# ผลของก๊าซไฮโดรเจนในชั้นไออะมอร์ฟัสซิลิคอนที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอน

# Effect of $H_2$ dilution in an intrinsic amorphous silicon layer on the efficiency of thin film silicon solar cells

อภิชาญ มูลละคร* ชาญณรงค์ ภิรมย์จิตร อมรรัตน์ ลิ้มมณี จรัญ ศรีธาราธิคุณ กอบศักดิ์ ศรีประภา
สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
111 ถ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120 โทร 02 564 7000 ต่อ 2715
โทรสาร 02 564 7059 E-mail: apichan@nstda.or.th

Apichan Moollakorn* Channarong Piromjit Amornrat Limmanee Jaran Sritharathikhun Kobsak Sriprapha
Institute of Solar Energy Technology Development (SOLARTEC), National Science and Technology Development Agency, (NSTDA)
111 Phahonyothin Rd., Klong 1, Klong Luang, Pathumthani, 12120, Thailand
Tel: 02 564 7000 ext 2716 Fax: 02 564 7059, E-mail: apichan@nstda.or.th

**บทคัดย่อ**

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนให้มีประสิทธิภาพสูงนั้น สามารถทำได้หลายแนวทาง ซึ่งแนวทางหนึ่งที่ใช้กันคือ การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบเซลล์ซ้อนสองชั้น โดยสร้างเซลล์ชั้นบนและชั้นล่างให้มีการตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงแตกต่างกัน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้พัฒนาคุณสมบัติของชั้นไออะมอร์ฟัสซิลิคอน (i-a-Si:H) ซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นดูดกลืนแสงช่วงสั้น (350-650 nm) ในเซลล์ชั้นบนของโครงสร้างเซลล์ซ้อน a-Si:H/μc-Si:H โดยทำการหาเงื่อนไขอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนต่อไซเลน ($H_2/SiH_4$) ที่เหมาะสม โดยปรับอัตราส่วนการไหลของก๊าซ $H_2/SiH_4$ จาก 2-10 เท่า เซลล์แสงอาทิตย์จะถูกสร้างบนฐานรองกระจกชั้วนำไฟฟ้าโปร่งแสง Transparent conductive oxide (TCO) โดยใช้เทคนิค Very High Frequency-Plasma Enhance Chemical Vapor Deposition (60 MHz VHF-PECVD) ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน (i-a-Si:H) ที่ความหนา 400 nm พบว่า ที่อัตราส่วนของก๊าซ $H_2/SiH_4$ เท่ากับ 4 เท่า สัดส่วนสภาพการนำไฟฟ้าขณะมีแสงกับขณะมืด ($\sigma_{ph}/\sigma_d$) มีค่าสูงสุด เท่ากับ $5.8 \times 10^4$ ขณะที่ค่า $E_{opt}$ (optical band gap) ของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นจาก 1.66 eV ที่อัตราส่วนของก๊าซ $H_2/SiH_4$ 4 เท่า ถึง 1.74 eV ที่อัตราส่วนของก๊าซ $H_2/SiH_4$ 8 เท่า และลดลงที่สัดส่วนที่สูงขึ้นไป เมื่อนำฟิล์มบาง i-a-Si:H ไปใช้เป็นชั้นไอในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดพื้นที่ 0.75 $cm^2$ โดยชนิดเซลล์เดี่ยว (Single cell) ประสิทธิภาพสูงสุดที่ได้คือ 9.0% ที่อัตราส่วนของก๊าซ $H_2/SiH_4$ 4 เท่า และเมื่อนำไปใช้เป็นชั้นไอของเซลล์บนโครงสร้างเซลล์ซ้อน a-Si:H/μc-Si:H พบว่าที่อัตราส่วนของก๊าซ $H_2/SiH_4$ 8 เท่า ได้ประสิทธิภาพสูงสุด 10.5%

**Abstract**

There are many methods to develop thin film silicon solar cells. One of the most interesting methods is to develop double junction solar cells whose top and bottom cells can response the light at the different wavelength region. In this paper we report the development of intrinsic amorphous silicon layer (i-a-Si:H) for the use as an absorber layer in the top cell of the tandem (i-a-Si/i-μc-Si) cell structure. The $H_2/SiH_4$ gas flow rate ratio was varied from 2 to 10 in order to optimize the deposition condition. Solar cells were fabricated on transparent conductive oxide (TCO) glass substrate by using Very High Frequency- Plasma Enhance Chemical Vapor Deposition (60 MHz VHF-PECVD) technique. The electrical and optical properties of amorphous silicon layer (i-a-Si:H) with the thickness of 400 nm were investigated. It was found that, the photo gain (the ratio of photo conductivity to dark conductivity, $\sigma_{ph}/\sigma_d$) reached to the maximum value of $5.8 \times 10^4$ at the $H_2/SiH_4$ ratio of 4. While the $E_{opt}$ (optical band gap) value of the film increased from 1.66 eV to 1.74 eV at the $H_2/SiH_4$ ratio of 8 and decreased with higher $H_2/SiH_4$ ratio. Introducing of i-a-Si:H as an absorber layer in single (p/i-a-Si:H/n) and tandem (p/i-a-Si:H/n/p/i-μc-Si:H/n) solar cells with the active

area of 0.75 $cm^2$ was carried out, we achieved an efficiency of 9.0% at the $H_2/SiH_4$ ratio of 4 for single cell and 10.5% at the $H_2/SiH_4$ ratio of 8 for tandem cell, respectively.

**1. บทนำ**

พลังงานนับว่าเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการดำรงชีวิตอยู่ในยุคที่ต้องใช้เทคโนโลยีเข้ามาช่วยอำนวยความสะดวกสบาย และปัจจุบันความต้องการในการใช้พลังงานไฟฟ้าก็เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ การพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานทดแทนจึงมีความสำคัญเพื่อให้สามารถนำพลังงานมาใช้อย่างเพียงพอกับความต้องการใช้งาน สิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ทันที ซึ่งเรียกว่า “เซลล์แสงอาทิตย์” ถึงแม้จะมีข้อจำกัดในเรื่องของต้นทุนในการผลิตที่สูง แต่เป็นเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และแหล่งพลังงานซึ่งเป็นแสงจากดวงอาทิตย์ที่เป็นพลังงานสะอาดนั้นมีอยู่มากมายมหาศาลไม่มีวันหมด จึงเป็นจุดเด่นของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ที่หลายๆ ประเทศหันมาให้ความสนใจกับการพัฒนาเทคโนโลยีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) ถูกพัฒนาขึ้นในปี 1976 โดย P.Carlaon และ C.Wranski [1] เป็นชนิดเซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เพราะเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีราคาถูกและมีต้นทุนในการผลิตต่ำ ซึ่งมีหลายแนวทางในการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น การพัฒนาฟิล์มชั้นพี (p-type) ที่เป็นชั้นหน้าต่าง (window layer) รับแสงให้สามารถส่งผ่านแสงได้ดีในทุกความยาวคลื่น และมีความต้านทานต่ำ การพัฒนาชั้นเอ็น (n-type) ให้มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี สะท้อนแสงเพิ่มมากขึ้น และการพัฒนาชั้นไอ (i-layer) ให้สามารถตอบสนองช่วงที่ความยาวคลื่นแสงที่ต้องการ เนื่องจากชั้นไอทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้า จึงเป็นชั้นที่มีผลกระทบกับประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มาก การศึกษาผลของ $H_2$ ในชั้นไอที่มีผลกับเซลล์แสงอาทิตย์และจากรายงานของ M.S Bennett และ J.C. Tu [2] พบว่าการเติม $H_2$ ในฟิล์ม a-Si:H จะช่วยให้เปอร์เซ็นต์การเสื่อมสภาพ (degradation) ของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง และนอกจากนี้การปรับอัตราส่วนของก๊าซ $H_2$ ยังมีผลให้ค่า Optical bandgap ($E_{opt}$) เปลี่ยนแปลงอีกด้วย [3] และด้วยข้อดีที่ค่า $E_{opt}$ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H (1.74 eV) กว้างกว่า μc-Si:H (1.1 eV) จึงถูกนำมาสร้างเป็นเซลล์ชั้นบน (top cell) ของเซลล์ซ้อนโครงสร้าง a-Si:H/μc-Si:H เพราะทำให้แสงส่องผ่านถึงเซลล์ชั้นล่างได้มากขึ้น เมื่อ $E_{opt}$ กว้างขึ้น

งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลถึงของอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซไซเลน ($H_2/SiH_4$) ต่อคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์ม a-Si:H รวมถึงการนำไปสร้างเป็นชั้นไอของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งชนิดเซลล์เดี่ยว (single cell) และเซลล์ซ้อน (multi-junction)

**2. วิธีการทดลอง**

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนต่อไซเลน ($H_2/SiH_4$) ในชั้นไออะมอร์ฟัสซิลิคอน โดยใช้วิธีเตรียมฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนบนกระจก TCO ด้วยวิธี Plasma Enhance Chemical Vapor Deposition (PECVD) เพื่อกระตุ้นให้ก๊าซ $SiH_4$ และ $H_2$ แตกตัวโดยใช้คลื่นความถี่ขนาด 60 MHz และปรับอัตราส่วนระหว่างก๊าซ $H_2/SiH_4$ จาก 2-10 เท่า โดยกำหนดเงื่อนไขการทดลองต่อไปนี้ให้คงที่ อัตราการไหลของก๊าซ $SiH_4$ 20 sccm ความดันก๊าซ 0.5 Torr อุณหภูมิฐานรอง 180 °C ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า 50 $mW/cm^2$ โดยกำหนดให้ความหนาของฟิล์ม 400 nm ฟิล์มที่เตรียมได้จะถูกนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาสัดส่วนสภาพการนำไฟฟ้าขณะมีแสงและขณะมืด ($\sigma_{ph}/\sigma_d$) และวิเคราะห์ค่า $E_{opt}$ ของคุณสมบัติทางแสง (optical bandgap) หลังจากนั้นใช้ฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนเป็นชั้นไอของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยศึกษาผลของการปรับอัตราส่วนของก๊าซ $H_2/SiH_4$ ทั้งในเซลล์เดี่ยวและเซลล์ซ้อน

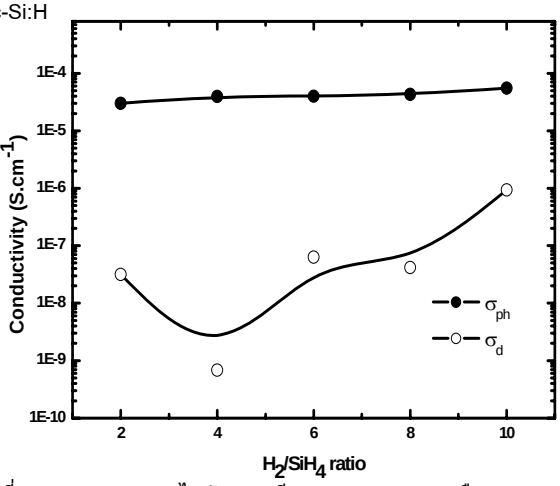
ระบบที่ใช้ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เป็นระบบห้องเคลือบสุญญากาศแบบ multi-chamber แต่ละ chamber จะสามารถเคลือบฟิล์มชนิดต่างๆ กัน เช่น ฟิล์ม Ag, ZnO, p-μc-SiO, i-a-Si:H และ n-μc-Si เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเซลล์เดี่ยวมีโครงสร้างดังนี้ glass / $SnO_2$ / ZnO / p-μc-SiO / i-a-Si:H / n-μc-Si:H / ZnO / Ag ส่วนโครงสร้างเซลล์ซ้อนมีโครงสร้างดังต่อไปนี้ glass / $SnO_2$ / ZnO / p-μc-SiO / i-a-Si:H / n-μc-Si:H / ZnO / p-μc-SiO / i-μc-Si:H / n-a-Si:H / ZnO / Ag ตามลำดับ หลังจากนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกนำไปตัดด้วยแสงเลเซอร์ให้มีพื้นที่ขนาด 0.75 $cm^2$ เพื่อวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้เงื่อนไขมาตรฐาน (AM 1.5, 1000 $W/m^2$ ที่ 25 °C) และวิเคราะห์คุณสมบัติการตอบสนองทางแสงของเซลล์ด้วยเครื่อง Quantum Efficiency (QE)

**3. ผลการทดลอง**

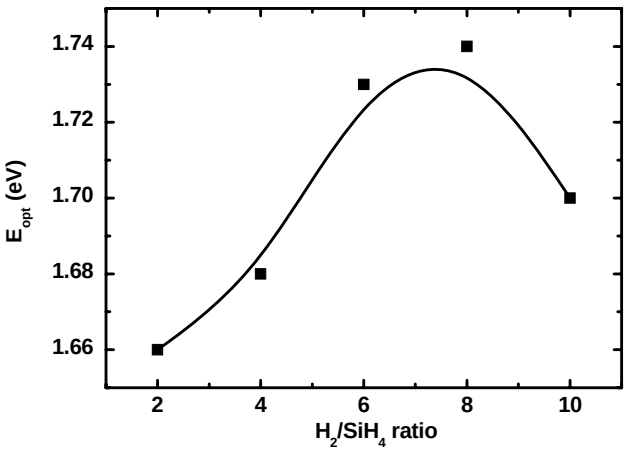
**3.1 ผลการปรับอัตราส่วนระหว่างก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซไซเลนในฟิล์ม a-Si:H**

รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม a-Si:H ต่ออัตราส่วนของ $H_2/SiH_4$ พบว่าสภาพการนำไฟฟ้าในที่มืดที่อัตราส่วนของ $H_2/SiH_4$ 4 เท่า มีค่าต่ำสุด แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นสูงเรื่อยๆ ถึง $10^{-6}$ $S.cm^{-1}$ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ $H_2/SiH_4$ ขณะที่สภาพการนำไฟฟ้าขณะฉายแสงมีค่าใกล้เคียงกัน และพบว่าที่อัตราส่วน $H_2/SiH_4$ 4 เท่า มีค่า $\sigma_{ph}/\sigma_d$ สูงสุด คือ 5.8 x $10^4$ ซึ่งแสดงถึงจุดบกพร่องในเนื้อฟิล์มมีปริมาณต่ำกว่าที่ค่าอัตราส่วนของ $H_2/SiH_4$ อื่น

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างค่า $E_{opt}$ และอัตราส่วน $H_2/SiH_4$ ในรูปที่ 2 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วน $H_2/SiH_4$ และมีค่าสูงที่สุด 1.74 eV ที่อัตราส่วน $H_2/SiH_4$ 8 เท่า เนื่องจาก H2 content เพิ่มมากขึ้น หลังจากนั้นค่า $E_{opt}$ จะลดลง เนื่องจากฟิล์มเปลี่ยนเฟสจาก a-Si:H เป็น μc-Si:H



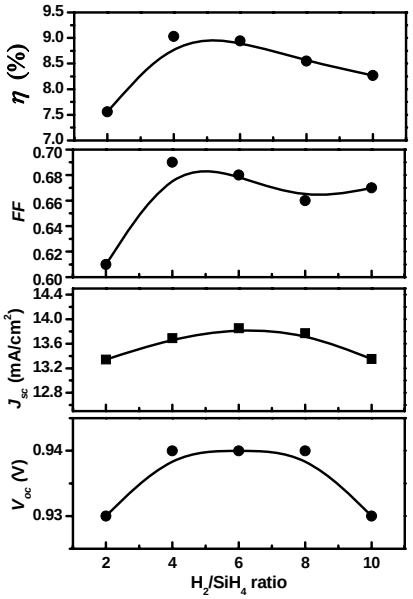

รูปที่ 1 ค่าสภาพการนำไฟฟ้าขณะมีแสง ($\sigma_{ph}$) และขณะมืด ($\sigma_d$) ของชั้น i-a-Si:H กับอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซไซเลน ($H_2/SiH_4$)



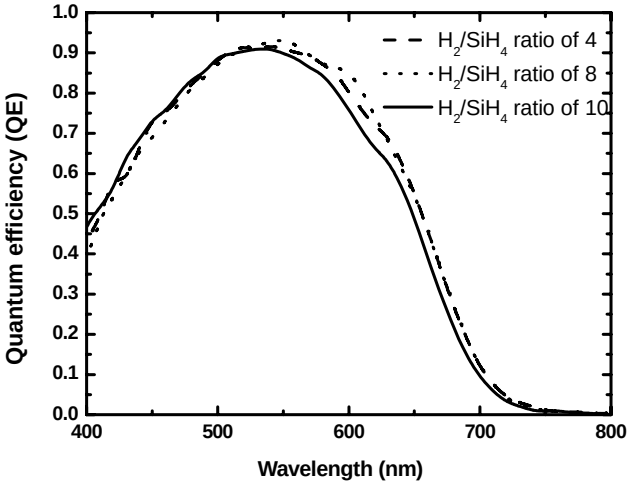

รูปที่ 2 ค่า Optical bandgap ($E_{opt}$) ของชั้น i-a-Si:H กับอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซไซเลน ($H_2/SiH_4$)

### 3.2 การประยุกต์ใช้ฟิล์ม a-Si:H เพื่อใช้เป็นชั้นไอในเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H โดยปรับอัตราส่วนของ $H_2/SiH_4$ ในชั้นไอของเซลล์เดี่ยว พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Voc) จะแปรผันตามค่า $E_{opt}$ และได้ประสิทธิภาพสูงสุดที่อัตราส่วน $H_2/SiH_4$ 4 เท่า ซึ่งมีค่า FF มากสุดที่ 0.69 (รูปที่ 3) เพราะค่าอัตราส่วน $\sigma_{ph}/\sigma_d$ ของ $H_2/SiH_4$ ที่ 4 เท่า มีค่าสูงที่สุด ซึ่งแสดงว่าที่อัตราส่วนนี้ฟิล์มมีคุณภาพดีที่สุดและจากคุณสมบัติการตอบสนองทางแสง (รูปที่ 4) พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ $H_2/SiH_4$ กราฟจะเลื่อนไปด้านช่วงความยาวคลื่นสั้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า $E_{opt}$ ที่กว้างขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ $H_2/SiH_4$



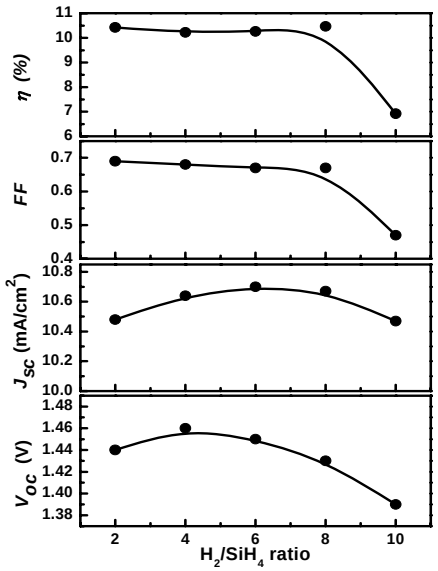

รูปที่ 3 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเซลล์เดี่ยว (Single cell) กับอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซไซเลน($H_2/SiH_4$)



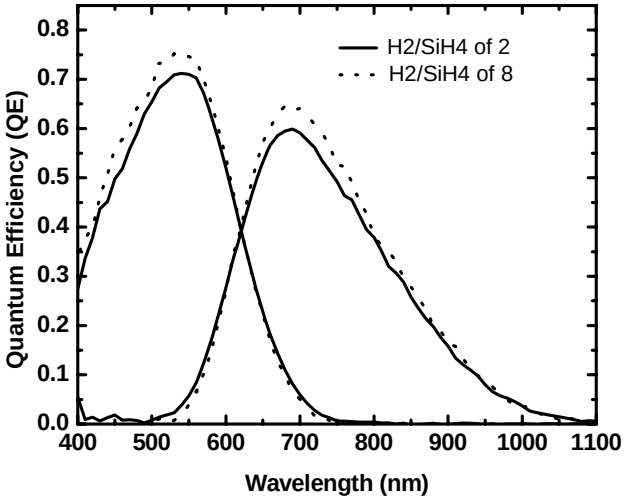

รูปที่ 4 การตอบสนองต่อแสงในเซลล์เดี่ยว (Single cell) กับอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซไซเลน ($H_2/SiH_4$)

### 3.3 การประยุกต์ใช้ฟิล์ม a-Si:H กับเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง a-Si:H/μc-Si:H

ผลของการปรับอัตราส่วนของ $H_2/SiH_4$ ในเซลล์ซ้อนโครงสร้าง a-Si:H/μc-Si:H ได้ประสิทธิภาพสูงสุดที่อัตราส่วนของก๊าซ $H_2/SiH_4$ 8 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มที่มีค่า $E_{opt}$ สูงที่สุดเท่ากับ 1.74 eV จึงทำให้ $V_{oc}$ สูงขึ้น (รูปที่ 5) และแสงสามารถส่งผ่านชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนไปถึงเซลล์ชั้นล่างได้มากขึ้นทำให้กระแสของเซลล์ชั้นล่างเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6




รูปที่ 5 ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเซลล์ซ้อน (multi-junction cell) กับอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซไซเลน ($H_2/SiH_4$)




รูปที่ 6 แสดงคุณสมบัติของการตอบสนองต่อแสงในเซลล์ชั้นบน (top cell) ของเซลล์ซ้อน กับอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซไซเลน ($H_2/SiH_4$)

**4. สรุป**

จากผลการทดลองพบว่า ฟิล์มชั้นอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่อัตราส่วนของก๊าซ $H_2/SiH_4$ 4 เท่า มีค่าสัดส่วนสภาพการนำไฟฟ้าขณะมีแสงกับขณะมืด ($\sigma_{ph}/\sigma_d$) สูงสุด เท่ากับ 5.8x $10^4$ และอัตราส่วนของก๊าซ $H_2/SiH_4$ ที่ 8 เท่า มีค่า $E_{opt}$ (optical band gap) สูงสุดเท่ากับ 1.74 eV เมื่อนำไปสร้างเป็นชั้นไออะมอร์ฟัสซิลิคอน (i-a-Si:H) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดเซลล์เดี่ยว (single cell) ได้ประสิทธิภาพสูงสุด 9.0% ที่อัตราส่วนของก๊าซ $H_2/SiH_4$ 4 เท่า เพราะค่าอัตราส่วน $\sigma_{ph}/\sigma_d$ สูงที่สุด แสดงว่าฟิล์มมีคุณภาพและการตอบสนองทางแสงดีที่สุด เมื่อนำไปใช้เป็นชั้นไอของเซลล์บนในเซลล์ซ้อนที่มีโครงสร้างแบบ a-Si:H/μc-Si:H ได้ประสิทธิภาพสูงสุด 10.5% ที่อัตราส่วนของก๊าซ $H_2/SiH_4$ 8 เท่า

**เอกสารอ้างอิง**

1. Staeble, D.L., “Optically induced conductivity changes in amorphous silicon: A historical perspectire”, Materials research society Symphosium, Vol. 467, pp 3-5, 1997
2. Bennett, M.S., and J.C.Tu, “Amorphous hydroginated Silicon p-i-n Solar cell Grown from hydrogen-Dilute Silane”, Mat. Res. Soc. Symp. Prec., Vol.192, 1990, pp 45-50
3. Meiling. H., M.J. Van den Boogaad, R.G.I. Schropp, J. Bezemes, and W.F. vander Weg, “Hydrogen dilution of silane: correlation between the structure and optical bangap in GD a-Si:H films”, Mat. Res. Soc. Symp. Prec., Vol.192, 1990b, pp 645-650