

# การศึกษาฟิล์มพีไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอนออกไซด์และการ ประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร

## Study of P-type Hydrogenated Microcrystalline Silicon Oxide Film and Its Application to Heterojunction Solar Cells

อภิชาญ มุลละคร ทวีวัฒน์ กระจ่างสังข์ สรพงษ์ อินธิแสง อัครวิน หงษ์สิงห์ทอง  
อมรรัตน์ ลีम्मณี กอบศักดิ์ ศรีประภา จริญญา ศรีธรรมาธิคุณ

ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (STL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

E-mail address: apichan.moollakorn@nectec.or.th

### บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มพีไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอนออกไซด์ที่ถูกสร้างจากเทคนิค Very High Frequency-Plasma Enhance Chemical Vapor Deposition ซึ่งจะถูกใช้เป็นชั้นรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร โดยการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอัตราส่วนของก๊าซ  $H_2/SiH_4$  และ  $CO_2/SiH_4$  เพื่อให้ฟิล์มมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดเอ็น จากผลการศึกษาพบว่าชั้นฟิล์มพีไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอนออกไซด์ที่ถูกนำมาใช้กับโครงสร้าง Front grid contact/ITO/p- $\mu$ c-SiO:H/n-c-Si/back contact มีประสิทธิภาพ 14.6% แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด 567 mV, กระแสไฟฟ้าลัดวงจร  $30.9 \text{ mA/cm}^2$  และฟิลล์แฟกเตอร์ 0.83 บนขนาดพื้นที่แอคทีฟ 0.96 ตารางเซนติเมตร

**คำสำคัญ** : เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร, ชั้นหน้าต่างรับแสง, ฟิล์มพีไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอนออกไซด์

### Abstract

This paper investigates the properties of the p-type microcrystalline silicon oxide (p- $\mu$ c-SiO:H) films prepared by VHF-PECVD (Very High Frequency Plasma Enhance Chemical Vapor Deposition) technique which was used as a window layer of heterojunction (HJ) solar cells. The hydrogen per silane ( $H_2/SiH_4$ ) and carbon dioxide per silane ( $CO_2/SiH_4$ ) gas flow rate ratios were varied in order to optimize the p- $\mu$ c-SiO:H films properties and the performance of hetero-junction solar cell. Employing a metal grid/ITO/p- $\mu$ c-SiO:H/n-c-Si/a-Si:H/metal basic configuration, we achieved an efficiency of 14.6% with the open-circuit voltage = 567 mV, short circuit current density =  $30.9 \text{ mA/cm}^2$ , fill factor = 0.83 with the active area of  $0.96 \text{ cm}^2$

**Keywords** : Crystalline silicon heterojunction solar cell, Window layer, P-type hydrogenated microcrystalline silicon oxide film

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนเป็นเซลล์แสงอาทิตย์อีกชนิดหนึ่งที่มีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้เป็น การรวมเอาคุณสมบัติที่ดีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอนและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอน เข้าไว้ด้วยกัน จึงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรมีค่าสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิต่ำและยังคงค่าประสิทธิภาพสูง [1] ซึ่งเหมาะแก่การวิจัยและพัฒนาเพื่อใช้กับประเทศไทยรวมถึงประเทศที่มีสภาพอากาศร้อน โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกซิลิคอนชนิดอื่นนั้นจะมีด้านรับแสงที่สร้างจากฟิล์มบางซิลิคอนชนิดที่เป็นชั้นหน้าต่างชั้นแรกที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอย่างมาก คุณสมบัติของฟิล์มที่ดีควรมีค่าความนำไฟฟ้าสูง (High conductivity,  $\sigma_d$ ) ค่าความกว้างของช่องว่างพลังงานสูง (Wide optical band gap energy,  $E_{opt}$ ) และค่าพลังงานกระตุ้นที่ต่ำ (Low activation energy,  $E_a$ ) [2] ฟิล์มไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอนออกไซด์ ( $\mu\text{-SiO:H}$ ) เป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ ซึ่งฟิล์มมีโครงสร้างประกอบด้วยส่วนที่เป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอนออกไซด์ (Amorphous silicon oxide, a-SiO:H) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดค่า  $E_{opt}$  กับส่วนที่เป็นผลึกซิลิคอน (Microcrystalline silicon,  $\mu\text{-Si:H}$ ) ที่ทำหน้าที่กำหนดค่า  $\sigma_d$  ของฟิล์ม [3] ในต่างประเทศชั้นฟิล์ม p- $\mu\text{-SiO:H}$  ถูกพัฒนาขึ้นและนำไปใช้เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรมาแล้ว [4] และในประเทศไทยทางห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (STL) ศูนย์เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์แห่งชาติ (เนคเทค) ได้เริ่มโครงการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกชนิดอื่น (n-c-Si) เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานในเขตร้อนชื้น (ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่ำ) [5]

ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอถึงการหาเงื่อนไขของการสร้างฟิล์ม p- $\mu\text{-SiO:H}$  ด้วยเทคนิค Very high frequency-plasma enhance chemical vapor deposition (VHF-

PECVD) ที่ความถี่ 40 MHz โดยการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอัตราส่วนของก๊าซ  $\text{H}_2/\text{SiH}_4$  กับก๊าซ  $\text{CO}_2/\text{SiH}_4$  เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงที่ดี จากนั้นนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดอื่น

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1 การสร้างฟิล์ม p- $\mu\text{-SiO:H}$

ฟิล์ม p- $\mu\text{-SiO:H}$  ถูกสร้างบนกระจกฐานรองชนิด Soda lime ขนาด  $3 \times 3 \text{ cm}^2$  ด้วยเทคนิค VHF-PECVD ที่ความถี่ 40 MHz โดยใช้ก๊าซต่าง ๆ ประกอบไปด้วย ก๊าซซิลเลน (Silane,  $\text{SiH}_4$ ) ก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen,  $\text{H}_2$ ) และ ก๊าซสารเจือไตรเมทิลโบรอน (TMB) คณะวิจัยได้พัฒนาคุณสมบัติของฟิล์ม p- $\mu\text{-SiO:H}$  โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนของก๊าซ  $\text{H}_2/\text{SiH}_4$  และ  $\text{CO}_2/\text{SiH}_4$  ให้เหมาะสมแก่การนำไปประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดอื่น โดยมีรายละเอียดเงื่อนไขในการสร้างฟิล์มแสดงในตารางที่ 1 จากนั้นทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มด้วยการวัดค่าสภาพความนำไฟฟ้าในกล่องดำทึบแสง ( $\sigma_d$ ) โดยการสร้างขั้วโลหะ (Coplanar electrode configuration) บนฟิล์มแล้วทำการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าเพื่อวัดว่ากระแสไฟฟ้า จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณเป็นค่าความนำไฟฟ้า, วัดค่าแอกติเวชันเอนเนอจี ( $E_a$ ) ด้วยวิธีการเช่นเดียวกันกับค่าความนำไฟฟ้า แต่วัดและมีการเปลี่ยนอุณหภูมิจาก  $25\text{-}125\text{ }^\circ\text{C}$  จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหา  $E_a$ , วัดค่าความเป็นผลึก ( $X_c$ ) ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy สำหรับความหนาและค่าช่องว่างพลังงานแสง ( $E_{opt}$ ) ได้จากการวัดด้วยเครื่อง Spectroscopic Ellipsometry (SE) โดยค่าที่ได้จากการวัดทำการ Fit โดยใช้ Tauc-Lorentz model [6]

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ ค่าประสิทธิภาพจะถูกวัดและคำนวณด้วยเครื่อง Super solar simulator ซึ่งติดตั้งฟิลเตอร์ AM 1.5 และความเข้มแสงได้ถูกปรับเทียบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐาน (Reference cell) ให้มีความเข้มแสงที่  $100 \text{ mW/cm}^2$  ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ  $25\text{ }^\circ\text{C}$  และผลตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Spectral response) ได้ทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

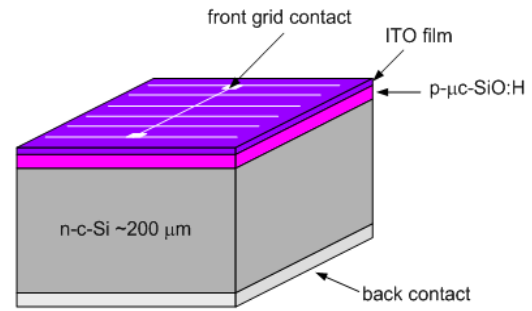
วัดผ่านเครื่องวัด Quantum efficiency (QE) ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิเช่นเดียวกันกับการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการสร้างฟิล์มบางชนิด p- $\mu$ c-SiO:H

อุณหภูมิของฐานรอง ( $^{\circ}$ C)	180
คลื่นความถี่ (MHz)	40
ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ( $W/cm^2$ )	0.08
$H_2/SiH_4$	75-150
$CO_2/SiH_4$	0 – 0.5
TMB (3%- $H_2$ diluted) / $SiH_4$	0.46
ความดันก๊าซ (mTorr)	500
ความหนาฟิล์ม (nm)	$\sim 100$

## 2.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรจันฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดเอ็น

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรจันเริ่มจากนำแผ่นผลึกซิลิคอนชนิด Float zone (FZ) ชนิดเอ็นที่มีสภาพความต้านทาน (Resistivity) ประมาณ 1 ถึง 5 Ohm.cm มาทำความสะอาดด้วยสารละลายเอทานอล อะซิโตน เอทานอล ตามลำดับ ในอ่างความถี่สูง (Ultrasonic bath) กำจัดชั้นซิลิคอนออกไซด์บนแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลาย Hydrofluoric 5% และล้างด้วยน้ำปอดประจุ (Deionized, DI water) เป่าแห้ง จากนั้นทำการเคลือบชั้น p- $\mu$ c-SiO:H บนแผ่นผลึกซิลิคอนโดยการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของอัตราส่วนของก๊าซ  $CO_2/SiH_4$  และความหนาฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H จากนั้นทำการเคลือบขั้วนำไฟฟ้าโปร่งแสงอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) และเคลือบขั้วกริดโลหะที่ด้านหน้าและเคลือบแบบเต็มแผ่นที่ด้านหลังของเซลล์ฯ โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรจันฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดเอ็นมีโครงสร้างประกอบด้วย Front grid contact/ITO/p- $\mu$ c-SiO:H/n-c-Si/back contact ดังแสดงในรูปที่ 1



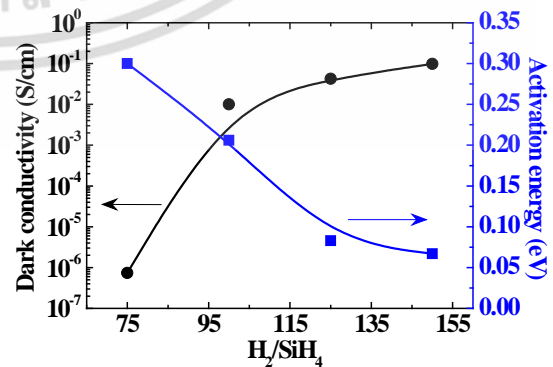
รูปที่ 1 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโร

## 3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

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

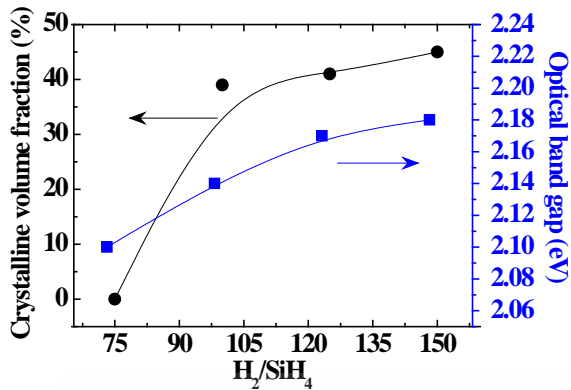
#### 3.1.1 ผลของอัตราส่วนก๊าซ $H_2/SiH_4$

การทดลองนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของก๊าซ  $H_2/SiH_4$  จาก 75 ถึง 150 เท่า และใช้อัตราส่วนของก๊าซ TMB/ $SiH_4$  กับ  $CO_2/SiH_4$  ที่ 1.1 และ 0.3 เท่า ตามลำดับรูปที่ 2 แสดงค่าความนำไฟฟ้าและค่า  $E_a$  ของฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H กับการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของก๊าซ  $H_2/SiH_4$  พบว่าเมื่ออัตราส่วนของก๊าซ  $H_2/SiH_4$  เพิ่มขึ้นจาก 75 ถึง 150 เท่า ค่าความนำไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นจาก  $7.4 \times 10^{-7}$  S/cm เป็น  $9.9 \times 10^{-2}$  S/cm ในขณะที่ค่า  $E_a$  มีค่าลดลงจาก 0.30 eV เป็น 0.07 eV ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างของฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H มีค่าความเป็นผลึกมากขึ้นตามอัตราส่วนของก๊าซ  $H_2/SiH_4$  ที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3 ค่าความเป็นผลึกมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 45% เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของก๊าซ  $H_2/SiH_4$



รูปที่ 2 สภาพความนำไฟฟ้าและ  $E_a$  ของฟิล์ม p- $\mu$ c-SiO:H กับการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนก๊าซ  $H_2/SiH_4$

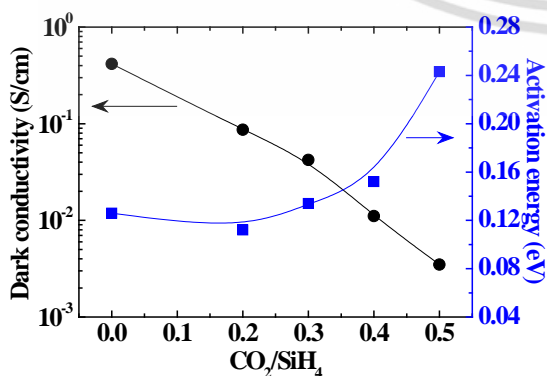
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



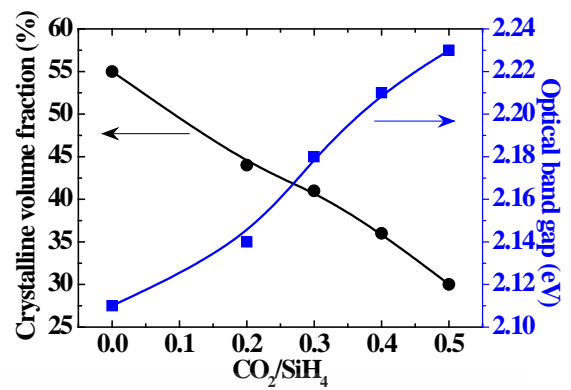
รูปที่ 3 ผลของ H<sub>2</sub>/SiH<sub>4</sub> ต่อค่าความเป็นผลึกและช่องว่างพลังงาน

3.1.2 ผลอัตราส่วนของก๊าซ CO<sub>2</sub>/SiH<sub>4</sub>

ในส่วนนี้คณะวิจัยได้ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของก๊าซ CO<sub>2</sub>/SiH<sub>4</sub> จาก 0 ถึง 0.5 เท่า และใช้อัตราส่วนของก๊าซ TMB/SiH<sub>4</sub> กับก๊าซ H<sub>2</sub>/SiH<sub>4</sub> ที่ 1.1 และ 125 เท่า ตามลำดับ รูปที่ 4 แสดงค่าความนำไฟฟ้า และค่า E<sub>a</sub> ของฟิล์ม p-μc-SiO:H กับการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของก๊าซ CO<sub>2</sub>/SiH<sub>4</sub> พบว่าเมื่ออัตราส่วนของก๊าซ CO<sub>2</sub>/SiH<sub>4</sub> เพิ่มขึ้น จาก 0 ถึง 0.5 เท่า ค่าความนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลงจาก 0.4 S/cm เป็น 3.5×10<sup>-3</sup> S/cm เนื่องมาจากเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโมโนคริสตัลไลน์เป็นอะมอร์ฟัส ในขณะที่ค่า E<sub>a</sub> เพิ่มขึ้นจาก 0.13 eV เป็น 0.24 eV ที่อัตราส่วนของก๊าซ CO<sub>2</sub>/SiH<sub>4</sub> เท่ากับ 0.5 เท่า ในรูปที่ 5 ค่าความเป็นผลึกของฟิล์มลดลงจาก 55% เป็น 30% และค่าช่องว่างพลังงานเพิ่มขึ้นจาก 2.11 eV เป็น 2.23 eV กับอัตราส่วนของก๊าซ CO<sub>2</sub>/SiH<sub>4</sub> เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 0.5 เท่า เพราะอะตอมของออกซิเจนจับพันธะกับอะตอมซิลิคอนมากขึ้น



รูปที่ 4 สภาพความนำไฟฟ้าและ E<sub>a</sub> ของฟิล์ม p-μc-SiO:H กับการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนก๊าซ CO<sub>2</sub>/SiH<sub>4</sub>



รูปที่ 5 ผลของ CO<sub>2</sub>/SiH<sub>4</sub> ต่อค่าความเป็นผลึกและช่องว่างพลังงาน

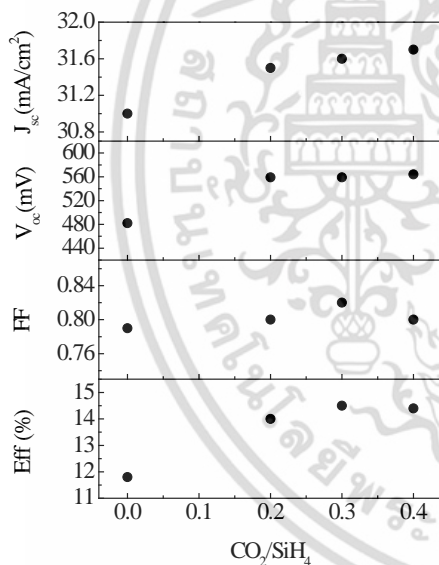
4.2 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโร

4.2.1 ผลของอัตราส่วนก๊าซ CO<sub>2</sub>/SiH<sub>4</sub>

เนื่องจากชั้น p-μc-SiO:H เป็นชั้นรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งฟิล์มควรมีคุณสมบัติดูดกลืนแสงน้อยที่สุด ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของก๊าซ CO<sub>2</sub>/SiH<sub>4</sub> ในชั้น p-μc-SiO:H ที่มีต่อคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโร โดยได้ทำการเพิ่มอัตราส่วนของก๊าซ CO<sub>2</sub>/SiH<sub>4</sub> จาก 0 ถึง 0.4 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ p-μc-Si:H (ไม่เติม CO<sub>2</sub>) พบว่าเมื่อเติมก๊าซ CO<sub>2</sub> ในฟิล์มชั้น p-μc-SiO:H จะทำให้ค่า V<sub>oc</sub> เพิ่มขึ้นจาก 482 mV เป็น 564 mV ดังแสดงในรูปที่ 6 การที่ค่า V<sub>oc</sub> เพิ่มขึ้น อาจจะมีผลมาจากค่าของช่องว่างพลังงานแสงในชั้น p-μc-SiO:H มีค่าสูงขึ้นและทำให้ค่าแพนดักซ์ที่บริเวณรอยต่อของฟิล์มชั้น p-μc-SiO:H กับแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นมีค่าสูงขึ้น และคุณสมบัติ passivation ของรอยต่อพีเอ็นดีขึ้น จึงส่งผลทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรมืด (V<sub>oc</sub>) ที่สูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันยังส่งผลทำให้การรวมตัวของพาหะบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น p-μc-SiO:H กับแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นมีค่าลดลงเนื่องมาจากการสะท้อนกลับของพาหะอิเล็กตรอนและส่งผลต่อค่า J<sub>sc</sub> ทำให้ค่า J<sub>sc</sub> มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 31.0 mA/cm<sup>2</sup> เป็น 31.7 mA/cm<sup>2</sup> กับอัตราส่วนของก๊าซ CO<sub>2</sub>/SiH<sub>4</sub> ที่เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 0.4 เท่า

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนก๊าซ CO<sub>2</sub>/SiH<sub>4</sub> กับผลการทดลองโดยใช้วัสดุ

$\mu\text{-SiO:H}$  เช่นเดียวกัน [4] พบว่า  $J_{sc}$  ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งมีผลมาจากการเพิ่มของ  $E_{opt}$  เมื่อ  $\text{CO}_2/\text{SiH}_4$  เพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามในส่วนของ  $V_{oc}$  และ FF พบว่าผลการทดลองค่อนข้างแตกต่างกันคือค่าทั้งสองมีแนวโน้มลดลงเมื่อ  $\text{CO}_2/\text{SiH}_4$  เพิ่มขึ้น แต่ในบทความนี้พบว่า  $V_{oc}$  และ FF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแล้วคงที่ซึ่งผลการทดลองที่แตกต่างกันนี้อาจเกิดจากการมีโครงสร้างต่างกัน โดยในเอกสารอ้างอิงนั้นได้มีชั้น  $i\text{-a-SiO:H}$  เป็นชั้น Passivate และนอกจากนี้แล้วอัตราส่วนของ  $\text{CO}_2/\text{SiH}_4$  ในการทดลองนี้ยังมีช่วงของการเปลี่ยนแปลงที่แคบกว่า เพราะได้เปรียบเทียบผลของการเติมและไม่เติม  $\text{CO}_2$  ทำให้การเปลี่ยนแปลงของ  $\text{CO}_2/\text{SiH}_4$  มีในช่วง 0 - 0.4 เท่านั้น ซึ่งหากมีการเพิ่มช่วงของการเปลี่ยนแปลงที่กว้างขึ้นคาดว่าผลของ  $V_{oc}$  และ FF จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกันที่แสดงในเอกสารอ้างอิง

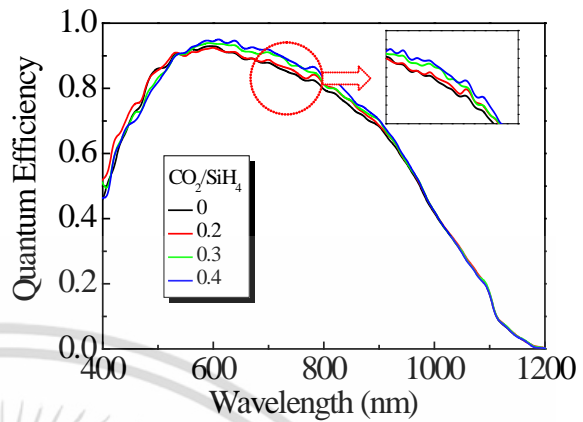


รูปที่ 6 ผลของ  $\text{CO}_2/\text{SiH}_4$  ในชั้น  $p\text{-}\mu\text{-SiO:H}$  ต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

จากผลการทดลองนี้ได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่อัตราส่วนของก๊าซ  $\text{CO}_2/\text{SiH}_4$  เท่ากับ 0.3 เท่า ในรูปที่ 7 แสดงผลการวัดค่าประสิทธิภาพทางควอนตัม (Quantum efficiency, QE) ของเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าที่ความยาวคลื่นระหว่าง 550-950 nm เซลล์แสงอาทิตย์มีการตอบสนองทางแสงที่สูงขึ้นกับอัตราส่วนของก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

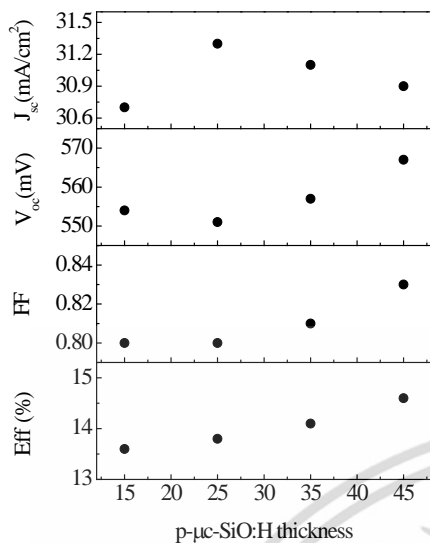
$\text{CO}_2/\text{SiH}_4$  ที่เพิ่มขึ้นในชั้น  $p\text{-}\mu\text{-SiO:H}$  ซึ่งสอดคล้องกับค่า  $J_{sc}$  ที่เพิ่มขึ้นดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น



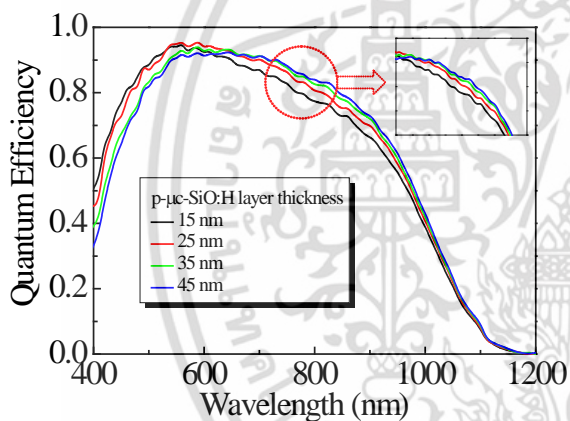
รูปที่ 7 ผลของ  $\text{CO}_2/\text{SiH}_4$  ต่อการตอบสนองเชิงสเปกตรัม

#### 4.2.2 ผลความหนาฟิล์ม $p\text{-}\mu\text{-SiO:H}$

จากการทดลองพบว่า เมื่อความหนาฟิล์ม  $p\text{-}\mu\text{-SiO:H}$  เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า  $V_{oc}$  เพิ่มขึ้นจาก 554 mV เป็น 567 mV และค่า FF เพิ่มขึ้นจาก 0.80 เป็น 0.83 ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากโครงสร้างของฟิล์มมีความเป็นผลึกมากขึ้นสามารถนำไฟฟ้าได้ดี และในทางกลับกัน ฟิล์ม  $p\text{-}\mu\text{-SiO:H}$  ที่หนาขึ้นการดูดกลืนแสงก็มากขึ้นส่งผลทำให้ค่า  $J_{sc}$  ของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลงจาก 31.3 mA/cm<sup>2</sup> เป็น 30.9 mA/cm<sup>2</sup> ซึ่งค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงสุดที่ความหนาชั้น  $p\text{-}\mu\text{-SiO:H}$  เท่ากับ 45 nm ในรูปที่ 9 แสดงค่า QE เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโร พบว่าเมื่อความหนาของชั้น  $p\text{-}\mu\text{-SiO:H}$  เพิ่มขึ้นการตอบสนองทางแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-550 nm มีแนวโน้มลดลง แต่ในทางกลับกันการตอบสนองทางแสงในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 550-1000 nm มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากการที่ลดความหนาของฟิล์ม  $p\text{-}\mu\text{-SiO:H}$  ให้บางลงจึงส่งผลให้แสงส่องผ่านเข้าไปในแผ่นผลึกซิลิคอนได้มากและทำให้เกิดคูพาหะได้มากขึ้นเช่นกัน แต่เนื่องจากเซลล์ฯ โครงสร้างนี้ไม่มีชั้นสะท้อนพาหะที่ด้านหลัง (Back surface field) จึงทำให้การตอบสนองทางแสงในช่วงความยาวคลื่นยาวลดลง



รูปที่ 8 ผลความหนาของชั้นรับแสงต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 9 ผลความหนาของชั้นรับแสงต่อการตอบสนองเชิงสเปกตรัม

4. สรุป

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขอัตราส่วนของก๊าซ  $H_2SiH_4$  และ  $CO_2/SiH_4$  ที่มีต่อคุณสมบัติฟิล์ม  $p-\mu c-SiO:H$  พบว่าการเพิ่มสัดส่วน  $H_2SiH_4$  จะทำให้ฟิล์มมีค่าความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสภาพความนำเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่ม  $CO_2/SiH_4$  จะทำให้ฟิล์มมีเฟสอะมอร์ฟัสมากขึ้น ทำให้สภาพความนำลดลง จากการนำฟิล์ม  $p-\mu c-SiO:H$  มาประยุกต์ใช้เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิดเอ็น โดยทำการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขอัตราส่วนของก๊าซ  $CO_2/SiH_4$  และความหนาฟิล์ม  $p-\mu c-SiO:H$  ในเซลล์ฯ พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด

รอยต่อแบบเฮเทอโร มีค่าประสิทธิภาพ เท่ากับ 14.6 % ( $V_{oc} = 567$  mV,  $J_{sc} = 30.9$  mA/cm<sup>2</sup>, FF = 0.83) บนพื้นที่ขนาด 0.96 m<sup>2</sup> ดังนั้นฟิล์ม  $p-\mu c-SiO:H$  มีศักยภาพใช้เป็นชั้นรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรโรได้ [4, 7-8] และในอนาคตเมื่อมีการเพิ่มชั้นเอ็นอะมอร์ฟัสซิลิคอน ( $n-a-Si:H$ ) และชั้นอินทรินสิคอะมอร์ฟัสซิลิคอนออกไซด์ ( $i-a-SiO:H$ ) ก็จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ฯให้สูงขึ้นได้

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Y. Tsunomura, et al., “Twenty-two percent efficiency HIT solar cell”, Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol.93, pp. 670-673, 2009.

[2] Jaran Sritharathikhun., et al., “Effects of Diaborane doping concentration in p-type microcrystalline silicon oxide layer on thin film silicon solar cells”, The 33<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference, Chaing Mai, Thailand, Dec., 2010.

[3] H.Watanabe, K.Haga and T.Lohner, “Structure of high-photosensitivity silicon-oxygen alloy films” J. Non-Cryst. Solids, Vol.1085, pp. 164-166, 1993.

[4] J. Sritharathikhun, et al., “Optimization of p-Type Hydrogenated Microcrystalline Silicon Oxide Window Layer for High-Efficiency Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cells” Jpn. J. Appl. Phys., Vol.48, 2009.

[5] Mikio Taguchi, et al., “Prog. Photovolt: Obtaining a higher  $V_{oc}$  in HIT cells” Res. Appl., Vol.13, pp. 481–488, 2005.

[6] H. Fujiwara, “Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Application”, John Wiley & Sons., 2007.

[7] C. Banerjee, et al., “Fabrication of heterojunction solar cells by using microcrystalline hydrogenated silicon oxide film as an emitter” J. Phys., Vol.41, 2008.

[8] J. Sritharathikhun, et al., “Optimization of Amorphous Silicon Oxide Buffer Layer for High-Efficiency p-Type Hydrogenated Microcrystalline Silicon Oxide/n-Type Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cells” Jpn. J. Appl. Phys., Vol.47, 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้