

การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ โดยใช้ระบบการระเหยด้วยลำโมเลกุล

ปณิตา ชินเวชกิจวานิชย์¹

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

ชาญวิทย์ จิตยุทธการ² และ สมพงษ์ จิตรภรณ์²

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

บทคัดย่อ

ฟิล์มบางพหุผลึก $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ถูกเตรียมด้วยระบบการระเหยด้วยลำโมเลกุลร่วมกับการใช้เทคนิคการตรวจวัดสัญญาณ ณ เวลาจริง เพื่อใช้ควบคุมกระบวนการและชี้จุดสิ้นสุด ในกระบวนการปลูกฟิล์มได้ใช้โปรไฟล์อุณหภูมิ 2 แบบ คือ แบบสองขั้นตอน และแบบสามขั้นตอน ผลจากการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ไฟฟ้า พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ที่ใช้โปรไฟล์อุณหภูมิแบบสองขั้นตอน มีประสิทธิภาพสูงถึง 11% (ที่ค่า $x \sim 0.3$) และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงเมื่อ $x > 0.5$ ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ที่ใช้โปรไฟล์อุณหภูมิแบบสามขั้นตอน จะให้ประสิทธิภาพสูงถึง 15.3% (ที่ค่า $x \sim 0.3$) และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ค่า $x > 0.5$ ยังคงสูงเมื่อใช้โปรไฟล์อุณหภูมิแบบสามขั้นตอนในกระบวนการปลูกฟิล์ม

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์ / พหุผลึก / ฟิล์มบาง / ประสิทธิภาพ / โปรไฟล์อุณหภูมิ

¹ อาจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์

² นักวิจัย ห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์

Fabrication of $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ Thin Film Solar Cells using Molecular Beam Epitaxy System

Panita Chinvetkitvanich ¹,

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Chanwit Chityuttakan ², and Somphong Chatraphorn ²

Chulalongkorn University, Phayathai, Phatumwan, Bangkok, 10330

Abstract

The $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ polycrystalline thin films were fabricated using the molecular beam epitaxy (MBE) system. The in situ monitoring technique was employed for process control and end-point detection (EPD). Two temperature profiles; the two-stage and the three-stage processes were performed in the growth process. From the current-voltage (I-V) measurement, the $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ thin film solar cells, fabricated with the two-stage process yielded efficiencies 11% ($x\sim 0.3$) and the efficiencies decrease for wide band gap $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ($x>0.5$) films. The $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ thin film solar cells fabricated using the three-stage process, showed the efficiency up to 15.3% ($x\sim 0.3$). The cell performance of the wide band gap $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ($x>0.5$) solar cells is also improved by the three-stage process.

Keywords : Solar Cell / Polycrystalline / Thin Film / Efficiency / Temperature Profile

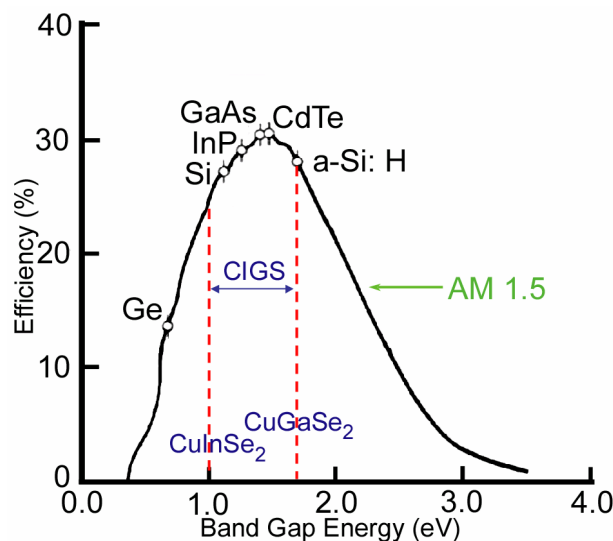
¹ Lecturer, Department of Physics.

² Researcher, Semiconductor Physics Research Laboratory (SPRL).

1. บทนำ

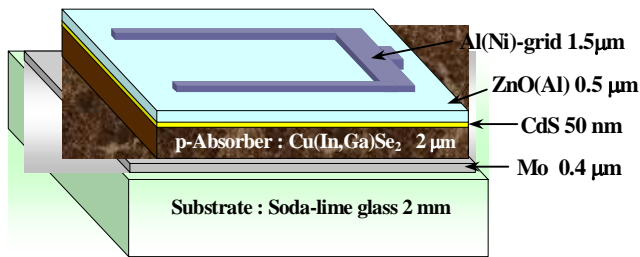
สารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมเทลลูไรด์ $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ เป็นสารประกอบซัลโคไฟไรท์ที่สามารถปรับค่าความกว้างช่องว่างแถบพลังงาน (Energy band gap : E_g) ได้ตั้งแต่ 1.04 eV ($x=0$: CuInSe_2) ถึง 1.68 eV ($x=1$: CuGaSe_2) [1] และเนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap) มีขนาดช่องว่างแถบพลังงานสอดคล้องกับสเปกตรัมแสงแดด สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงใกล้ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าสูง ดังนั้นความหนาของชั้นดูดกลืนแสง $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ 2-3 ไมโครเมตรก็เพียงพอที่จะดูดกลืนแสงในช่วงสเปกตรัมของแสงแดดได้เกือบหมด ทำให้ $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ เป็นสารประกอบที่มีศักยภาพสูงในการพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า 20% ได้ [2-3] ซึ่งเป็นระดับที่เทียบได้กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์จากผลึกเดี่ยวซิลิกอน โดยเฉพาะ CuGaSe_2 มีสมบัติเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้เป็น

เซลล์ชั้นบนสุดของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างทันเดม [4] ชั้นฟิล์มบาง $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ เป็นชั้นที่มีความสำคัญที่สุดในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ โดยอัตราส่วนอะตอม $[\text{Cu}]/([\text{In}]+[\text{Ga}])$ (ค่า y) และ $[\text{Ga}]/([\text{In}]+[\text{Ga}])$ (ค่า x) มีบทบาทมากต่อประสิทธิภาพของเซลล์ โดยพบว่าค่า x จะเป็นตัวกำหนดค่า E_g ในขณะที่ค่า y จะกำหนดความสมบูรณ์ของฟิล์ม จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเดียวที่ได้จากการคำนวณเชิงทฤษฎีกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆที่ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงดังแสดงในรูปที่ 1 จะเห็นว่าสารประกอบกึ่งตัวนำ $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ สามารถถูกปรับเปลี่ยนค่าช่องว่างแถบพลังงาน (โดยการปรับค่า x) เพื่อให้ได้ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่เหมาะสมกับการทำเป็นชั้นดูดกลืนแสงเพื่อให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงได้ ดังนั้นการปลูกฟิล์มให้ได้อัตราส่วนอะตอมตามที่ต้องการจึงเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญ

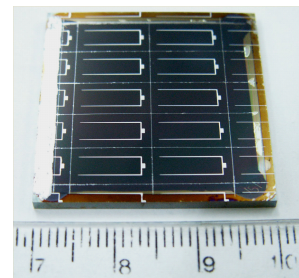


รูปที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อเดียวที่ได้จากการคำนวณเชิงทฤษฎีกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ [7]

ดังได้กล่าวข้างต้นแล้วว่าชั้นดูดกลืนแสงนับเป็นชั้นที่สำคัญที่สุดต่อประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์ การที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ได้นั้นจะมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานสูงหรือไม่ จะขึ้นกับคุณภาพของชั้นดูดกลืนแสงเป็นหลัก พารามิเตอร์ที่สำคัญในกระบวนการปลูกฟิล์ม $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ที่ส่งผลต่อความสมบูรณ์ และลักษณะเชิงโครงสร้างของฟิล์ม คืออุณหภูมิที่ใช้ขณะปลูกฟิล์ม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะนำเสนอผลเปรียบเทียบของการใช้โปรไฟล์อุณหภูมิที่ใช้ขณะปลูกฟิล์มแตกต่างกัน คือแบบสองขั้นตอน [5] และแบบสามขั้นตอน [6] ซึ่งเป็นรูปแบบการปลูกฟิล์ม $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ที่ถูกพัฒนาและนิยมใช้กันในหลายกลุ่มวิจัย โดยอาจจะมียุทธศาสตร์ที่แตกต่างกันบ้าง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำเสนอผลที่มีต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นสำคัญ



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 (ก) โครงสร้างมาตรฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (ข) ภาพถ่ายแสดงเซลล์แสงอาทิตย์ $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ประกอบด้วยเซลล์ย่อย พื้นที่ 0.5×1.0 ตร.ซม. จำนวน 10 เซลล์

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ประกอบด้วยชั้นล่างสุดเป็นฟิล์มโลหะ โมลิบดีนัม (Mo) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลัง (back electrode) ถัดขึ้นมาเป็นชั้นที่สำคัญที่สุด คือชั้นดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ฟิล์มบาง $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) ในชั้นดูดกลืนแสงนี้โฟตอนจากแสงอาทิตย์จะถูกดูดกลืนพร้อมกับมีพาหะนำไฟฟ้าเกิดขึ้น การแยกและผลักดันพาหะที่เกิดขึ้นในชั้นนี้สามารถทำได้ด้วยการประจันรอยต่อ (junction) ในชั้นถัดขึ้นไปเหนือชั้นดูดกลืนแสง สำหรับฟิล์มบางที่สร้างรอยต่อกับชั้นของ $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ที่เหมาะสมนั้น เป็นฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

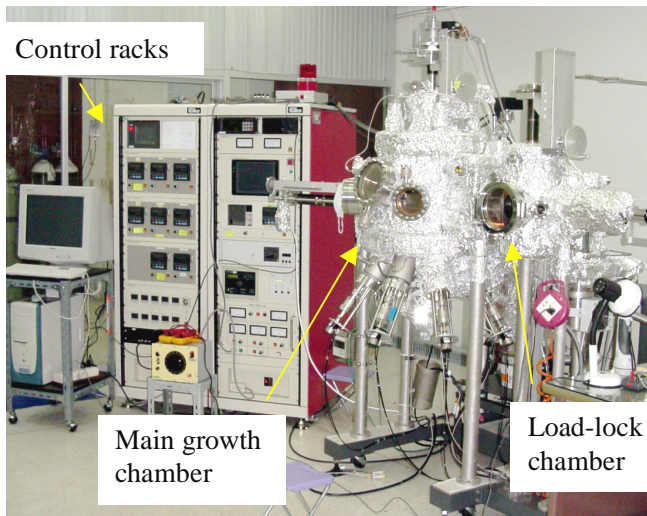
2. ทฤษฎี

2.1 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$

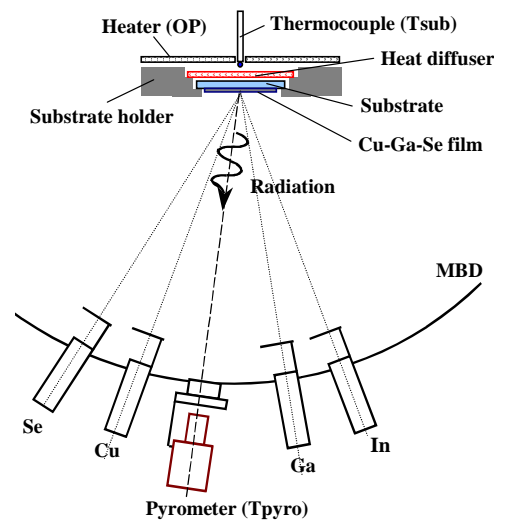
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยฟิล์มบางของสารประกอบต่างๆ 5 ชนิด เคลือบซ้อนทับกันบนวัสดุรองรับกระจก soda-lime ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้กระจก soda-lime ความหนา 2 มม. พื้นที่ 3×3 ตร.ซม. รูปที่ 2 (ก) แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ และรูปที่ 2 (ข) แสดงภาพถ่ายเซลล์ย่อยบนแผ่นรองรับพื้นที่ 3×3 ตร.ซม.

ชนิดเอ็น (n-type semiconductor) คือชั้นแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) และชั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม (aluminium doped zinc oxide, ZnO(Al)) ทำให้เกิดรอยต่อแบบเฮเทอโร (heterojunction) และยังทำหน้าที่เป็นชั้นหน้าต่าง (window layer) ที่ยอมให้แสงทะลุผ่านไปยังชั้นดูดกลืนแสง ส่วนชั้นบนสุดจะเป็นชั้นฟิล์มบางโลหะอะลูมิเนียมกับนิกเกิล (Ni)Al ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหน้า (front electrode)

2.2 ระบบเตรียมฟิล์ม $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ โดยการระเหยด้วยลำโมเลกุล



(ก)



(ข)

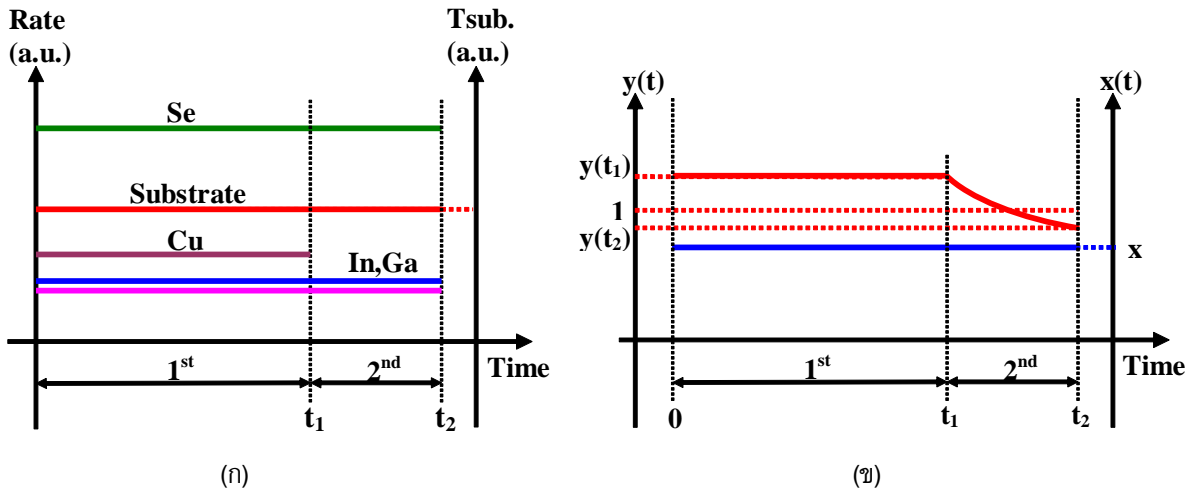
รูปที่ 3 (ก) ภาพถ่ายระบบการระเหยด้วยลำโมเลกุล Molecular beam epitaxy system และ (ข) โครงสร้างภายในภาชนะสุญญากาศ Tsub, Tpyro และ OP จะใช้เป็นสัญญาณตรวจวัด ณ เวลาจริง

รูปที่ 3 (ก) แสดงระบบ Molecular Beam Epitaxy System (MBE) ที่ใช้เตรียมฟิล์มบาง $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ที่มีความดันในระบบ ~10-10 ทอรร ภายในระบบประกอบด้วยแหล่งระเหยธาตุ 4 แหล่งที่สามารถควบคุมอุณหภูมิแยกเป็นอิสระจากกัน ใช้ระเหยธาตุทองแดง (Cu), ธาตุอินเดียม (In), ธาตุแกลเลียม (Ga) และธาตุซีลีเนียม (Se) อุณหภูมิของแผ่นรองรับ (Tsub) จะถูกรักษาให้คงที่จากการป้อนกำลังไฟฟ้า (output power ; OP) ของระบบควบคุมอุณหภูมิ รั้งความร้อนที่แผ่ออกมาจากผิวหน้าฟิล์ม (Tpyro) จะถูกวัดด้วยไพโรมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3(ข) ระหว่างกระบวนการปลูกฟิล์ม อุณหภูมิและกำลังไฟฟ้าของระบบควบคุมอุณหภูมิของแผ่นรองรับ รวมทั้งอุณหภูมิผิวหน้าของฟิล์ม

จะถูกตรวจวัดพร้อมๆ กัน จากการตรวจวัดสัญญาณ ณ เวลาจริง (in situ monitoring) และใช้กำหนดจุดสิ้นสุดของกระบวนการปลูก (End-point detection) [8-9] ทำให้สามารถเตรียมฟิล์มบาง $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ที่มีความหนาอยู่ระหว่าง 1.8-2.0 ไมโครเมตร และมีอัตราส่วนอะตอมตามต้องการได้

3. วิธีการทดลอง

3.1 การปลูกฟิล์มด้วยโปรไฟล์อุณหภูมิแบบสองขั้นตอน (Two-stage growth process : Cu-rich/Cu-off)

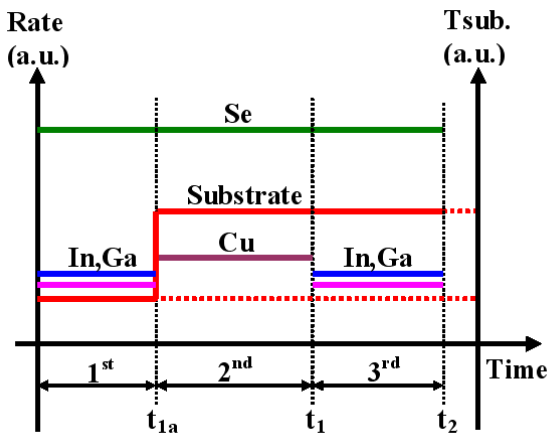


รูปที่ 4 (ก) โปรไฟล์อุณหภูมิ และ (ข) อัตราส่วน $[Cu]/([In]+[Ga])$ จากการคำนวณการปลูกฟิล์ม $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ ด้วยโปรไฟล์อุณหภูมิแบบสองขั้นตอน

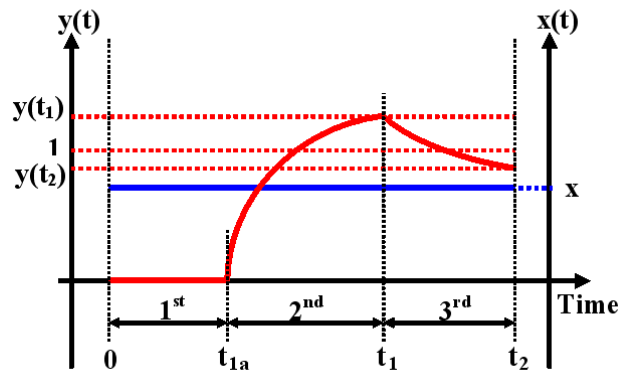
ฟิล์มบาง $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ มีองค์ประกอบทางเคมีที่นิยามได้เป็น อัตราส่วนอะตอม $y = [Cu]/([In]+[Ga])$ และอัตราส่วนอะตอม $x = [Ga]/([In]+[Ga])$ อัตราส่วน x, y นี้จะเป็นตัวกำหนดองค์ประกอบของฟิล์มที่เตรียมได้ รูปที่ 4(ก) และ 4(ข) แสดงโปรไฟล์อุณหภูมิและอัตราส่วนอะตอม y ของการปลูกฟิล์มแบบ 2 ขั้นตอน (Cu-rich / Cu-off) โดยอุณหภูมิแผ่นรองรับจะคงที่ตลอดระยะเวลาปลูกฟิล์ม ช่วงเวลา t_1 เป็นช่วง “Cu-rich” คือฟิล์มมีค่า y มากกว่า 1 ($y(t_1) > 1$) ซึ่งจากการศึกษาพบว่าฟิล์ม $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ ที่ผ่านช่วง Cu-rich จะได้ฟิล์มที่มีโครงสร้างผลึกที่ดี มีลักษณะของเกรนเป็นแท่งใหญ่ (columnar grain) ช่วงเวลา

$t_2 - t_1$ เป็นเวลาที่ปิดแหล่งระเหยธาตุ Cu คือ ช่วง “Cu-off” ในขณะที่ยังคงมีการระเหยของธาตุ In, Ga จากแหล่งระเหยอยู่ ทำให้ในช่วงเวลานี้ ค่า y จะค่อยๆ ลดลง และจะสิ้นสุดกระบวนการปลูกฟิล์มเมื่อ y มีค่าประมาณ 0.9 ($y(t_2) \sim 0.9$) ฟิล์มบาง $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ ที่ปลูกด้วยโปรไฟล์อุณหภูมิแบบสองขั้นตอนนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์และเข้าสู่กระบวนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

3.2 การปลูกฟิล์มด้วยโปรไฟล์อุณหภูมิแบบสามขั้นตอน (Three-stage growth Process : Cu-off / Cu-rich / Cu-off)



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 (ก) โปรไฟล์อุณหภูมิ และ (ข) อัตราส่วน $[Cu]/([In]+[Ga])$ จากการคำนวณการปลูกฟิล์ม $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ ด้วยโปรไฟล์อุณหภูมิแบบ 3 ขั้นตอน

การปลูกฟิล์มแบบ 3 ขั้นตอน (Cu-off/ Cu-rich/ Cu-off) มีโปรไฟล์อุณหภูมิและอัตราส่วน y แสดงในรูปที่ 5 (ก) และรูปที่ 5 (ข) ช่วงเวลา t_{1a} อุณหภูมิแผ่นรองรับจะคงที่ประมาณ $300^\circ C$ และเปิดแหล่งระเหยธาตุ In, Ga โดยยังไม่เปิดแหล่งระเหยธาตุ Cu เรียกช่วงนี้ว่า “Cu-off” ดังนั้นในช่วงนี้ ค่า y เท่ากับศูนย์ ($y(t_{1a}) = 0$) ทันทีที่สิ้นสุดเวลา t_{1a} จะเพิ่มอุณหภูมิแผ่นรองรับให้ได้ $530^\circ C$ พร้อมกับปิดแหล่งระเหยธาตุ In, Ga และเปิดแหล่งระเหย

ธาตุ Cu ในช่วงนี้ ค่า y จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าประมาณ 1.4 ที่เวลา t_1 ($y(t_1) \sim 1.4$) จึงเรียกช่วงนี้ว่า “Cu-rich” หลังจากนั้นในช่วงสุดท้ายจะปิดแหล่งระเหยธาตุ Cu เรียกว่าช่วง “Cu-off” พร้อมกับเปิดแหล่งระเหยธาตุ In, Ga เพื่อให้ค่า y ลดลงจาก 1.4 และจะสิ้นสุดกระบวนการปลูกฟิล์มเมื่อ y มีค่า ~ 0.9 ที่เวลา t_2 ($y(t_2) \sim 0.9$) โดยค่า y สัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ปลูกฟิล์ม (t) ดังสมการ [8]

$$y(t) = \frac{y(t_1 - t_{1a}) \cdot (t_1 - t_{1a})}{t}$$

เมื่อ $t_{1a} \leq t \leq t_1$ (1)

$$y(t) = \frac{y(t_1)}{t} \cdot t_1$$

เมื่อ $t \geq t_1$ (2)

ฟิล์มบาง $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ ที่ปลูกด้วยโปรไฟล์อุณหภูมิแบบสามขั้นตอนนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์ และเข้าสู่กระบวนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

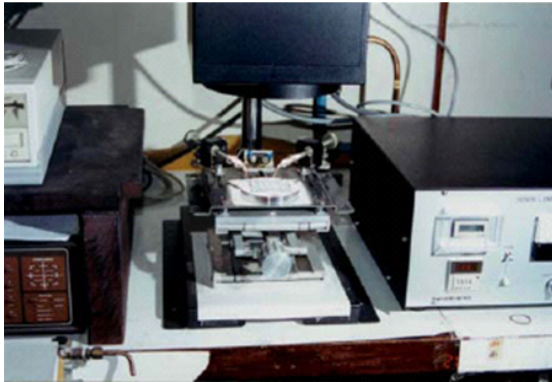
3.3 การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง

แผ่นรองรับที่เคลือบด้วยฟิล์ม Mo เมื่อผ่านการปลูกฟิล์ม $CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ ด้วยโปรไฟล์อุณหภูมิแบบ 2 ขั้นตอน

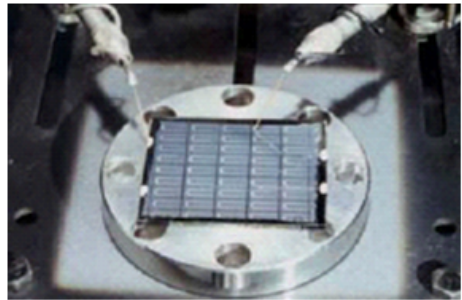
และแบบ 3 ชั้นตอน โดยแปรเปลี่ยนค่า x จาก 0.0 ถึง 1.0 จะถูกนำมาเข้าสู่กระบวนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ คือ การสร้างรอยต่อเฮเทอโรกับชั้นของ CdS และ ZnO(AI) และทำขั้วไฟฟ้าด้านหน้าด้วย (Ni)Al แล้วจะได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่สมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2 (ข) ข้างต้น ในงานวิจัยนี้แผ่นกระจกรองรับพื้นที่ 3×3 ตร.ซม. แต่ละแผ่น (ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ 10 เซลล์) จะมาจากเงื่อนไขการปลูกฟิล์ม $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ที่แตกต่างกัน กล่าวคือ เป็นเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง (Ni)Al/CdS/ZnO(AI)/ $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ /Mo/SLG ที่มีชั้นดูดกลืนแสงอาทิตย์เป็นฟิล์มบาง $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ที่ปลูกโดยใช้โปรไฟล์อุณหภูมิ

แบบ 2 ชั้นตอน และใช้โปรไฟล์อุณหภูมิแบบ 3 ชั้นตอน และแปรค่า x ตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ขึ้นจะถูกวัดและวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อหาประสิทธิภาพของเซลล์ โดยการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ (current-voltage measurement) ร่วมกับระบบแสงแดดจำลอง (solar simulator : YSS-80) ที่ให้สเปกตรัมของแสงเทียบเท่า A.M 1.5 ความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์/ตร.ซม. มีความสม่ำเสมอบนพื้นที่ 8×8 ตร.ซม. วัดที่อุณหภูมิ 25°C ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) และ (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 6 (ก) และ (ข) แสดงรูปถ่ายระบบแสงแดดจำลอง (solar simulator : YSS-80) ขณะทำการวัดลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ในสภาวะฉายแสง

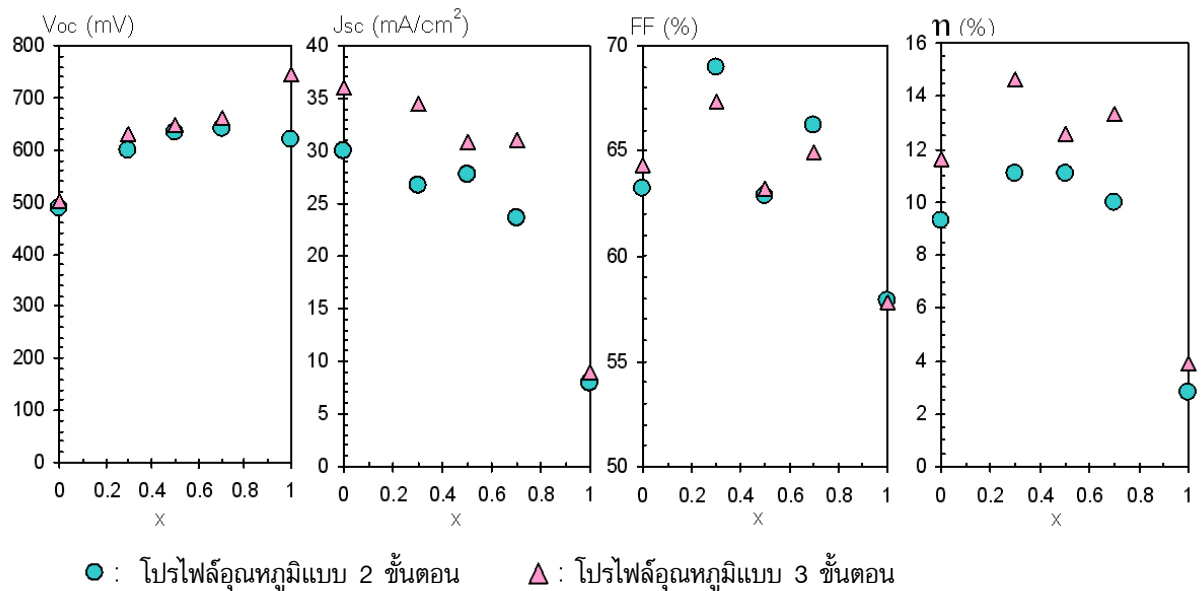
4. ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นดูดกลืนแสงอาทิตย์เป็นฟิล์มบาง $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ที่ใช้โปรไฟล์อุณหภูมิแบบ 2 ชั้นตอน และใช้โปรไฟล์อุณหภูมิแบบ 3 ชั้นตอน และแปรค่า x ตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0 พบว่ามีการกระจายของค่าพารามิเตอร์หลักของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งได้แก่ แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (open circuit voltage ; Voc) ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร (short circuit current density ; Jsc) ฟิลแฟคเตอร์ (fill factor ; FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (efficiency ; η) แสดงดังรูปที่ 7

จากผลการทดลองพบว่าไม่ว่าจะเป็น การปลูกฟิล์มโดยใช้โปรไฟล์อุณหภูมิแบบ 2 ชั้นตอน หรือแบบ 3 ชั้นตอนก็ตาม ค่า x หรือปริมาณอะตอมธาตุ Ga ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ Voc มีค่าสูงขึ้น Jsc มีค่าลดลง ในขณะที่ η เพิ่มขึ้นในช่วงแรกแล้วมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อ x มีค่าสูงกว่า 0.5 และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใส่โปรไฟล์อุณหภูมิแบบ 2 ชั้นตอน กับแบบ 3 ชั้นตอน จะเห็นว่าค่า x จะมีบทบาทต่อค่า Jsc ค่อนข้างชัดเจน ผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเตรียมแบบ 2 ชั้นตอนนั้นเป็นการปลูกฟิล์มโดยเปิดแหล่งระเหยธาตุ Cu ในช่วงแรก (t_1) ของการปลูกฟิล์ม

รวมทั้งอุณหภูมิแผ่นรองรับสูง ทำให้ในช่วงที่สอง (t_2) อะตอมของ Cu ซึ่งเป็นธาตุที่มีความคล่องตัวสูง (high mobility) ที่อยู่บริเวณข้างล่างของฟิล์มจะแพร่ขึ้นมาข้างบนตลอดเวลาทำให้เหลือเป็นที่ว่างสังเกตได้เป็นรอยแยกเล็กที่ขอบเกรนเมื่อวิเคราะห์ฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของพาหะนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นไปได้ยากเมื่อเปรียบเทียบกับกรปลูกฟิล์ม $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ที่ใช้โปรไฟล์อุณหภูมิแบบ 3 ขั้นตอนซึ่งใช้อุณหภูมิแผ่นรองรับ

ในช่วงแรกต่ำกว่า และเปิดแหล่งระเหยธาตุ Cu เฉพาะในช่วงที่ 2 ของกระบวนการปลูก จะให้เกรนที่มีขนาดใหญ่และรอยแยกอยู่ช่วงบนของฟิล์มเท่านั้น [9-10] ด้วยเหตุนี้เมื่อพิจารณาที่ค่า x เดียวกัน การใช้โปรไฟล์อุณหภูมิแบบ 2 ขั้นตอน จะได้ค่า J_{sc} ต่ำกว่าแบบ 3 ขั้นตอนซึ่งส่งผลถึงค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์ที่ใช้โปรไฟล์อุณหภูมิแบบ 2 ขั้นตอนจึงมีค่าต่ำกว่าการใช้โปรไฟล์อุณหภูมิแบบ 3 ขั้นตอน

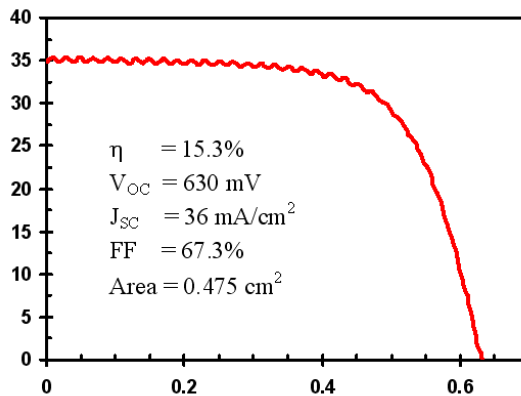


รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ที่ใช้โปรไฟล์อุณหภูมิแบบ 2 ขั้นตอน และแบบ 3 ขั้นตอน โดยแปรค่า x ตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0

เมื่อเปรียบเทียบภาพรวมแล้วจะพบว่าการเตรียมโดยใช้โปรไฟล์อุณหภูมิแบบ 3 ขั้นตอนจะให้ค่าพารามิเตอร์ของเซลล์ดีกว่าการใช้โปรไฟล์อุณหภูมิแบบ 2 ขั้นตอน โดยที่ค่า $x \sim 0.3$ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ทั้งจากการเลือกใช้โปรไฟล์อุณหภูมิแบบ 2 ขั้นตอน หรือแบบ 3 ขั้นตอนจะให้ประสิทธิภาพสูงสุด และเมื่อ $x > 0.3$ มีแนวโน้มว่าประสิทธิภาพจะลดลง ซึ่งได้มีการนำเสนอแบบจำลองเพื่ออธิบายผลการลดลงของประสิทธิภาพของเซลล์เมื่อใช้ปริมาณอะตอมธาตุ Ga จากหลายกลุ่มวิจัยโดยวิเคราะห์ถึงลักษณะความโค้งงอของแถบพลังงานที่เกิดรอยต่อวิวิธพันธ์

ระหว่างชั้น $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ที่มีค่า E_g สูงกับชั้น CdS ($E_g = 2.4$ eV) ลดลง ซึ่งแนวทางที่จะช่วยให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นได้นั้นอาจจะต้องเลือกใช้ชั้นของสารประกอบกึ่งตัวนำ n-type ชนิดอื่นที่มีค่าช่องว่างแถบ พลังงานสูงกว่า CdS ในการสร้างรอยต่อวิวิธพันธ์กับชั้น $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ที่มีค่า x สูง [11-13]

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ที่เตรียมได้นั้นมีประสิทธิภาพสูง 15.3% โดยใช้โปรไฟล์อุณหภูมิแบบ 3 ขั้นตอน มีค่าพารามิเตอร์ของเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์และค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ที่ใช้โพรไฟล์อุณหภูมิแบบ 3 ชั้นตอน

5. สรุป

จากการปลูกฟิล์ม $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ โดยใช้ระบบการระเหยด้วยลำโมเลกุล ร่วมกับการใช้สัญญาณตรงจวัด ณ เวลาจริง Tpyro, Tsub, OP ควบคุมกระบวนการปลูกฟิล์ม ทำให้สามารถปลูกฟิล์ม $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ โดยเลือกใช้โพรไฟล์อุณหภูมิแบบ 2 ชั้นตอน และแบบ 3 ชั้นตอน ที่มีความหนาและองค์ประกอบของฟิล์มตามต้องการ และเมื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง (Ni)Al/ZnO(AI)/CdS/ $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ /Mo/SLG การใช้โพรไฟล์อุณหภูมิแบบ 3 ชั้นตอน จะได้เซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงกว่าแบบ 2 ชั้นตอนโดยมีประสิทธิภาพสูงถึง 15.3% (แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด 0.63 โวลท์ ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร 36 มิลลิแอมป์/ตร.ซม. ฟิลแฟคเตอร์ 67% ไม่มีชั้นป้องกันแสงสะท้อนกลับ)

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยฟิล์มสารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมืออุปกรณ์วิจัยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวฟิล์ม

7. เอกสารอ้างอิง

1. Birkmire, R. W., 2001. "Compound Polycrystalline Solar Cells: Recent Progress and Y2K Perspective." *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, Vol. 65, No. 1-4, pp. 17-28.
2. Ramanathan, K., Contreras, M. A., Perkins, C. L., Asher, S., Hasoon, F. S., Keane, J., Young, D., Romeo, M., Metzger, W., Noufi, R., Ward, J., and Duda, A., 2003. "Properties of 19.2% Efficiency ZnO/CdS/CuInGaSe₂ Thin-Film Solar Cells." *Prog. Photovolt. : Res. Appl.*, Vol. 11, pp. 225-230.
3. Ramanathan, K., Teeter, G., Keane, J., and Noufi, R., 2005. "Properties of High-Efficiency CuInGaSe₂ Thin Film Solar Cells." *Thin Solid Films.*, Vol. 480, pp. 499-502.
4. Contreras, M. A., Egaas, B., Ramanathan, K., Hiltner, J., Schwartzlander, A., Hasoon, F., and Noufi, R., 1999. "Progress Towards 20% Efficiency in Cu(In,Ga)Se₂ Polycrystalline Thin-Film Solar Cells." *Prog. Photovolt., Res. Appl.*, Vol. 7, No. 4, pp. 311-316.
5. Klenk, R., Walter, T., Schock, H. W., and Cahen, D., 1994. "Physical Vapor Deposition of CuInX_2 (X=S, Se) Thin Films : A Model for the

Growth Mechanism.” *Solid State Phenomena.*, Vol. 37-38, pp. 509-514.

6. Tuttle, J. R., Contreas, M., Bode, M. H., Niles, D., Albin, S., Matson, R., Gabor, A. M., Tennart, A., Duda, A., and Noufi, R., 1995. “Structure, Chemistry, and Growth Mechanisms of Photovoltaic Quality Thin-Film $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ Growth from a Mixed-Phase Precursor.” *J. Appl. Phys.*, Vol. 77, No. 1, pp. 153-161.

7. Moller, J. H. 1993, *Semiconductors for Solar Cells*. Boston, London: Artech House, pp. 1-49.

8. Chityuttakan, C., Chinvetkitvanich, P., Yoodee, K., and Chatraphorn, S., 2006. “In situ Monitoring of the Growth of $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ Thin Films.” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, Vol. 90, pp. 3124-3129.

9. Chinvetkitvanich P. 2006, *Molecular Beam Deposition and Characterization of Wide-band-gap $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ for Thin Film Solar Cells*. PhD Thesis, Department of Physics, Faculty of Science, Chulalongkorn University.

10. Kessler, J., Chityuttakan, C., Lu, J., Sch Idstrom, J., and Stolt, L., 2003. “ $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ Thin Films Grown with a Cu-Poor-Rich-Poor Sequence: Growth Model and Structural Considerations.” *Prog. Photovolt : Res Appl.*, Vol. 11, pp. 319-331.

11. Gabor, A. M., Tuttle, J. R., Schwartzlander, A., Tennant, A. L., Contreras, A., and Noufi, R., 1994. “Band-Gap Engineering in $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ Thin Films Grown from $(\text{In,Ga})_2\text{Se}_3$ Precursors.” 1st WCPEC., pp. 5-9.

12. Gloeckler, M. and Sites, J. R., 2005. “Efficiency Limitations for Wide-Band-Gap Chalcopyrite Solar Cells.” *Thin Solid Films*. Vol. 480-481, pp. 241-245.

13. Ngugen, Q., Orgassa, K., Koetschau, I., Rau, U., and Schock, H. W., 2003. “Influence of heterointerfaces on the performance of $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ solar cells with CdS and $\text{In}(\text{OH}_x\text{S}_y)$ buffer layers.” *Thin Solid Films*. Vol. 431-432, pp. 330-334.

