

# Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> 박막의 저온 성장 및 NaF 후속처리를 통한 태양전지 셀 특성 연구

김승태<sup>1)</sup> · 정광선<sup>1)</sup> · 윤재호<sup>2)</sup> · 박병국<sup>1)\*</sup> · 안병태<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>한국과학기술원 신소재공학과, 대전광역시 유성구 대학로 291, 305-338

<sup>2)</sup>한국에너지기술연구원 태양광발전팀, 대전시 유성구 가정로 152, 305-343

## Low-temperature Growth of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Thin Film and NaF Post Deposition Treatment for Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Solar Cells

Seung Tae Kim<sup>1)</sup> · Gwang Seon Jung<sup>1)</sup> · Jae Ho Yun<sup>2)</sup> · Byong Guk Park<sup>1)\*</sup> · Byung Tae Ahn<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-338, South Korea

<sup>2)</sup>Photovoltaics Team, Korea Institute of Energy Research, 152 Gajung-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, South Korea

**ABSTRACT:** High efficiency Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells are generally prepared above 500°C. Lowering the process temperature can allow wider selection of substrate material and process window. In this paper, the three-stage co-evaporation process widely used to grow CIGS thin film at high temperature was modified to reduce the maximum substrate temperature. Below 400°C the CIGS films show poor crystal growth and lower solar cell performance, in spite of external Na doping by NaF. As a new approach, Cu source instead of Cu with Se in the second stage was applied on the (In,Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> precursor at 400°C and achieved a better crystal growth. The distribution of Ga in the films produce by new method were investigated and solar cells were fabricated using these films.

**Key words:** CIGS solar cell, low temperature process, NaF post deposition treatment, CIGS growth mechanism

### Subscript

CIGS : Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub>

PDT : post deposition treatment

SLG : soda-lime glass

SEM : scanning electron microscope

XRD : X-ray diffraction

AES : auger electron spectroscopy

EQE : external quantum efficiency

### 1. 서론

높은 효율을 위한 CIGS 흡수층의 제조는 일반적으로 3단계 진공증발법을 이용하며, 공정 중 기판의 최대 온도는 550°C까지 올라간다고 알려져 있다<sup>1-3)</sup>. 이러한 3단계 진공증발법으로 만

들어진 CIGS 태양전지는 현재 실험실 수준에서 21.7%의 최고 효율이 보고되었다<sup>1)</sup>. 유리 및 금속 기판의 경우에는 600°C의 온도까지 사용이 가능하지만 플라스틱 등의 다른 기판의 사용에는 공정온도가 제약으로 작용할 수 있다. 이 중 폴리이미드(PI) 기판을 활용한 저온 공정이 보고된 바 있으며 20% 이상의 효율도 가능함을 보여주었다<sup>4,5)</sup>. 앞으로 태양전지의 양산 및 원가 절감을 위해서는 기판의 선택 및 공정 비용을 줄이는 데 도움이 되는 저온 공정이 필요할 것으로 보인다.

CIGS 박막을 만드는 공정 중의 기판의 온도가 충분히 높을 때에는 SLG에서 확산되어 나오는 Na이 CIGS 흡수층에 충분히 도핑이 되지만 이러한 확산은 온도의 영향을 받으므로 저온에서는 자연적인 확산 이외에 추가 도핑이 필요해진다. NaF 또는 Na<sub>2</sub>S 등의 Na 화합물을 활용한 CIGS의 외부 도핑이 태양전지 특성에 좋은 영향을 준다고 알려져 있으며, 흡수층의 성장 및 미세구조에 대한 영향 없이 도핑 효과를 주기 위해서 CIGS 박막의 증착이 완료된 후에 Na 화합물을 공급하는 Post Deposition Treatment (PDT)가 사용되고 있다<sup>4,6)</sup>. 또한 최근의 고효율 CIGS 연구에서 KF의 추가 도핑으로 개방전압 상승 효과 및 효율 개선

\*Corresponding author: btahn@kaist.ac.kr

Received February 23, 2015; Revised February 28, 2015;

Accepted March 3, 2015

이 있어 앞으로 CIGS 성장 이후 외부도핑이 필수적인 공정이 될 가능성이 높다<sup>1,7)</sup>.

이 논문에서는 CIGS 흡수층의 성장 시 공정온도를 낮춘 효과와 이렇게 만들어진 박막 특성에 대하여 알아보았다. 이때 태양전지의 효율에 어떤 변화가 나타나는지 비교하기 위해 NaF PDT를 진행하였다. 또한 저온에서의 CIGS 결정 성장을 이루기 위한 방법으로 Se 공급을 제어하여 박막 성장을 개선하는 방법에 대한 실험을 진행하고 박막 내 Ga 분포 조절과 이를 이용한 태양전지 특성을 분석하였다.

## 2. 실험 과정

### 2.1 CIGS thin film fabrication and characterization

CIGS 박막 성장은 이전에 보고된 실험과<sup>8)</sup> 유사한 3단계 진공 증발법을 사용하며 기판의 온도를 내리는 방식으로 실험을 진행하였다. 1st stage에서 (In,Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 층을 만든 후 Cu, Se를 공급하는 2nd stage 이후의 기판 온도를 기존의 550°C보다 낮춰서 박막 제조공정을 진행하였다. NaF를 공급하며 PDT를 할 때에는 기판 온도 400°C에서 NaF와 Se를 15 분간 공급하였다.

공정 중 구리와 Se 공급을 제어하여 박막의 형상을 개선하기 위한 실험은 이전 실험을<sup>9,10)</sup> 참고하였고 공정 중 pyrometer를 활용하여 박막의 온도를 관찰하였다<sup>11)</sup>. 만들어진 박막의 SEM 및 EDAX 분석에는 FEI company의 Nova 230 장비를 사용하였다. XRD 분석은 RIGAKU Ultima IV 장비를 사용하였고 X-ray source는 Cu, 40 kV 40 mA 조건에서 회절 패턴을 얻었다. AES depth profile을 얻기 위해서는 Perkin Elmer SAM4300 분석장비를 사용하였다<sup>12)</sup>.

### 2.2 Fabrication of CIGS solar cells

만들어진 박막은 Al/ZnO:Al/i-ZnO/CdS/CIGS/ Mo/SLG 구조의 태양전지 소자로 제조되었다. 완성된 태양전지는 공기 중

에서 200°C 열처리를 거쳤으며 각 소자는 0.43 cm<sup>2</sup>의 면적을 가지도록 scribing을 하였다. 이후 25°C AM 1.5 G의 광량에서 효율을 측정하였다.

## 3. 결과 및 논의

### 3.1 3단계 진공증발 저온공정을 통한 CIGS 박막 성장

3단계 진공증발법 공정의 최대온도를 350°C, 400°C, 450°C로 설정하여 제조한 CIGS 박막의 단면 SEM 사진이 Fig. 1에 나타나 있다. 550°C에서 흡수층을 제조할 경우 1 μm 전후의 큰 결정립을 가지는 CIGS 박막이 만들어지는 것이 알려져 있다<sup>2)</sup>. Fig. 1(a)의 SEM 이미지를 보면 350°C에서 성장한 박막은 작은 결정립을 가지며 표면 roughness가 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 공정 중의 낮은 온도로 인해 확산 및 결정 성장이 잘 이루어지지 않기 때문인 것으로 보인다. Fig. 1(b)에 나타난 400°C의 경우 박막의 표면 roughness는 줄어들었으나 Mo 경계면에서 작은 결정립이 나타난다. Fig. 1(c)에서는 큰 결정립이 나타난 것으로 보아 450°C 이상이라면 CIGS 결정이 크게 성장할 수 있는 온도인 것으로 여겨진다.

400°C에서 공정 도중의 모습을 관찰한 Fig. 2를 통해 결정 성장과정을 좀 더 자세히 관찰할 수 있다. 1st stage에서 미세결정을 가지는 (In,Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 박막이 형성되고(Fig. 2(a)), 그 위에 Cu와 Se이 증착되면서 CIGS 상이 생기게 된다(Fig. 2(b)). (In,Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>/CIGS/Cu<sub>2</sub>Se의 세 층을 가지는 성장 도중의 단계에서 박막의 상/하부로 확산이 이루어지면서 결정이 성장해야 하는데 400°C에서는 성장이 잘 이루어지지 않아 Fig. 2(c)에서 볼 수 있듯이 3층 구조가 남는 박막이 만들어진다. Cu 비율이 1에 가까운 경우는 결정 성장이 잘 되는 것을 확인하였다(not shown). 상대적으로 mobility가 높은 Cu 이온의 확산에 비해 In, Ga이 잘 확산되지 않는 것이 주된 원인으로 생각된다.

CIGS 태양전지에서 Na의 도핑으로 소자 특성에 좋은 영향을

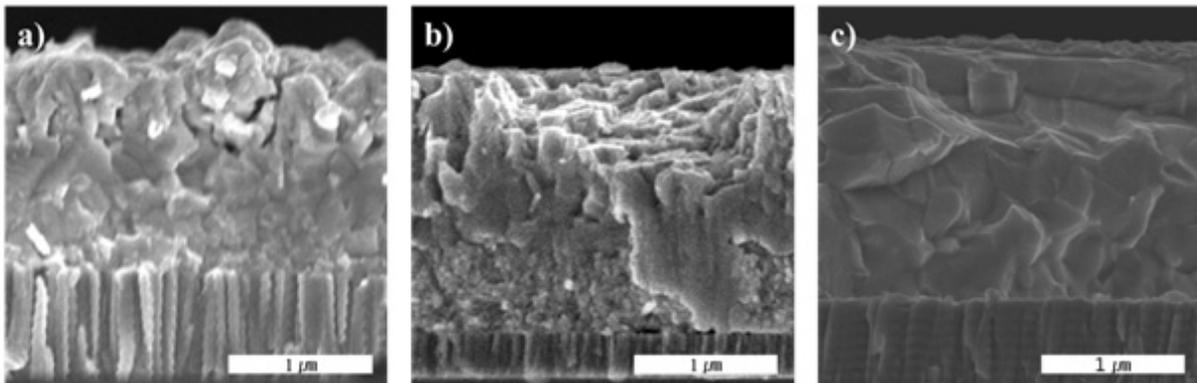
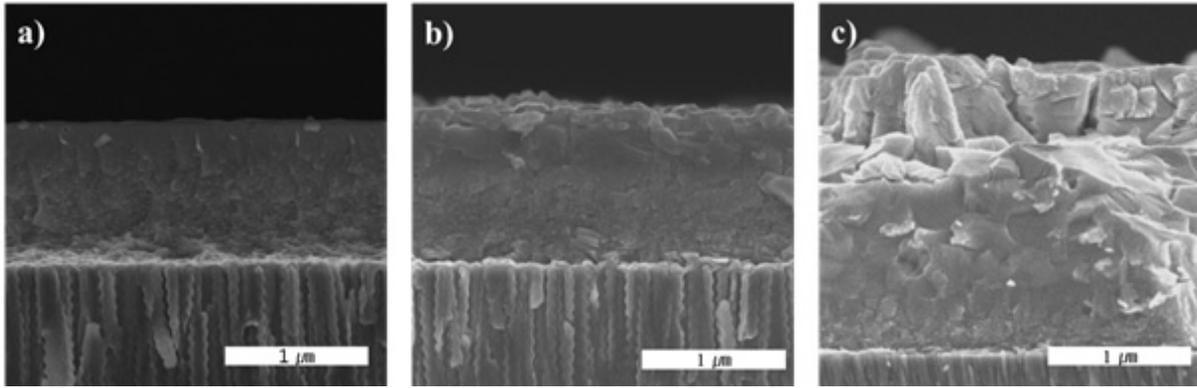


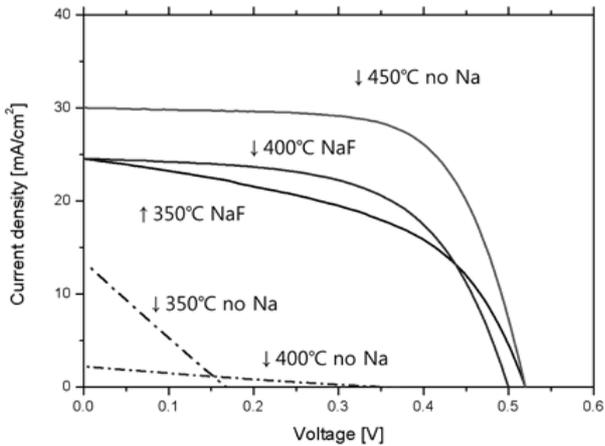
Fig. 1. SEM cross-section image of CIGS films deposited by 3 stage process with reduced substrate temperature at a) 350°C, b) 400°C, and c) 450°C



**Fig. 2.** SEM cross-section image of CIGS films during 3 stage process at 400°C substrate temperature. a) after 1st stage, b) after 2nd stage, and c) after 3rd stage

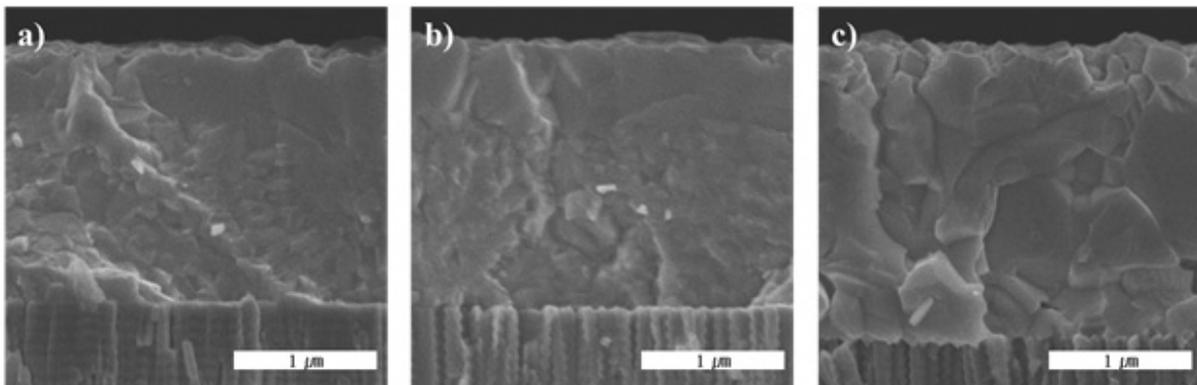
**Table 1.** Solar cell parameters of CIGS solar cells produced at different temperature and NaF treatment condition

Conditions	Efficiency[%]	V <sub>oc</sub> [V]	J <sub>sc</sub> [mA/cm <sup>2</sup> ]	F.F.[%]
350 No Na	0.6	0.168	13.44	24.5
350 NaF	6.4	0.520	24.52	50.1
400 No Na	0.2	0.356	2.23	22.0
400 NaF	7.2	0.500	24.51	59.2
450 No Na	10.4	0.520	29.99	66.9



**Fig. 3.** Light IV-curves of CIGS solar cells produced at different temperature and NaF treatment condition

주는 것이 알려져 있다<sup>6,13</sup>. 기판으로 사용되는 SLG 에서 확산을 통해 CIGS 박막 내부로 Na이 유입되는데 저온에서는 확산 속도가 느려질 것으로 예상되어 NaF 첨가를 통해 외부도핑을 수행하였고 태양전지를 만들어 그 특성을 Table 1과 Fig. 3에 정리하였다. 350°C에서 제조한 박막의 경우 400°C에서 진행한 PDT 공정을 통해 추가적인 열처리 효과를 봤을 것으로 생각되며, 도핑과 함께 작용하여 효율을 개선한 것으로 여겨진다. 400°C에서 Na 첨가 후에 미세구조의 변화는 관찰되지 않았으나(not shown) 태양전지 특성이 개선되었다. 이는 Na 도핑에 의한 효율 향상이라고 할 수 있다. 450°C의 경우에는 다른 온도에서와 달리 NaF 후처리 없이도 비교적 높은 효율을 보여주고 있다.



**Fig. 4.** SEM cross-section image of CIGS films deposited by (In, Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>+Cu 2 step process with a) Cu with Se effusion cell at 175°C, b) Cu with Se effusion cell at 160°C, and c) Cu supplied without Se

### 3.2 Cu/(In,Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 전구체 구조를 도입한 저온 진공증발 공정

400°C 이하의 온도에서는 (In,Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 층이 만들어지고 나서 Cu, Se를 공급하는 3 stage 공정 도중의 과정에서 박막 성장이 잘 이루어지지 않는 것을 확인하였다. 그러나 Cu/(In, Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 전구체를 통한 CIGS 제조에서는 성장 방식이 다르다는 보고가 있다<sup>10)</sup>. (In, Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 층을 증착한 후 Cu의 공급은 그대로 두고 Se effusion cell을 각각 175°C, 160°로 사용하였을 때, 사용하지 않았을 때 박막을 성장시킨 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 앞 절에서와 유사한 조건인 Fig. 4(a)에서는 Mo 계면에 작은 결정이 관찰된다. Cu<sub>2</sub>Se와 (In, Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 사이의 반응이 제한되는 상태에서 결정립의 성장이 일어나지 않고 공정이 끝난 것으로 생각된다. Se의 공급량을 줄여도 크게 변화가 없는 모습이다(Fig. 4(b)). 그러나 Fig. 4(c)에서 Se 공급을 중단한 경우 박막 표면부터 Mo 계면 부분까지 결정이 크게 성장한 것을 관찰할 수가 있다. 이러한 현상은 400°C에서 (In, Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 층 위에 금속 Cu가 공급되면 Se이 부족한 상태의 CIGS가 만들어지면서 남은 금속은 Cu-In alloy의 액상을 형성하여 결정 성장이 이루어지기 때문이다<sup>10)</sup>. CIGS 결정이 잘 성장했음을 확인하기 위해 박막의 XRD 회절 패턴을 Fig. 5에 비교하여 나타내었다. Fig. 1(b)에 나타난 기존 3 stage 공정의 온도를 400°C로 진행한 경우 CIGS (112) peak에

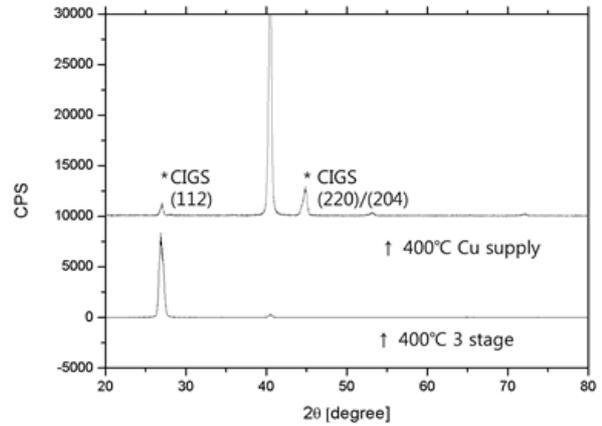


Fig. 5. XRD patterns of CIGS films deposited by 3 stage at 400°C and (In, Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>+Cu 2 step

해당하는<sup>14)</sup> 2θ=27° 부근의 peak 만이 크게 나타나지만 새로운 공정에서는 CIGS의 (112) 및 (220)/(204) peak 가 함께 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 일반적인 3 stage CIGS와 같이 결정 성장이 이루어졌다고 볼 수 있다.

Fig. 6(a)는 Cu만 공급하여 Se deficient 하게 성장시킨 CIGS 박막의 AES depth profile이다. 표면에서 In 비율이 높아지는 것은 박막 성장 중 Cu-In 상이 형성되면서 Ga 이 표면에서 부족해지고 열처리 중에 Cu는 다시 균일하게 확산되면서 일어나는 현

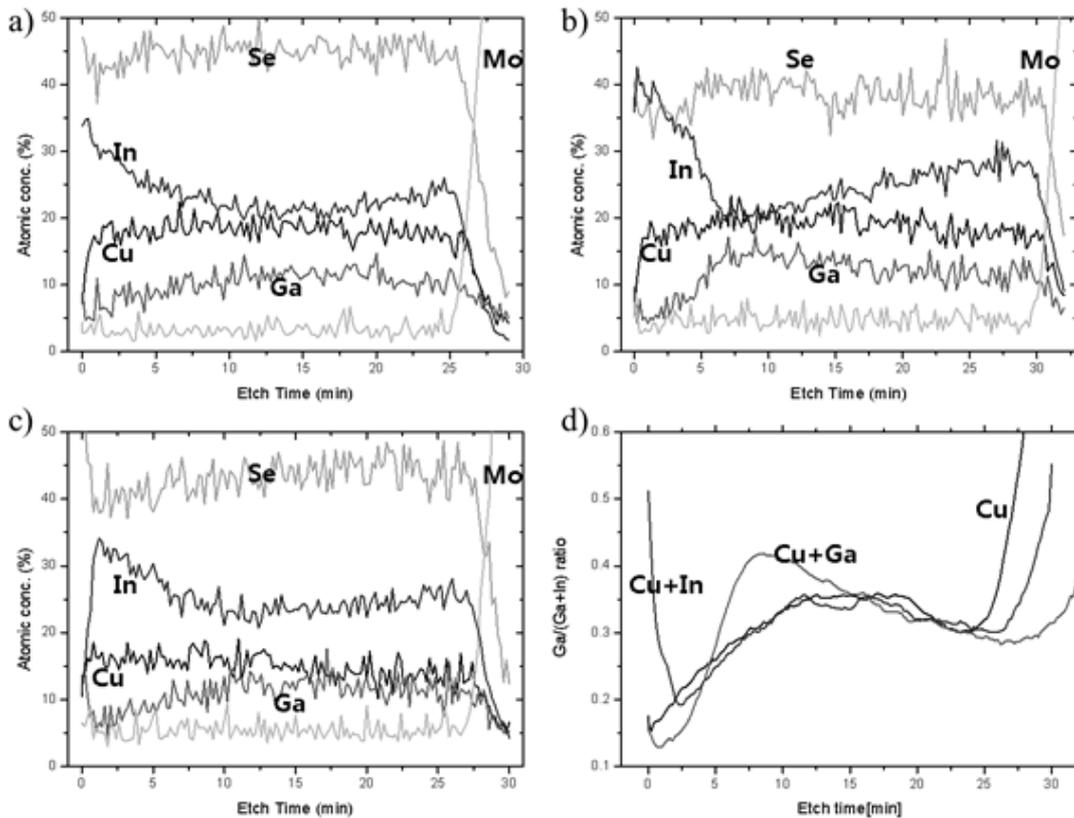


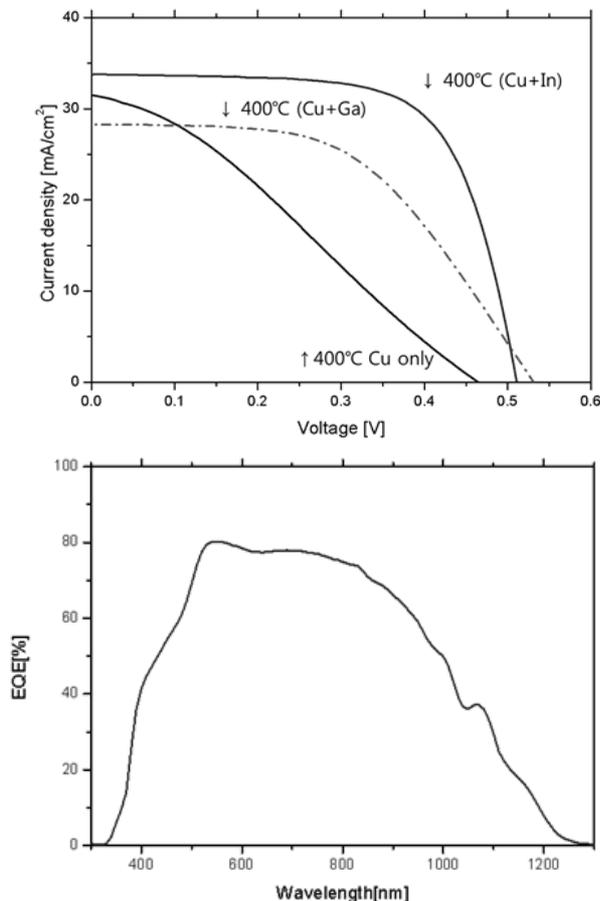
Fig. 6. (a,b,c) AES depth profile of CIGS films deposited by a) (In, Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> + Cu 2 step, b) (In, Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> + (Cu+Ga) 2 step, c) (In, Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> + (Cu+In) 2 step and Ga supplied at the end of the process, and d) Ga/(Ga+In) ratio of (a,b,c) films

**Table 2.** Solar cell parameters of CIGS solar cells deposited by (In, Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> + Cu 2 step, (In, Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> + (Cu+Ga) 2 step and (In, Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> + (Cu+In) 2 step, and Ga supplied at the end of the process

Conditions	Efficiency [%]	V <sub>oc</sub> [V]	J <sub>sc</sub> [mA/cm <sup>2</sup> ]	F.F. [%]
(In, Ga) <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> + Cu	4.4	0.465	31.51	29.8
(In, Ga) <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> + (Cu+Ga)	7.8	0.531	28.28	52.0
(In, Ga) <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> + (Cu+In)	11.7	0.511	33.77	67.9

상이다. Cu와 Ga를 함께 공급하게 되면 Fig. 6(b)와 같이 박막의 중간 부분에서 Ga 비율이 높아진다. Cu에 비해 다른 원소들은 박막 내 확산이 느리게 일어나기 때문에 저온 공정에서는 상대적으로 조성의 직접적인 제어가 쉽다는 것을 볼 수 있다. Fig. 6(c)에서는 반대로 Cu와 In을 함께 공급하였고 공정의 마지막에 Ga를 첨가하여 박막을 완성하였다. Fig. 6(d)의 Ga ratio를 표시한 그래프를 통해 Ga notch 형성을 명확하게 볼 수 있다<sup>15,16</sup>.

앞의 세 흡수층을 이용해 제조한 CIGS 태양전지의 특성 및 IV curve를 Table 2와 Fig. 7에 표시하였다. 앞선 실험에서는 400°C의 경우 최대 7.2%의 효율을 얻을 수 있었으나 전구체 구조를 이용한 CIGS 태양전지의 경우 효율 및 J<sub>sc</sub>가 더 좋은 것을

**Fig. 7.** Light IV-curves of CIGS solar cells deposited by (In, Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> + Cu 2 step, (In, Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> + (Cu+Ga) 2 step and (In, Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> + (Cu+In) 2 step and Ga supplied at the end of the process (above) and EQE curve of the cell with the highest efficiency (below)

볼 수 있다. 특히 Ga notch가 형성된 흡수층의 경우 기존 태양전지 소자들에 비하여 FF 개선이 있으며, EQE 그래프에서 볼 때 장파장 영역까지 흡수가 이루어지고 있어 추가적인 J<sub>sc</sub> 향상이 가능할 것으로 보인다<sup>13</sup>. 다른 두 시편은 표면에서의 In 비율이 지나치게 높아 defect가 많은 상태일 것으로 추정되며<sup>17</sup>, 이들이 밴드 내에서 재결합이 일어나는 장소로 작용하여 효율이 낮아지는 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

CIGS 흡수층 제조 공정의 최대 온도를 낮추는 것이 박막의 제조 및 그 특성이 미치는 영향을 알아보기 위한 실험을 진행하였다. 기존 3 stage 공정의 온도를 400°C 이하로 낮출 경우 박막의 성장이 저해되어 균일하고 결정립 크기가 큰 CIGS 박막을 얻기가 어렵다. 이는 Cu<sub>2</sub>Se상의 형성에 의한 결정의 성장이 낮은 온도로 인해 박막 전체에 걸쳐 일어나지 않기 때문인 것으로 분석되었다. 400°C 이하에서 만든 흡수층에 Na PDT를 통한 태양전지 효율의 개선을 확인할 수 있었다. 450°C 이상이라면 박막 성장에는 큰 문제가 없으나 표준 공정 보다는 효율이 낮아 흡수층의 품질이 낮은 것으로 생각된다. 다른 한편으로는 Cu/(In, Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 전구체를 활용한 CIGS 박막 성장을 응용하여 Cu 공급 중에 Se 공급을 중단하여 Se deficient 한 CIGS 상을 성장시키는 방식을 시도하였다. 이렇게 성장한 CIGS 박막은 표면에서 In-rich 해지며 각 금속원소의 flux를 제어하여 흡수층 내의 Ga 분포를 조절함으로써 태양전지 특성의 개선을 확인할 수 있었다.

#### Acknowledgement

This work was supported by the Center for Inorganic Photovoltaic Materials (No. 2012-0001167) and Project KIER 22411 funded by the Korea Institute of Energy Research.

#### References

1. P. Jackson, D. Hariskos, R. Wuerz, O. Kiowski, A. Bauer, T. M. Friedlmeier, and M. Powalla, "Properties of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells with new record efficiencies up to 21.7%", *Physica*

- status solidi (RRL) - Rapid Research Letters, Vol. 9, Issue 1, pp. 28-31, 2014.
2. I. Repins, M. Contreras, M. Romero, Y. Yan, W. Metzger, J. Li, S. Johnston, B. Egaas, C. DeHart, J. Scharf, B. E. McCandless, and R. Noufi "Characterization of 19.9%-efficient CIGS absorbers", Photovoltaic Specialists Conference 2008. 33rd IEEE, pp. 1-6. IEEE. 2008.
  3. Y. M. Shin, C. S. Lee, D. H. Shin, H. S. Kwon, B. G. Park, and B. T. Ahn, "Surface modification of CIGS film by annealing and its effect on the band structure and photovoltaic properties of CIGS solar cells", Current Applied Physics, Vol. 15, No 1, pp. 18-24, 2015.
  4. A. Chirilă, P. Reinhard, F. Pianezzi, P. Bloesch, A. R. Uhl, C. Fella, L. Kranz, D. Keller, C. Gretener, H. Hagendorfer, D. Jaeger, R. Erni, S. Nishiwaki, S. Buecheler, and A. N. Tiwari "Potassium - induced surface modification of Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> thin films for high-efficiency solar cells", Nature Materials, Vol. 12, pp.1107-1111, 2013.
  5. P. Reinhard, A. Chirilă, P. Bloesch, F. Pianezzi, S. Nishiwaki, S. Buecheler, and A. N. Tiwari "Review of Progress Toward 20% Efficiency Flexible CIGS Solar Cells and Manufacturing Issues of Solar Modules", IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 3, No. 1, pp. 572-580, 2013.
  6. D. Rudmann, A. F. da Cunha, M. Kaelin, F. Kurdesau, H. Zogg, and A. N. Tiwari, G. Bilger "Efficiency enhancement of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells due to post-deposition Na incorporation", Applied Physics Letters, Vol. 84, No. 7, pp. 1129-1131. 2004.
  7. A. Laemmle, R. Wuerz, and M. Powalla "Efficiency enhancement of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin-film solar cells by a post-deposition treatment with potassium fluoride", Physica status solidi (RRL) - Rapid Research Letters, Vol. 7, No. 9, pp. 631-634, 2013.
  8. C. S. Lee, S. C. Kim, Y. M. Shin, B. G. Park, B. T. Ahn and H. S. Kwon, "Performance improvement in Cd-free Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells by modifying the electronic structure of the ZnMgO buffer layer", RSC Advances, Vol. 4, No. 69, pp. 36784-36790. 2014.
  9. D. H. Shin, J. H. Kim, Y. M. Shin, K. H. Yoon, E. A. Al-Ammar, and B. T. Ahn, "Improvement of the cell performance in the ZnS/Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> solar cells by the sputter deposition of a bilayer ZnO: Al film", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 21, No. 2, pp. 217-225, 2013.
  10. G. S. Jung, S. H. Mun, D. Shin, R. B. V. Chalapathy, B. T. Ahn & H. Kwon, "Fabrication of a smooth, large-grained Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin film using a Cu/(In,Ga)<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> stacked precursor at low temperature for CIGS solar cells", RSC Advances, Vol. 5, No.10, pp. 7611-7618, 2015.
  11. N. Kohara, T. Negami, M. Nishitani, and T. Wada, "Preparation of device-quality Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin films deposited by co-evaporation with composition monitor", Japanese journal of applied physics, Vol. 34, No. 9A, pp. L1141-L1144, 1995.
  12. H. N. R. Shin, Y. M. Shin, J. H. Kim, J. H. Yun, B. K. Park, B. T. Ahn "Low - temperature Deposition of Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Absorber using Na<sub>2</sub>S Underlayer", Current Photovoltaic Research Vol. 2, No.1, pp. 28-35, 2014.
  13. R. Scheer, H. W. Schock "Chalcogenide Photovoltaics: Physics, Technologies, and Thin Film Devices", John Wiley & Sons pp. 262-264, 2011.
  14. P. M. P. Salomé, V. Fjällström, P. Szaniawski, J. P. Leitão, A. Hultqvist, P. A. Fernandes, J. P. Teixeira, B. P. Falcão, U. Zimmermann, A. F. da Cunha, and M. Edoff "A comparison between thin film solar cells made from co-evaporated CuIn<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Se<sub>2</sub> using a one-stage process versus a three-stage process." Progress in Photovoltaics: Research and Applications. Vol. 23, Issue 4, pp. 470-478, 2015.
  15. S. H. Wei, S. B. Zhang, and A. Zunger "Effects of Ga addition to CuInSe<sub>2</sub> on its electronic, structural, and defect properties", Applied Physics Letters, Vol. 72, No. 24, pp. 3199-3201, 1998.
  16. W. Witte, D. Abou-Ras, K. Albe, G. H. Bauer, F. Bertram, C. Boit, R. Brüggemann, J. Christen, J. Dietrich, A. Eicke, D. Hariskos, M. Maiberg, R. Mainz, M. Meessen, M. Müller, O. Neumann, T. Orgis, S. Paetel, J. Pohl, H. Rodriguez-Alvarez, R. Scheer, H. W. Schock, T. Unold, A. Weber, and M. Powalla "Gallium gradients in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin-film solar cells" Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2014.
  17. S. B. Zhang, S. H. Wei, A. Zunger, and H. Katayama-Yoshida, "Defect physics of the CuInSe<sub>2</sub> chalcopyrite semiconductor" Physical Review B, Vol. 57, No. 16, pp. 9642-9656, 1998.