่ใช้ในงานวิจัย

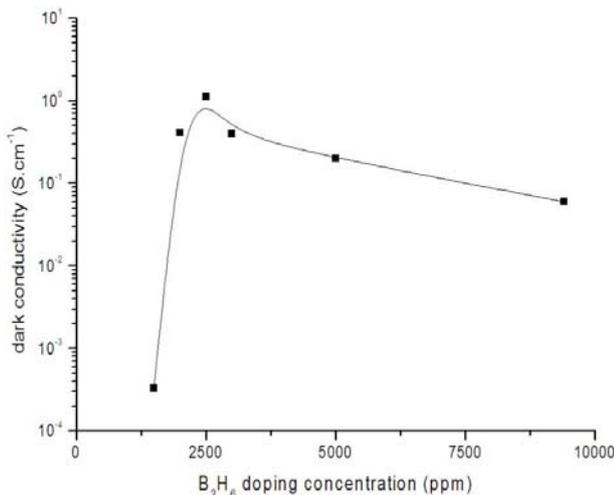


รูปที่ 3. ฐานรองกระจกขั้วนำไฟฟ้าโปร่งแสง (TCO) ที่ผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มบางซิลิคอนแบบเซลล์ชั้นอะมอร์ฟัสซิลิคอน/อะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H/a-Si:H)

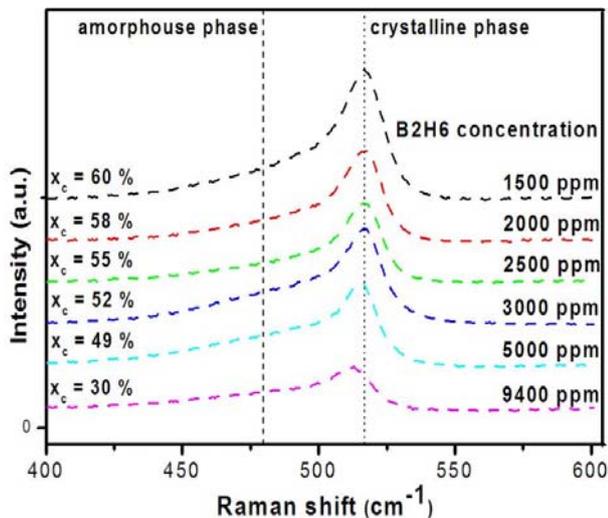
### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 คุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H

ผลการทดลองพบว่าอัตราการเจือก๊าซ  $B_2H_6$  มีผลต่อการนำไฟฟ้าของฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H [1] จากการเปลี่ยนแปลงอัตราการเจือก๊าซ  $B_2H_6$  ที่ 1500 ppm, 2000 ppm, 2500 ppm, 3000 ppm, 5000 ppm และ 9400 ppm เพื่อหาค่าความนำไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4 ผลการทดลองพบว่าที่อัตราการเจือ 2500 ppm. คุณสมบัติของฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H มีค่าการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดประมาณ  $1.2 \text{ S.cm}^{-1}$  โดยที่ค่า  $B_2H_6$  น้อยหรือมากกว่านี้จะมีค่าความนำไฟฟ้าที่ต่ำ สาเหตุคาดมาจากในกรณีที่เพิ่มอัตราการเจือของก๊าซ  $B_2H_6$  จะทำให้โบรอน (B) อะตอม ที่จับกับไฮโดรเจน (H) อะตอม ที่พื้นผิวขณะเกิดฟิล์มมีจำนวนมากขึ้น จึงส่งผลให้สัดส่วนของอะตอม H มีค่าลดลงทำให้ฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H เปลี่ยนเฟสเป็น p-a-SiO:H ได้ จึงทำให้ค่าความนำไฟฟาลดลงดังแสดงในรูปที่ 5 เมื่อเพิ่มอัตราการเจือของก๊าซ  $B_2H_6$  ที่ 3000 ppm, 5000 ppm และ 9400 ppm ค่าการนำไฟฟ้าจะลดลงประมาณ  $4 \times 10^{-1}$ ,  $9 \times 10^{-1} \text{ S.cm}^{-1}$  และ  $6 \times 10^{-2} \text{ S.cm}^{-1}$  ตามลำดับ ส่วนกรณีที่ลดอัตราการเจือของก๊าซ  $B_2H_6$  สรุปได้ว่าเกิดจากปริมาณของ B อะตอม มีไม่เพียงพอที่จับกับ Si อะตอม จึงทำให้ฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำ จากผลการทดลองอัตราการเจือของก๊าซ  $B_2H_6$  ที่ 2000 ppm และ 1500 ppm มีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ  $4 \times 10^{-1}$  และ  $3.3 \times 10^{-4} \text{ S.cm}^{-1}$  ตามลำดับ และเมื่อไม่เติม  $B_2H_6$  ฟิล์มจะเป็นชั้น n- $\mu$ c-SiO:H โดยปกติค่าการนำไฟฟ้าอยู่ที่ประมาณ  $10^{-7} - 10^{-5} \text{ S.cm}^{-1}$  ความเป็นผลึกนั้นสามารถวัดด้วยเครื่อง Raman spectroscopy ดังแสดงในรูปที่ 5 เพื่อทำการวิเคราะห์ และยังสมารถนำค่าที่ได้มาคำนวณหาสัดส่วนความเป็นไมโครคริสตัลไลน์และความเป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอน (crystalline value fraction,  $X_c$ ) [2] ในเนื้อฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H

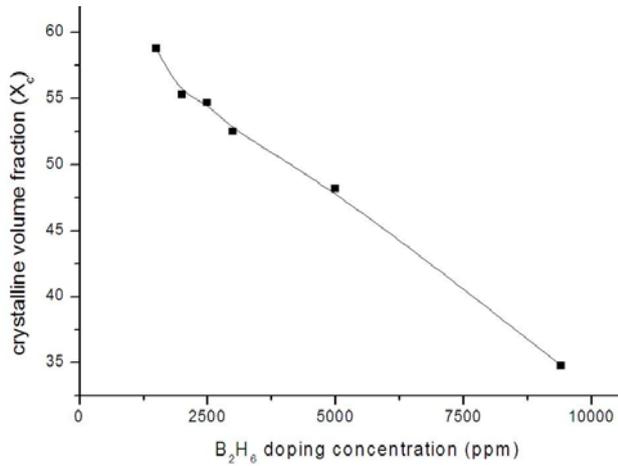


รูปที่ 4. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้าต่ออัตราการเจือก๊าซ  $B_2H_6$  ของฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H



รูปที่ 5. กราฟ Raman spectra ของฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H ต่อความเข้มข้นสารเจือ  $B_2H_6$  ตั้งแต่ 1500 ถึง 9400 ppm

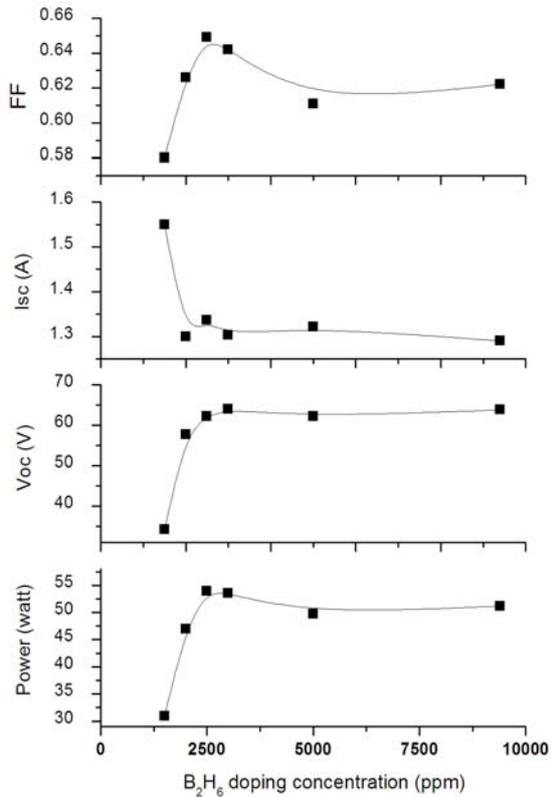
ที่อัตราการเจือก๊าซ  $B_2H_6$  น้อย ๆ จะมีความเป็นผลึกที่ดี ซึ่งหากอัตราการเจือก๊าซ  $B_2H_6$  มากขึ้นค่าความเป็นผลึกจะลดลงและฟิล์มจะมีคุณสมบัติไปทาง a-Si สังเกตได้จากลักษณะของกราฟ Raman และยอดกราฟที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 6. ค่า crystalline volume fraction ( $X_c$ ) ต่อต่อความเข้มข้นสารเจือ  $B_2H_6$  ตั้งแต่ 1500 ถึง 9400 ppm

### 3.2 การประยุกต์ใช้ฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H กับเซลล์แสงอาทิตย์

หลังจากได้เงื่อนไขการสร้างฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H ที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการแล้ว จึงนำไปทดลองใช้งานจริงกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ชั้นอะมอร์ฟิซิลิคอน/อะมอร์ฟิซิลิคอน ค่าพารามิเตอร์ ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นโดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นสารเจือ  $B_2H_6$  ของชั้น p- $\mu$ c-SiO:H ของเซลล์ชั้นล่างตั้งแต่ 1500 ถึง 9400 ppm ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7. ค่าพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์ต่ออัตราความเข้มข้นสารเจือก๊าซB<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 1500 ถึง9400 ppm

ผลการทดลองพบว่าที่ค่าอัตราส่วนความเข้มข้นสารเจือของฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H น้อยกว่า 5000 ppm ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากค่า FF ที่เพิ่มขึ้น อัตราส่วนความเข้มข้นสารเจือที่ 2500 ppmจะได้กำลังงานไฟฟ้าสูงสุดเนื่องจากค่าIsc และ FF ที่เพิ่มขึ้น สันนิษฐานได้ว่ามาจากคุณสมบัติความเป็นผลึกที่ดี ค่าความนำไฟฟ้าที่ดีในชั้น Iscที่เพิ่มขึ้นมาจากคุณสมบัติเด่นของฟิล์มp- $\mu$ c-SiO:Hที่จะมีการส่องผ่านแสงไปยังชั้นn-a-Si:H ได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มที่เป็นp-a-SiO:H ค่า series resistance (Rs) ระหว่างชั้นรอยต่อมีค่าลดลง เป็นผลให้มีค่า FF สูงขึ้น หากเราใช้อัตราส่วนความเข้มข้นสารเจือในปริมาณต่างๆ ได้โดยไม่กระทบกับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้วจะยิ่งดีเพราะจะทำให้คุณสมบัติของฟิล์มมีความหนาแน่นของความบกพร่อง (defect density)ในฟิล์มน้อยลง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นสารเจือ 1500 กับ 2500 ppm จะเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนของ Voc เนื่องจากอัตราส่วนความเข้มข้นสารเจือของ B อะตอมที่จับกับ Si อะตอมมีค่าน้อยเกินไปทำให้ความต่างศักย์ภายใน (built in potential) ระหว่างชั้นที่กับชั้นเอ็นลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ Voc และ FF ลดลงไปด้วย

#### 4. สรุปผลการทดลอง

ผลการพัฒนาสร้างฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H โดยใช้เทคนิคการเคลือบแบบ RF-PECVD ในแคมเบอร์เดี่ยวชนิด Batch type เพื่อหาเงื่อนไขความเข้มข้นของสารเจือโบรอน (boron doping concentration) ของชั้น p- $\mu$ c-SiO:H ที่เหมาะสม พบว่าอัตราการเจือที่ 2500 ppm. มีค่าความนำไฟฟ้าดีที่สุดประมาณ 1.0 S.cm<sup>-1</sup> เมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ชั้นอะมอร์ฟิซิลิคอน/อะมอร์ฟิซิลิคอน พบว่ากำลังไฟฟ้าเพิ่ม 3 วัตต์ จาก 51 เป็น 54 วัตต์ เมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ฟิล์ม p-a-SiO:H เป็นชั้นรับแสงหรือคิดเป็นประสิทธิภาพประมาณ 6.8 เปอร์เซ็นต์ จากการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าและฟิลล์แฟกเตอร์ เนื่องจากชั้น p- $\mu$ c-SiO:H จะมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงลดลง และมีค่าความนำไฟฟ้าสูงขึ้น

### เอกสารอ้างอิง

1. D. Das., M. Jana., "Development of highly conducting p-type Ac-Si:H films from minor diborane doping in highly hydrogenated SiH<sub>4</sub> plasma." Materials Letters 58, pp. 980–985, 2004.
2. R.Saleh, a., N.H.Nickel, b., "Raman spectroscopy of B-doped microcrystalline silicon films," Thin Solid Films 427, pp. 266–269, 2003.

1.