

การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมแกเลียมไคซีลีไนต์สำหรับ เซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง

Fabrication of Cu(In,Ga)Se₂ Thin Films for High Efficiency Solar Cells

ชาณุวิทย์ จิตยุทธการ* ปณิตา ชินเวทกิจวานิชย์ โสจิพงษ์ ฉัตรภรณ์ ขจรยศ อยู่ดี สมพงษ์ ฉัตรภรณ์
ห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330 โทร 0-2218-5107 โทรสาร 0-2253-1150

Chanwit Chityuttakan*, Panita Chinvetkitvanich, Sojiphong Chatraphorn, Kajornyod Yoodee and Somphong Chatraphorn
Semiconductor Physics Research Laboratory (SPRL), Department of Physics, Faculty of Science,
Chulalongkorn University, Phayathai Road, Phatumwan, Bangkok 10330, Thailand
Tel: 0-2218-5107 Fax: 0-2253-1150 E-mail: wit@sprl.phys.sc.chula.ac.th

บทคัดย่อ

ได้ออกแบบและสร้างระบบเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมแกเลียมไคซีลีไนต์ Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงสำหรับประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงที่มีโครงสร้าง (Ni)Al/ZnO(AI)/CdS/CIGS/Mo/SLG ฟิล์มบาง CIGS ถูกเตรียมบนแผ่นรองรับกระจก soda-lime ที่อุณหภูมิคงที่ประมาณ 500°C ได้รับความหนาประมาณ 2 ไมครอน โดยเตรียมด้วยวิธีการระเหยร่วมกันจากแหล่งระเหยธาตุทั้งสี่แหล่งในกระบวนการ 2 ขั้นตอน (2-stage process) ในการควบคุมกระบวนการปลูกฟิล์มได้ใช้เทคนิคการตรวจวัดสัญญาณ ณ เวลาจริง (*in situ* monitoring) ได้แก่ อุณหภูมิแผ่นรองรับ อุณหภูมิของแกรไฟต์ฮีตเตอร์ กำลังไฟฟ้าที่ระบบควบคุมอุณหภูมิจ่ายให้กับแกรไฟต์ฮีตเตอร์ และอุณหภูมิผิวหน้าของฟิล์ม CIGS เพื่อใช้ควบคุมกระบวนการและ ตรวจจับสิ้นสุด (end point detection, EPD) โปรไฟล์อุณหภูมิที่ใช้ปลูกฟิล์ม CIGS เริ่มต้นจาก Cu-rich stage จะได้ฟิล์มที่มีสัดส่วนอะตอมของ [Cu]/([In]+[Ga]) มากกว่า 1 ($y > 1$) แล้วต่อด้วย Cu-poor stage จนกระทั่งได้เนื้อฟิล์มทั้งหมดที่มีค่า $y < 1$ และหยุดกระบวนการปลูกที่ค่า $y \approx 0.9$ ในการควบคุมกระบวนการนี้อาศัยการเปลี่ยนแปลงความร้อนของแผ่นรองรับเนื่องจากค่า emissivity ของฟิล์ม CIGS เปลี่ยนในระหว่างการเปลี่ยนจาก Cu-rich ไปเป็น Cu-poor ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดฮีตเตอร์เช่นเดียวกัน จึงสามารถใช้สัญญาณเหล่านี้ในการควบคุมกระบวนการปลูกฟิล์ม CIGS ที่ให้สัดส่วนอะตอมตามที่ต้องการได้เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ จากผลการวิเคราะห์ด้วย XRD และ SEM พบว่าฟิล์มมีโครงสร้างเป็นแบบซาลโคไพไรท์ที่จัดเรียงระนาบ (112) ขนานกับระนาบของแผ่นรองรับ มีเกรนเป็นแท่งใหญ่และผิวขรุขระ มีรอยแยกเล็กจากผิวบน เมื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์และวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ รวมทั้งวัดประสิทธิภาพเชิงควอนตัมพบว่า มีประสิทธิภาพสูง ถึง 14% (ไม่มีชั้นป้องกันแสงสะท้อนกลับ)

คำสำคัญ; Cu(In,Ga)Se₂ ฟิล์มบาง/เซลล์แสงอาทิตย์/ประสิทธิภาพสูง

Abstract

A thin film deposition system for the Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) absorber layers of high efficiency solar cells was designed and constructed. The structure of the CIGS solar cells consists of five different layers of materials, (Ni)Al/ZnO(AI)/CdS/CIGS/Mo/SLG, where the SLG is the soda-lime-glass substrate. The CIGS absorber layers of approximately 2 μm thick were co-evaporated from four elemental sources onto the Mo/SLG substrates with constant substrate temperature of about 500°C. The controllable of the two-stage growth process using *in situ* monitoring signals (substrate temperature, graphite heater temperature, heating output power and temperature of the CIGS surface) was employed for process control and end point detection (EPD). The temperature profiles of the sources for CIGS films deposition was started with the Cu-rich stage, where the atomic ratio of [Cu]/([In]+[Ga]) was greater than 1 ($y > 1$), then followed by the Cu-poor stage until $y < 1$ was reached, and the process was finished at $y \approx 0.9$. In this setup, we use the change in the thermal behavior of the substrate due to the variations in emissivity of CIGS film during the transition of Cu-rich to Cu-poor in the second stage corresponding to the change of power fed into the substrate heater as the control signal. By observing the variation of control signals, the desired final composition of the film can be obtained. XRD and SEM results showed that these films were typically (112) oriented chalcopyrite with large columnar grains and rough surfaces with deep crevices. From I-V and QE measurements, the CIGS thin film solar cells fabricated with this process yielded efficiencies up to 14% (without AR).

Keyword; Cu(In,Ga)Se₂/ Thin film/ Solar cell/ High efficiency

* Corresponding author

1. บทนำ

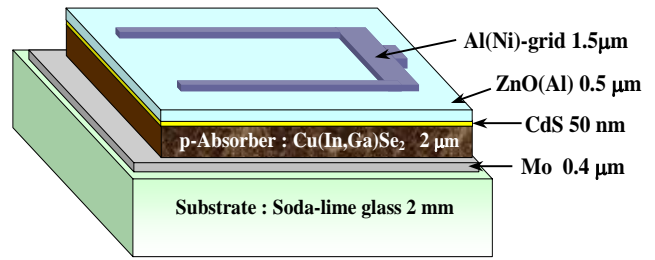
สารประกอบซัลโคไฟไรต์ (chalcopyrite compound) $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ เป็นสารกึ่งตัวนำที่สามารถปรับค่าช่องว่างแถบพลังงานได้ตั้งแต่ 1.04 eV ($CuInSe_2$) จนถึง 1.68 eV ($CuGaSe_2$) ซึ่งมีศักยภาพสูงในการพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่มีประสิทธิภาพสูงได้ (มากกว่า 20% ในงานวิจัยระดับห้องปฏิบัติการ) [1] เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง มีขนาดช่องว่างแถบพลังงานที่สอดคล้องกับสเปกตรัมของแสงแดด สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงใกล้ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าสูงมาก ดังนั้นการใช้ฟิล์มบางของสารเหล่านี้ด้วยความหนาเพียง 2-3 ไมครอนก็เพียงพอที่จะดูดกลืนแสงในช่วงสเปกตรัมของแสงแดดได้เกือบหมด ทำให้สามารถนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่บางมากได้โดยไม่สิ้นเปลืองสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นการวิจัยประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่มี CIGS เป็นชั้นดูดกลืนแสงจึงเป็นโอกาสดีที่จะสามารถพัฒนาความรู้และเทคโนโลยีขึ้นเองภายในประเทศ

เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าชั้นฟิล์มบาง CIGS เป็นชั้นที่มีความสำคัญที่สุดในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ โดยสัดส่วนของจำนวนอะตอม $[Cu]/([In]+[Ga])$ และ $[Ga]/([In]+[Ga])$ มีบทบาทมากต่อประสิทธิภาพของเซลล์ คือ สัดส่วนอะตอม $[Ga]/([In]+[Ga])$ จะกำหนดค่าความกว้างแถบพลังงาน และสัดส่วนอะตอม $[Cu]/([In]+[Ga])$ จะกำหนดความสมบูรณ์ของฟิล์มที่เหมาะสมกับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นการควบคุมให้ได้ฟิล์มที่มีองค์ประกอบตามต้องการ จึงนับเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญ ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนากระบวนการเตรียมฟิล์ม CIGS ร่วมกับการใช้สัญญาณ ณ เวลาจริง เพื่อควบคุมความหนาและองค์ประกอบของฟิล์มได้ตามต้องการ

2. โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS

โครงสร้างสิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ CIGS ที่ได้รับการพัฒนามาถึงขณะนี้ เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยฟิล์มบางของสารชนิดต่างๆ 5 ชนิด เคลือบซ้อนทับกันบนกระจก soda-lime ความหนา 2 มม. พื้นที่ 5x6 ตร.ซม. ดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยชั้นล่างสุดเป็นฟิล์มโลหะโมลิบดีนัม (Mo) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มิกทางด้านหลัง (back electrode) ถัดขึ้นมาเป็นชั้นที่สำคัญที่สุด คือชั้นดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นฟิล์มบางของ $Cu(In,Ga)Se_2$ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) ในชั้นดูดกลืนแสงนี้โฟตอนจากแสงอาทิตย์จะถูกดูดกลืนพร้อมกับมีพาหะนำไฟฟ้าเกิดขึ้น การแยกและผลักดันพาหะที่เกิดขึ้นในชั้นนี้สามารถทำได้ด้วยการประดิษฐ์รอยต่อ (junction) ในชั้นถัดขึ้นไปเหนือชั้นดูดกลืนแสง สำหรับฟิล์มบางที่สร้างรอยต่อกับชั้นของ CIGS ที่เหมาะสมนั้น เป็นฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) คือชั้นฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) และชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำโปรงใสนำไฟฟ้าได้ซึ่งคือออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม (aluminium doped zinc oxide, $ZnO(Al)$) ทำให้เกิดรอยต่อแบบเฮเทอโร (heterojunction) และยังทำหน้าที่เป็นชั้นหน้าต่าง (window layer) ที่ยอมให้แสงทะลุผ่านไปยังชั้นดูดกลืนแสง ส่วนชั้นบนสุดจะเป็นชั้นฟิล์ม

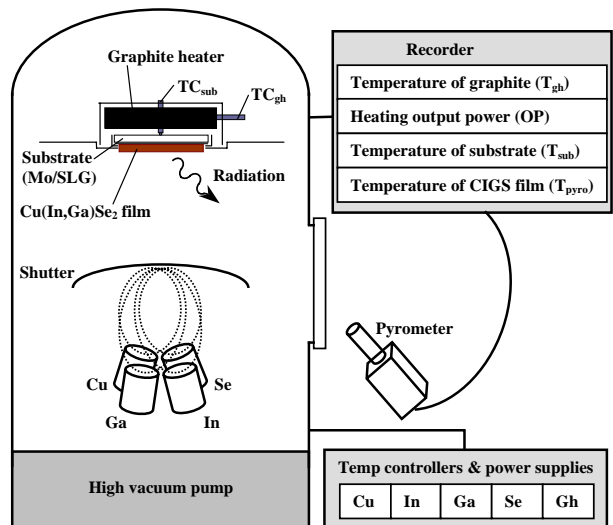
บางโลหะอลูมิเนียมกับนิกเกิล ($NiAl$) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหน้า (front electrode)



รูปที่ 1 โครงสร้างมาตรฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ CIGS

3. ระบบเตรียมฟิล์มบาง CIGS โดยวิธีการระเหยร่วม

รูปที่ 2 แสดงระบบเตรียมฟิล์มบาง CIGS ภายในระบบสุญญากาศ มีความดันในระดับ 10^{-6} มิลลิบาร์ ประกอบด้วยแหล่งระเหยธาตุที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ 4 แหล่งใช้ระเหยธาตุ Cu, In, Ga และ Se และแกรไฟต์ฮีตเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งให้ความร้อนแก่แผ่นรองรับ แหล่งระเหยธาตุทั้ง 4 แหล่ง รวมทั้งแกรไฟต์ฮีตเตอร์ สามารถควบคุมอุณหภูมิแยกเป็นอิสระจากกันด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) เพื่อให้อุณหภูมิของแหล่งระเหยที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิลเป็นไปตามโปรไฟล์อุณหภูมิที่ตั้งไว้ แผ่นรองรับได้รับความร้อนผ่านทางแกรไฟต์ฮีตเตอร์ โดยมีเทอร์โมคัปเปิลแบบสัมผัสโดยตรง (in contact) ติดอยู่กับแกรไฟต์ฮีตเตอร์และด้านหลังของแผ่นรองรับ อุณหภูมิแกรไฟต์ฮีตเตอร์ (T_{gh}) จะถูกรักษาให้คงที่จากการป้อนกำลังไฟฟ้า (output power, OP) ของระบบควบคุมอุณหภูมิ รั้งสีความร้อนที่แผ่จากผิวหน้าของฟิล์ม CIGS (T_{pyro}) จะถูกวัดด้วยไพโรมิเตอร์ ความละเอียดสูงที่มีหัววัดเป็นสาร $InGaAs$ ตลอดช่วงเวลาที่ปลูกฟิล์ม อุณหภูมิแผ่นรองรับ (T_{sub}), T_{gh} , OP, T_{pyro} จะถูกตรวจวัดพร้อมๆกัน และใช้กำหนดจุดสิ้นสุดของกระบวนการ

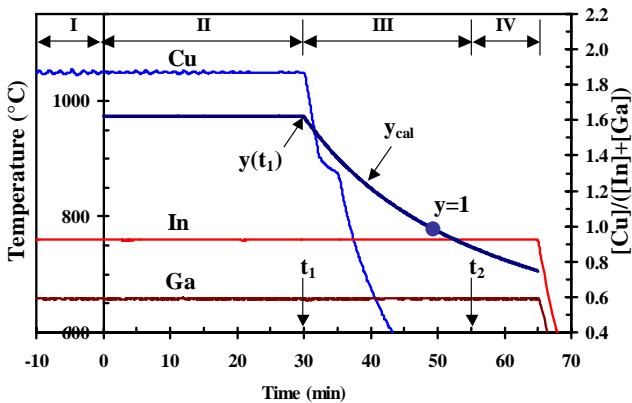


รูปที่ 2 ระบบเตรียมฟิล์มบาง CIGS [2]

4. วิธีการทดลอง

4.1 การเตรียมฟิล์มบาง CIGS โดยกระบวนการ 2 ขั้นตอน

ฟิล์มบาง $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ มีองค์ประกอบทางเคมีที่นิยามได้เป็นอัตราส่วนอะตอม $y = [Cu]/([In]+[Ga])$ และอัตราส่วนอะตอม $x = [Ga]/([In]+[Ga])$ อัตราส่วน x, y นี้จะเป็นตัวกำหนดองค์ประกอบของฟิล์มที่เตรียมได้



รูปที่ 3 โปรไฟล์อุณหภูมิของ Cu, In, Ga และอัตราส่วน y ที่ได้จากการคำนวณ (y_{cal})

รูปที่ 3 โปรไฟล์อุณหภูมิของ Cu, In, Ga และอัตราส่วน y สัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ปลูกฟิล์ม (t) ดังสมการ [3]

$$y_{cal}(t) = \frac{y(t_1)}{t} \cdot t_1 \quad ; t \geq t_1 \quad (1)$$

ในการเตรียมฟิล์ม CIGS แบบกระบวนการ 2 ขั้นตอนนี้ อุณหภูมิของแผ่นรองรับ และแหล่งระเหยธาตุ Se คงที่ที่ $500^\circ C$ และ $260^\circ C$ ตามลำดับ อุณหภูมิของแหล่งระเหยธาตุอื่นจะถูกกำหนดเพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีความหนาประมาณ 3 ไมครอน ภายในระยะเวลาปลูกฟิล์ม 65 นาที เราสามารถแบ่งช่วงเวลาของการปลูกฟิล์มได้เป็น 4 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 เป็นเวลาก่อนเปิดชัทเตอร์ ($t < 0$) ช่วงที่ 2 เป็นช่วงเวลาที่ฟิล์มมีองค์ประกอบเป็น Cu-rich ($y > 1$) หมายถึงอัตราการเคลือบฟิล์มบางของ Cu มากกว่า In รวมกับ Ga เพื่อให้ฟิล์มบาง CIGS มีลักษณะของเกรนเป็นแท่งใหญ่ที่เรียกว่า columnar grain ซึ่งทำให้ฟิล์ม CIGS ที่ได้มีสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี คือ พหุขั้วน้อยมีช่วงชีวิตยาว และเคลื่อนที่ผ่านชั้นต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ได้สะดวก ช่วงที่ 3 ตั้งแต่เวลา t_1 ซึ่งเป็นเวลาที่หยุดระเหยธาตุ Cu ในช่วงนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงค่า y จาก Cu-rich ไปสู่จุด EPD ซึ่งเป็นจุดที่ $y \approx 0.9$ และช่วงที่ 4 จะเป็นช่วงของ Cu-poor ที่มี $y < 0.9$ และสัญญาณควบคุมทั้งหมดคงที่

4.2 การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS

หลังจากที่เตรียมฟิล์ม CIGS บนแผ่นรองรับกระจกที่เคลือบฟิล์ม Mo ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริง จะเข้าสู่ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง CdS หนาประมาณ 50-80 นาโนเมตร โดยวิธีการเคลือบด้วยอ่างสารเคมี (chemical bath deposition; CBD) แล้วเคลือบทับด้วยชั้นของ

ฟิล์มบางสารประกอบ ZnO(AI) ความหนา 500 นาโนเมตร โดยวิธีอาร์-เอฟแมกนีตรอนสเปคโตรริง ส่วนชั้นบนสุดจะเป็นขั้วโลหะ (Ni)Al หนาประมาณ 1.5 ไมครอน เคลือบโดยวิธีการระเหยในสุญญากาศ

เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง (Ni)Al/CdS/ZnO(AI)/CIGS/Mo/SLG บนพื้นที่ 5x6 ตร.ซม. ที่ได้จากกระบวนการข้างต้นจะถูกแบ่งเป็นเซลล์ย่อยที่มีพื้นที่ 0.5x1.0 ตร.ซม. ดังนั้นบนแผ่นรองรับ 1 แผ่น จะประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ประมาณ 40 เซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 4



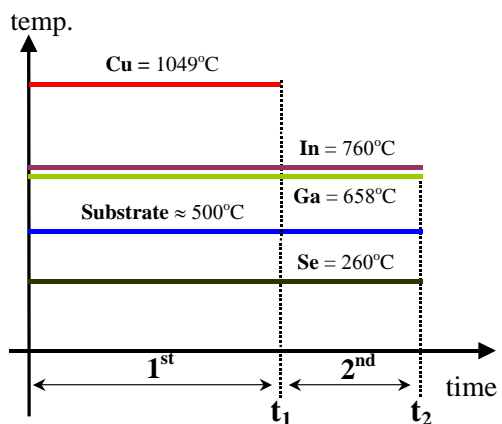
รูปที่ 4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS ประกอบด้วยเซลล์ย่อยพื้นที่ 0.5x1.0 ตร.ซม. ประมาณ 40 เซลล์

เซลล์แสงอาทิตย์ CIGS ที่ประดิษฐ์ขึ้นจะถูกวัดและวิเคราะห์ประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (quantum efficiency, QE) และวิเคราะห์พารามิเตอร์ของเซลล์เพื่อหาประสิทธิภาพจากการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ (current-voltage measurement) ร่วมกับระบบแสงแดดจำลอง (solar simulator: YSS-80) ที่ให้สเปกตรัมของแสงเทียบเท่า A.M 1.5 ความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์/ตร.ซม. มีความสม่ำเสมอบนพื้นที่ 8x8 ตร.ซม. วัดที่อุณหภูมิ $25^\circ C$

5. ผลการทดลอง

ตาราง 1 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม CIGS ด้วยกระบวนการ 2 ขั้นตอน

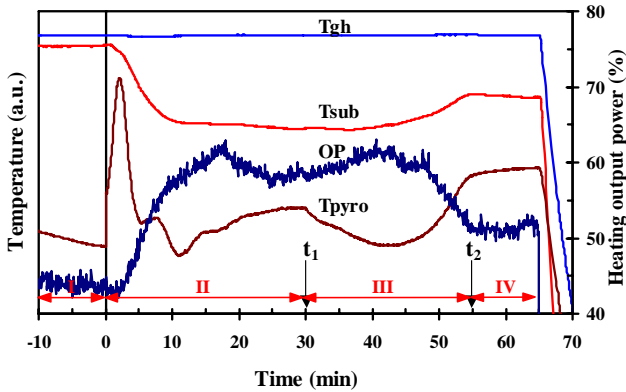
เงื่อนไขของการปลูกฟิล์ม CIGS	
ความหนาฟิล์ม	ประมาณ 2 ไมครอน
ระยะเวลา t_1	30 นาที
ระยะเวลา t_2	55 นาที
อัตราส่วน y ที่ t_2	0.9
อัตราส่วน x	0.3 : $CuIn_{0.7}Ga_{0.3}Se_2$



รูปที่ 5 โปรไฟล์อุณหภูมิของแหล่งระเหยธาตุ Cu, In, Ga, Se

และแผ่นรองรับ

สัญญาณตรวจวัด ณ เวลาจริงของโปรไฟล์อุณหภูมิ (รูปที่ 5)
แสดงได้ดังรูปที่ 6



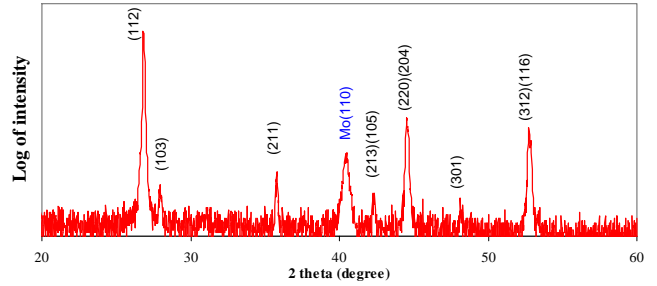
รูปที่ 6 สัญญาณตรวจวัด ณ เวลาจริงของโปรไฟล์อุณหภูมิในรูปที่ 5

ที่เวลา $t < 0$ สัญญาณทั้งหมดที่ตรวจวัดได้เข้าสู่สภาวะคงตัวก่อนการเตรียมฟิล์ม เมื่อเริ่มต้นเตรียมฟิล์มที่เวลา $t = 0$ สัญญาณ T_{pyro} , T_{sub} และ OP มีการเปลี่ยนแปลงเทียบกับสัญญาณ T_{gh} ที่ถูกควบคุมให้คงที่ โดยสัญญาณ T_{pyro} มีการแกว่งขึ้นลงเนื่องจากความหนาฟิล์มที่เพิ่มขึ้นในช่วงต้น เมื่อเวลาผ่านไปฟิล์ม Cu-rich มีความหนาเพิ่มขึ้นและเข้าสู่สภาวะคงตัว ทั้ง T_{pyro} และ T_{sub} เริ่มปรับลดเข้าสู่ระดับคงตัว โดยในขณะเดียวกัน OP จะปรับระดับเพิ่มขึ้นเพื่อชดเชยปริมาณความร้อนที่แผ่ออกไป

ที่เวลา t_1 (ฟิล์มยังมีค่า $y = 1.6$) เมื่อปิดแหล่งระเหยธาตุ Cu (โดยยังคงเตรียมฟิล์มต่อไป) อุณหภูมิผิวหน้าของฟิล์มจะลดลงทันที (T_{pyro} ที่ลดลงเป็นผลกระทบจากการปิดแหล่งระเหยธาตุ Cu) ทำให้ OP สูงขึ้นเพื่อรักษาอุณหภูมิแผ่นรองรับให้คงที่ เมื่อฟิล์มที่เตรียมมีค่า y ลดลงจนถึงจุดที่ $y \approx 1.1$ สัญญาณทั้งหมดจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวอีกครั้ง จนกระทั่งเมื่อฟิล์มผ่านจุดที่ $y = 1$ และเริ่มเข้าสู่ Cu-poor (ฟิล์ม Cu-rich จะมีค่า emissivity ในย่านอินฟราเรดสูงกว่าฟิล์ม Cu-poor) ฟิล์มจะแผ่รังสีความร้อนได้น้อย อุณหภูมิแผ่นรองรับจะสูงขึ้น (T_{pyro} สูงขึ้น) และ OP จะลดลงเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่ สัญญาณตรวจวัด ณ เวลาจริงทั้งหมดแสดงจุดสิ้นสุด EPD ที่จุดเดียวกัน ยกเว้น OP ที่มีความช้าของสัญญาณเล็กน้อยเนื่องจากเกรตฟิตีเตอร์มีมวลมาก

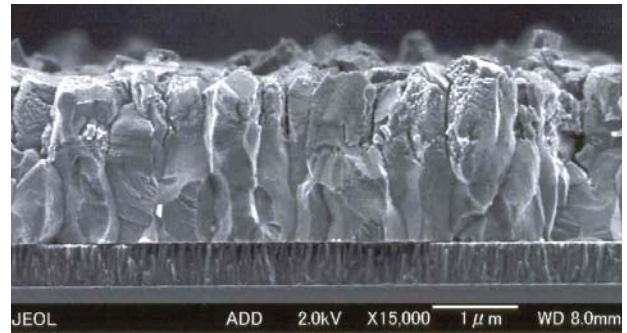
สำหรับฟิล์ม CIGS ที่เตรียมได้ ณ จุดสิ้นสุดนี้ถูกวิเคราะห์หาสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบโดยเฉลี่ยด้วยวิธีสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอ็กซ์ (energy dispersive X-ray spectrometer: EDS) พบว่าฟิล์มที่จุด EPD นี้มีค่า $y \approx 0.9$ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมกับการนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ และผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) (รูปที่ 7) แสดงว่าเป็นฟิล์มที่มีความเป็นผลึกค่อนข้างสูงและมีเฟสเดียว คือมีโครงสร้างแบบซาลโคไฟไรท์ เฟสอัลฟา (α -phase) ยอดแหลม (112) มีลักษณะเด่นและความเข้มสูง ลักษณะนี้เป็นการเรียงตัวของโครงผลึกแบบที่มีระนาบ (112) ขนานกับระนาบของแผ่นรองรับ ((112) preferred orientation) มีแนวโน้มที่จะสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงได้

สาขาพลังงานทดแทน



รูปที่ 7 แพทเทิร์นการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง CIGS

ผลการตรวจสอบลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางของโครงผลึกของฟิล์มบาง CIGS โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (รูปที่ 8) พบว่ามีผิวหน้าขรุขระ มีโครงผลึกเป็นแท่งเกรน (columnar grain) ขนาดใหญ่ก่อตัวแน่นอนต่อเนื่องจากผิวฟิล์ม Mo บนแผ่นรองรับกระจก โดยปราศจากช่องว่างที่ตอนล่างของฟิล์ม แต่ปรากฏรอยแยกเล็กจากผิวบนตามขอบของแท่งเกรน



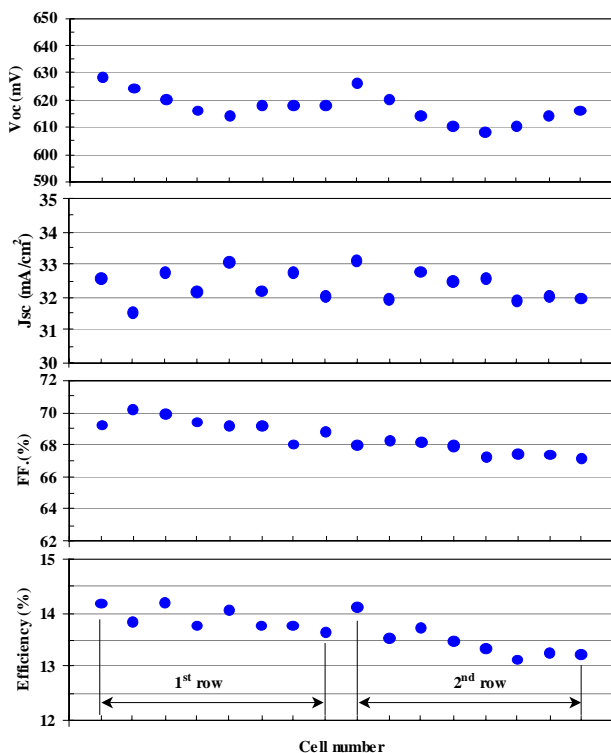
รูปที่ 8 ภาพภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CIGS

ฟิล์ม CIGS ที่มีสัดส่วน $x = 0.3$ ที่เตรียมได้เมื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์และวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของเซลล์ย่อย 16 เซลล์ พบว่ามีการกระจายของค่าพารามิเตอร์ (แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด: V_{oc} , ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร: J_{sc} , ฟิลแฟคเตอร์: FF , ประสิทธิภาพ: Eff) ของ 16 เซลล์ย่อยใกล้เคียงกัน (รูปที่ 9) และมีค่าประสิทธิภาพของเซลล์สูงถึง 14.2% (รูปที่ 10)

ตารางที่ 2 แสดงผลเชิงสถิติของค่าพารามิเตอร์จากเซลล์ย่อย โดยเซลล์แสงอาทิตย์เหล่านี้มีประสิทธิภาพเฉลี่ย 13.7% ค่าเบี่ยงเบน 0.3% บนพื้นที่ 3×5 ตร.ซม. แสดงว่าฟิล์ม CIGS โดยรวมมีคุณภาพสูง และมีความสม่ำเสมออยู่ในระดับหนึ่งตามขนาดของระบบที่เล็กเกินไป

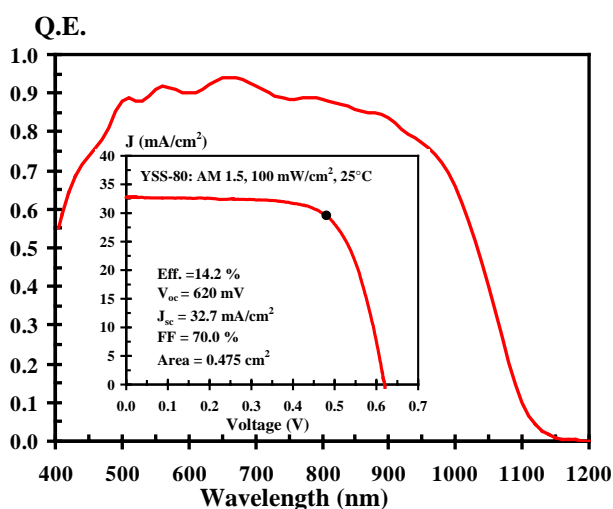
ตารางที่ 2 ผลเชิงสถิติของค่าพารามิเตอร์จากจำนวน 16 เซลล์ย่อย (แสดงการกระจายในรูปที่ 9)

	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF (%)	Eff (%)
ค่าสูงสุด	628	33.1	70.2	14.2
ค่าต่ำสุด	608	31.5	67.2	13.1
ค่าเฉลี่ย	617	32.4	68.5	13.7
ค่าเบี่ยงเบน	5.7	0.5	1.0	0.3



รูปที่ 9 การกระจายพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ 16 เซลล์ย่อย

ผลการวัดประสิทธิภาพเชิงควอนตัมของเซลล์ย่อยที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (รูปที่ 10) แสดงถึงชั้นฟิล์ม CIGS มีการตอบสนองทางแสงที่ดีในช่วงความยาวคลื่น 500-1000 nm โดยสามารถจ่ายกระแส ไฟฟ้าออกสู่วงจรไฟฟ้าภายนอกได้มากตามปริมาณของพาหะที่เกิดขึ้นจากการรับแสง ซึ่งสอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของเซลล์ที่แสดงไว้และอยู่ในระดับเดียวกันกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงชนิดอื่น



รูปที่ 10 ผลการวัดประสิทธิภาพเชิงควอนตัม และลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ของเซลล์ย่อยที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

6. สรุป

จากการเตรียมฟิล์มบาง CIGS โดยวิธีระเหยร่วมกันจากแหล่งระเหยธาตุ 4 แหล่งในกระบวนการ 2 ขั้นตอนที่ใช้สัญญาณตรงจวัด ณ เวลาจริง T_{pyro} , T_{sub} , OP ควบคุมกระบวนการและชี้จุดสิ้นสุดที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ทำให้สามารถเตรียมฟิล์มบาง $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ ที่มีความหนา อัตราส่วนอะตอม $[Cu]/([In]+[Ga])$ และ $[Ga]/([In]+[Ga])$ ตามต้องการได้ โดยฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นมีอัตราส่วนอะตอม $[Cu]/([In]+[Ga]) \approx 0.9$ และสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ตามโครงสร้าง $(Ni)Al/ZnO(Al)/CdS/Cu(In,Ga)Se_2/Mo/SLG$ ที่มีประสิทธิภาพสูงถึง 14.2% (แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด 0.62 โวลต์ ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร 32.7 มิลลิแอมป์/ตร.ซม. ฟิลแฟคเตอร์ 70% ไม่มีชั้นป้องกันแสงสะท้อนกลับ)

จากการพัฒนาระบบเตรียมฟิล์มและเทคนิคต่างๆ ตลอดจนความเข้าใจถึงกลไกการเกิดฟิล์ม CIGS ที่มีสมบัติเหมาะสมทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง ทำให้งานวิจัยนี้เป็นจุดเริ่มต้นที่มีศักยภาพสูงและสามารถขยายขนาดไปสู่ขั้นตอนการผลิตในเชิงพาณิชย์ต่อไปได้

7. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ รหัสโครงการ MT-B-35-CER-09-035-G

เอกสารอ้างอิง

- Contreras, M. A., Egaas, B., Ramanathan, K., Hiltner, J., Schwartzlander, A., Hasoon, F., and Noufi, R. "Progress Towards 20% Efficiency in $Cu(In,Ga)Se_2$ Polycrystalline Thin-Film Solar Cells," Prog. Photovolt., Res. Appl. Vol. 7, No. 4, 1999, pp. 311-316.
- Chityuttakan, C., Chinvetkitvanich, P., Yoodee, K., and Chatraphorn, S. "in situ Monitoring of the Growth of $Cu(In,Ga)Se_2$ Thin Films," Technical Digest of the International PVSEC-14, Bangkok, 2004, pp. 523-524.
- Chityuttakan, C. "Fabrication of $Cu(In,Ga)Se_2$ Thin Films for High Efficiency Solar Cells," Ph.D. Dissertation, Chulalongkorn University (2004).