

# (Ga,Al)이 도핑된 ZnO를 투명전극으로 가진 Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> 태양전지에 수분이 미치는 영향

양소현 · 배진아 · 송유진 · 전찬욱\*  
화학공학과, 영남대학교, 경상시, 38541

## Effect of Moisture on Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Solar Cell with (Ga,Al) Co-doped ZnO as Window Layer

So Hyun Yang · Jin A Bae · Yu Jin Song · Chan Wook Jeon\*

School of Chemical engineering, Yeungnam University, Gyeongsna, 38541, Korea

Received November 16, 2017; Revised December 7, 2017; Accepted December 8, 2017

**ABSTRACT:** We fabricated two different transparent conducting oxide thin films of ZnO doped with Ga (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0.9 wt%) as well as Al (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2.1 wt%) (GAZO) and ZnO doped only with Al (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3 wt%) (AZO). It was investigated how it affects the moisture resistance of the transparent electrode. In addition, Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> thin film solar cells with two transparent oxides as front electrodes were fabricated, and the correlation between humidity resistance of transparent electrodes and device performance of solar cells was examined. When both transparent electrodes were exposed to high temperature distilled water, they showed a rapid increase in sheet resistance and a decrease in the fill factor of the solar cell. However, AZO showed a drastic decrease in efficiency at the beginning of exposure, while GAZO showed that the deterioration of efficiency occurred over a long period of time and that the long term moisture resistance of GAZO was better.

**Key words:** Transparent conductive oxide, Moisture resistance, (Ga,Al):ZnO, CIGS thin film solar cell

### subscript

UV : UV-Vis-NIR

EQE : External Quantum Efficiency

XRD : X-Ray Diffraction

### 1. 서론

태양 전지 기술은 현재 많은 주목을 받고 있는 기술 중 하나이다. 특히, Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>(CIGS) 흡수층은 제조원가가 다른 물질보다 낮고 적은 양의 In, Ga으로도 고효율을 낼수 있어 많이 사용되고 있다<sup>1)</sup>. 박막태양전지를 구성하기 위해 사용되는 투명전극(TCO, Transparent Conductive Oxides)은 투명 박막 트랜지스터(Transparent Thin Film Transistor), 유기 발광 소자(Organic Light Emitting Diode) 및 터치 패널 디스플레이와 같은 전자 장치에도 사용되는 필수적인 물질이다<sup>2-5)</sup>. 박막태양전지에서 투

명전극은 태양광을 흡수층에 전달하고 광생성 전자의 포집을 하는데 중요한 역할을 한다. 따라서, 광투과율이 높아야 하고 전기전도성이 우수해야한다. 투명전극 재료 중 ITO (Indium Tin Oxide, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:SnO<sub>2</sub>)는 뛰어난 전기 및 광학적 특성으로 인해 디스플레이 분야에서 가장 대표적으로 사용되는 재료이다<sup>6)</sup>. 하지만, 원료의 높은 단가로 인해 태양전지와 같은 저가 제품에서의 사용은 제한될 수밖에 없다<sup>7)</sup>. 이러한 단점을 보완할 수 있고, 에너지 밴드갭이 약 3.3eV이며 약 80% 이상의 높은 광투과도를 가진 ZnO (Zinc oxide)을 투명전극으로 사용할 수 있다. ZnO의 전기 광학적 특성은 3족 원소(Al, Ga, In, B)의 도핑에 의해 조정될 수 있다<sup>6,8)</sup>. ZnO의 내습성향상과 전도성 향상을 위해 Al과 Ga를 ZnO의 도핑원소로 사용하며, 특히 내습성 향상에는 Ga이 큰 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다<sup>9,10)</sup>. Al이 도핑된 ZnO (AZO)은 가시광선 영역과 근적외선 영역에서 투명하며 캐리어 농도는 10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>이고 비저항은 5×10<sup>-4</sup> Ohm·cm 이하이다<sup>11-13)</sup>. Ga이 도핑된 ZnO (GZO)은 근적외선 영역에서는 불투명하지만 캐리어 농도가 9×10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>으로 AZO보다 높고 비저항도 1.4×10<sup>-4</sup> Ohm·cm 으로 매우 우수하다<sup>14,15)</sup>. Al과 Ga이 모두 도핑된 ZnO

\*Corresponding author: cwjeon@ynu.ac.kr

(GAZO)는 AZO와 GZO의 중간적인 전기적 성능을 가지며, 투과율은 AZO와 유사한 것으로 알려져 있다<sup>7,16)</sup>. 따라서, 비용을 비롯하여 전기적/광학적 성능을 모두 고려할 때, GAZO는 ITO 혹은 AZO가 가진 문제점을 모두 해소할 수 있는 대안 물질로서 판단된다.

본 연구에서는 Ga ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$  0.9 wt%)과 Al ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  2.1 wt%)가 동시에 도핑된 GAZO 투명전극과 Al ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  3 wt%)만 도핑된 AZO 투명전극을 만들어, Al의 일부가 Ga으로 대체될 때 투명전극의 내습성에 어떠한 영향을 끼치는지 조사하였다.

## 2. 실험방법

후면전극으로 사용되는 400 nm 두께의 Mo가 코팅된  $25 \times 25 \text{ mm}^2$  크기의 유리기판(Soda-lime Glass) 위에 CuInGa 금속프리커서를 스퍼터링 증착하고  $\text{H}_2\text{Se}/\text{H}_2\text{S}$ 로 열처리하는 2 단계 공정을 통해 CIGS 흡수층을 제작하였다. CdS 버퍼층은 Chemical Bath Deposition 법으로 50 nm 가량 흡수층 상부에 증착하였다. 스퍼터를 이용하여 투명전극층을 증착에서 챔버의 초기진공은  $9. \times 10^{-7}$  Torr 이하로 유지하여 챔버 내 수분을 충분히 제거하였으며, i-ZnO를 약 80 nm로 증착한 후 각각 AZO 타겟과 GAZO 타겟을 이용하여 투명전극층을 형성하였다. 마지막으로 grid 전극을 E-beam을 이용하여 Ag 1.65  $\mu\text{m}$ 를 증착함으로써 두 종류의 태양전지 샘플을 각 5개씩 만들었다. 추가로 투과율, 전하농도, 이동도를 측정하기 위해 유리기판 위에 투명전극층만 증착하여 단위막 물성평가를 수행하였다. 투명전극층의 두께는 약 300 nm로서 20 sccm의 Ar, 200 W의 DC 파워, 1 mTorr의 공정압력, 150°C의 기판온도에서 제조되었다. 단위 박막 및 두가지 태양전지 소자의 내습성을 평가하기 위하여, 고온용 바이알(Schott-Duran)에 단위막 혹은 태양전지 샘플을 넣고 샘플이 잠길 만큼 증류수를 채운 뒤 오븐에서 실제온도 100°C로 30분, 60분, 120분, 240분씩 고온 증류수에 노출시켰다. 샘플이 고온 증류수에 잠긴 채 바이알 내에 밀봉되어 있기 때문에, 수증기가 포화된 환경으로서 통상의 고온고습 시험(85 °C, 상대습도 85%)에 비해 매우 가혹한 조건을 적용하여 내습성 시험 시간을 단축하였다.

노출 전후 태양전지의 전류-전압(I-V) 특성을 -0.2 V ~ +1.0 V의 범위에서 측정하여 단락전류, 개방전압, 충전율(FF, fill factor) 등의 성능을 구하였다. 정전용량-전압(C-V)는 30 kHz 주파수를 가진 20 mV 진폭의 AC 바이어스를 -1.0 V ~ +1.0 V의 범위로 측정하였으며, 흡수층 내 도핑농도와 공간전하영역(SCR, space charge region)을 추출하였다. 또한, 소자의 면적 방향 균일성을 확인하기 위해 레이저광원을 조사하여 소자의 국부적인 영역(지름 약 0.1 mm)에 대한 전류-전압 곡선(마이크로 I-V)을 측정하였다. 소자 전체면적( $7 \times 7 \text{ mm}^2$ )에 대해 가로 및 세로 방향으로 각 20 포인트씩 총 400 포인트를 스캔하였다. 투명전극 박막의 결정성과 표면 형상을 분석하기 위하여 X선 회절법

(X-Ray Diffraction), 주사전자현미경(SEM, scanning electron microscopy) (FE-SEM, HITACHI, S-4800)을 각각 이용하였다. 또한, 투명전극 단위막의 광학적/전기적 물성 관찰을 위하여 UV-visible spectroscopy (carry 5000), Hall measurement system (Ecopia, HMS-5000) 분석을 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 유리기판에 증착된 AZO 박막과 GAZO 박막의 XRD 회절패턴을 보여주고 있다. Fig. 1(a)에서 보인 바와 같이, AZO 박막과 GAZO 박막은 wurtzite 구조의 ZnO 상을 나타내었다. 일반적으로 스퍼터링 방법에 의해서 성장한 ZnO박막은 c-축 성장을 우선적으로 하는데, 이는 (002) 결정면이 가장 낮은 표면 자유에너지를 가지기 때문이다<sup>17)</sup>. AZO 박막과 GAZO 박막의 회절패턴을 비교해 봤을 때, (002) 결정면의 회절 강도는 AZO 박막보다 GAZO 박막에서 더 높았으며, GAZO 박막의 결정성이 더 우수함을 알 수 있다. 한편, Fig. 1(b)는 X선의 입사각을 1°로 하여 측정한 GIXRD (Glancing Incident XRD) 회절패턴으로서 (002) 결정면의 배향이 두 박막에서 서로 다를 보여주고 있다. 즉, AZO의 (002) 결정면의 GIXRD 회절강도가 XRD에 비해 더 높다는 관찰로부터 AZO 박막에서 (002) 결정면은 표

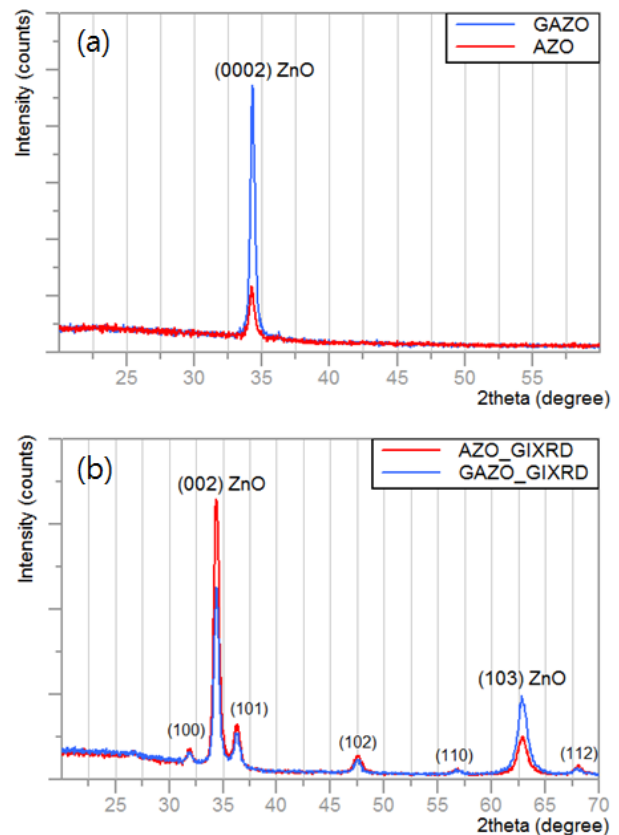
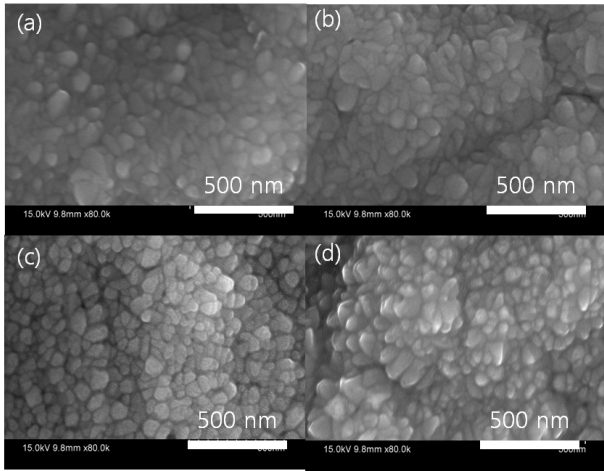


Fig. 1. XRD patterns of TCO layers grown test glass (a)  $\theta$ -2 $\theta$  mode (XRD) (b) 2 $\theta$  mode (GIXRD)

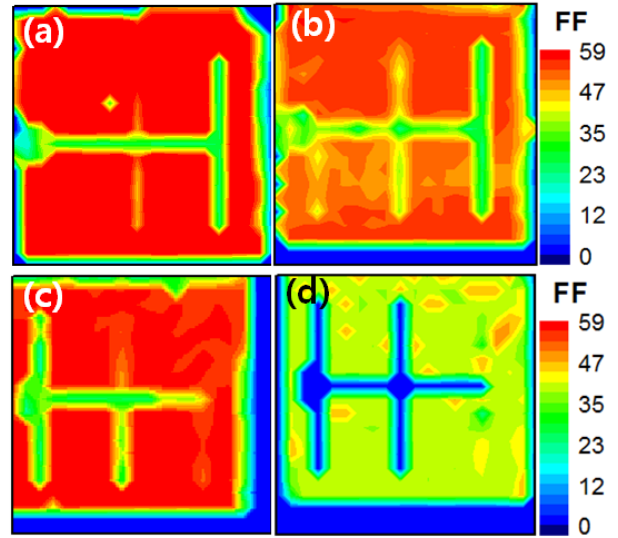


**Fig. 2.** SEM images of TCO surface after completing device fabrication (a) as-deposited AZO, (b) AZO after 240 min, (c) as-deposited GAZO, (d) GAZO after 240 min

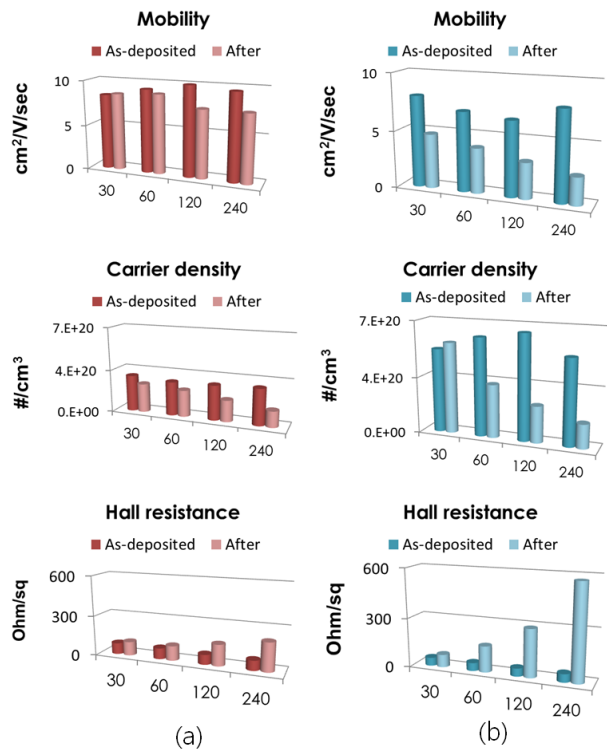
면에 대해 비스듬하게 분포할 확률이 크다. 반대로, GAZO의 (002) 결정면은 XRD에서 더 높으므로, 표면에 수직하게 분포할 확률이 더 높다. Fig. 2은 고온 증류수에 노출시키기 전과 240분 노출시킨 소자에서 AZO와 GAZO 박막의 SEM 표면 이미지이다. 노출되기 전의 AZO와 GAZO 박막을 비교했을 때, 두가지 박막 모두 표면형상에 있어서 확연한 차이는 없었다. 비록, 노출 후 GAZO의 표면은 다소의 결정립 크기 증가 혹은 결정립체의 대조비가 낮아진 것으로 판단되나, 결정립의 크기가 50 nm 이하로서 태양광스펙트럼 범위의 광자와 상호작용을 하기에 매우 작은 크기에 해당하므로, 이 정도의 작은 형상 차이는 유의차가 없는 것으로 판단된다. 즉, 투명전극 박막의 표면구조가 태양전지 성능에 영향을 주지는 않았다고 판단된다.

Fig. 3은 마이크로 IV 방법으로 측정된 네가지 소자에 대한 충전율을 분포이다. 습도에 노출시키기 전의 소자 전체면적에서 충전율 FF는 전반적으로 균일한 양상을 보였다. 반면, 습도에 노출시킨 소자의 FF는 전보다 훨씬 불균일해졌다. 노출 후의 소자들끼리 비교하면, AZO 박막보다 GAZO 박막을 가진 소자에서 FF 열화가 더욱 심하다. SEM 이미지에서 표면구조의 변화가 거의 없는 것으로 보아 표면구조의 변형이 아닌 광학적 요인 또는 전기적 요인이 FF 저하에 영향을 끼친 것으로 예상된다.

Fig. 4는 고습 증류수에 노출된 시간에 따른 AZO와 GAZO 박막의 면저항, 캐리어 농도 및 이동도 변화를 Hall 효과 측정법을 통해 얻은 결과이며, 각 샘플의 초기 값이 다르므로 초기값과 처리 후 값을 함께 도시하였다. 고온 증류수에 노출된 AZO 박막의 면저항은 30분 노출 되었을 때 83.9 Ohm/sq에서 103.7 Ohm/sq로 약간 증가하였고, 240 분 후 73 Ohm/sq에서 213 Ohm/sq로 약 3 배 증가하였다. 반면 GAZO 박막은 30 분 노출되었을 때 49.6 Ohm/sq에서 77.0 Ohm/sq으로 약간 증가하였고, 240 분 후 50 Ohm/sq에서 573.7 Ohm/sq로 약 10 배 이상 증가하였다. 이는

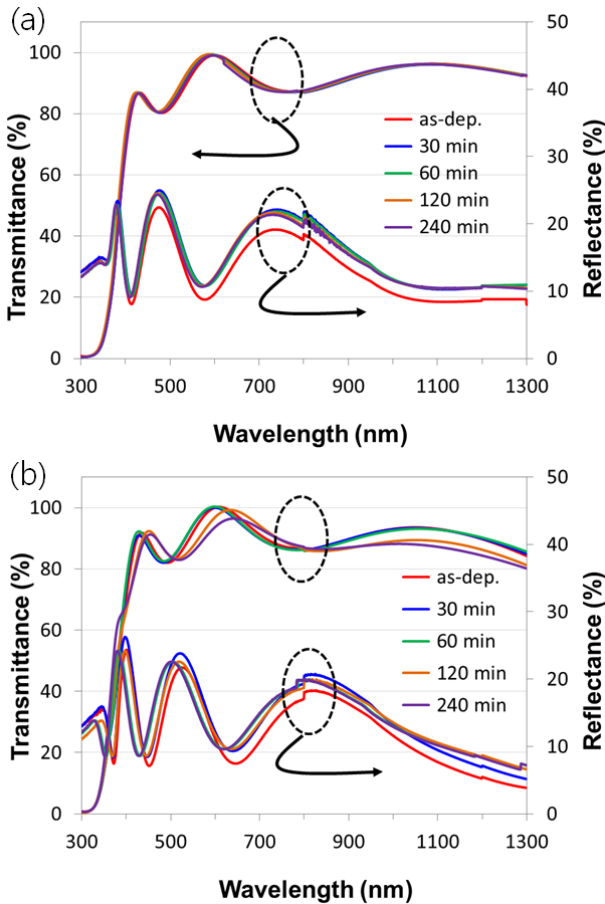


**Fig. 3.** FF distribution of solar cells with (a) as-deposited AZO, (b) AZO treated for 240 min, (c) as-deposited GAZO, (d) GAZO treated for 240 min



**Fig. 4.** Electrical properties of TCO layers depending on exposure time (a) AZO/glass (b) GAZO/glass

습도에 오래 노출될수록 박막의 캐리어 농도 및 이동도 감소에 따라 면저항이 증가하였기 때문이며, 산소 혹은 수분 등이 박막 내부로 확산침투하거나 표면에 흡착하는 현상으로 설명될 수 있다<sup>18)</sup>. 결과적으로 AZO 박막과 GAZO 박막을 비교했을 때, 초기 성능은 GAZO 박막이 더 우수하나, 고온의 수분에 대해 GAZO가 더 민감하게 전도 특성이 열화되었다. 즉, 태양전지의



**Fig. 5.** Transmittance and reflectance of TCO layers depending on exposure time (a)AZO on glass (b) GAZO on glass

FF의 저하는 AZO 및 GAZO 박막 저항 증가에 기인된 소자적렬 저항 증가에서 그 원인을 찾을 수 있다<sup>18)</sup>.

Fig. 5는 유리에 증착한 AZO와 GAZO 단위막의 고온 수분 노출 시간에 따른 광 투과율을 보여준다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 AZO와 GAZO 박막 모두에서 습도에 노출된 시간에 상관없이 가시광선영역에서 80% 이상의 투과율을 보였으며, 반사율 또한 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 하지만 습도에 오래 노출되어도 파장 전 영역에서 유사한 광학적 투과율을 가진 AZO 박막과 달리, GAZO박막은 500~1300 nm 영역에서 투과율이 다소 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 뒤에 설명한 바와 같이, 고온 수분에 노출된 태양전지의 단락전류는 오히려 증가하였으며, 따라서, 다소의 투과율 손실은 무시할 수 있다.

Table 1은 고온 증류수에 노출된 시간에 따른 태양전지 성능 파라미터의 변화를 나타내고 있다. 소자의 성능도 각 소자의 초기값이 다르므로 증감비((after-before)/before, %)로 나타내었다. 노출시간이 증가함에 따라 개방전압, 충전율이 지속적으로 감소한 반면, 단락전류는 오히려 증가하는 경향이 관찰되었다. 충전율의 감소는 위의 Hall 측정결과에서 보았듯이 ZnO의 면저항 증가에 기인한 것으로 판단할 수 있다. 그러나, 전체적으로 단

**Table 1.** Performance variation of the solar cells fabricated with different TCO depending on exposure time

AZO		Voc	Jsc	FF	EFF
30 min	as-fab	0.60	36.8	62.2	13.7
	after	0.59	37.0	60.9	13.4
	Δ (%)	-0.3	0.4	-2.1	<b>-2.1</b>
60 min	as-fab	0.60	34.8	65.3	13.6
	after	0.59	35.2	62.4	13.0
	Δ (%)	-1.1	1.1	-4.5	-4.5
120 min	as-fab	0.60	34.3	53.4	11.0
	after	0.59	34.9	60.0	12.4
	Δ (%)	-0.8	1.7	12.2	13.2
240 min	as-fab	0.60	34.2	64.5	13.2
	after	0.57	34.4	53.7	10.5
	Δ (%)	-5.1	0.9	-16.7	<b>-20.3</b>
GAZO		Voc	Jsc	FF	EFF
30 min	as-fab	0.60	33.9	69.0	14.0
	after	0.60	34.5	63.1	13.0
	Δ (%)	-0.1	1.9	-8.6	<b>-7.0</b>
60 min	as-fab	0.60	34.9	67.8	14.2
	after	0.60	36.0	59.4	12.8
	Δ (%)	0.1	3.1	-12.4	-9.6
120 min	as-fab	0.60	34.3	68.5	14.0
	after	0.60	36.9	62.1	13.7
	Δ (%)	-0.2	7.7	-9.3	-2.6
240 min	as-fab	0.60	34.2	64.5	13.2
	after	0.59	33.2	58.0	11.4
	Δ (%)	-1.3	-2.8	-10.0	<b>-13.7</b>

락전류가 증가한 결과는 현재까지 뚜렷한 원인을 파악하지 못하고 있다. 앞서 제시한 투명전극의 광학적 특성 변화 즉, 노출 시간 증가에 따라 다소의 투과율 감소를 보인 결과는 단락전류 거동과는 정반대이다. 현재로서는, 그리드 전극으로 사용한 Ag와 산화물 전극 간 계면특성이 오히려 고온 노출에 의해 개선된 것이 단락전류 증가와 관련이 있는 것으로 짐작하고 있으나, 그에 대한 직접적인 증거를 확보하지는 못하였으며, Ag/산화물 접합에 대한 연구를 통해 파악하고자 한다. AZO 소자의 효율은, 노출 시간 증가에 따라 초기에는 서서히 감소하나, 240 분 후 최대 20%의 감소를 보였다. 반면, GAZO 소자는 노출 초기에 심한 감소를 보인 후 240 분 후 AZO 소자에 비해 낮은 13.7%의 효율 감소를 보였다. 즉, GAZO 소자의 장기 내습성이 AZO 소자에 비해 우수함을 예측할 수 있다. 개별 성능파라미터의 해석은 매우 복잡한 과정을 거쳐야 하므로, 변환효율을 기준으로 하여 두가지 투명전극을 비교한다면, 장기적인 내습성은 GAZO가 더 우수하다고 결론지을 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 AZO와 GAZO 투명전도성 박막을 마그네트론 스퍼터링을 사용하여 제조하였고, 이들을 투명전극으로 사용한 CIGS 태양전지를 제조하여, 고온/고습에 노출될 경우 단위박막 및 태양전지의 성능변화를 관찰하였다. 단위박막의 경우, 두 박막 모두 투과율 및 반사율 변화는 크지 않았으나 캐리어 농도 및 이동도가 큰 폭으로 감소하였으며, 특히 GAZO의 성능 저하가 심하였다. 태양전지의 경우, 노출 시간 경과에 따라 개방 전압 및 충전율이 지속적으로 감소하였으나, 단락전류는 다소 증가하는 경향을 보였다. AZO를 투명전극으로 가진 소자의 효율이 노출 초기에 완만하게 감소한 반면, GAZO 소자는 초기에는 급격히 감소하다가 노출시간 경과에 따라 완만한 감소 경향을 보였다. 장시간에 걸친 성능변화관찰결과로부터 GAZO의 내습성이 AZO에 비해 더 우수함을 알 수 있었다. 이는, ZnO 도핑원소에 Ga를 추가하여 얻어진 결과로서, 태양전지에 적합한 투과 스펙트럼과 우월한 전도성, 그리고 장기 내습성이 우수한 GAZO 물질을 이용한다면, 태양광모듈 내구성을 향상시킬 수 있다는 것을 말해준다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2016 3010012310). 본 연구는 또한 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.20153010130320).

## References

1. M. Kaelin, D. Rudmann, A. N. Tiwari, "Low cost processing of CIGS thin film solar cells", *Solar Energy*, Vol. 77, pp. 749-756, 2004.
2. S. H. Jeong, N. Matsushita, K. H. Kim, "Investigation of the effect of oxygen gas on properties of GAZO thin films fabricated by facing targets sputtering system", *Semicond. Sci. Technol.*, Vol. 29, pp. 075007 (5pp), 2014.
3. J. S. Hong, S. M. Kim, S. J. Park, H. W. Choi, K. H. Kim, "Preparation of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZnO (IZO) Thin Film on Glass Substrate for Organic Light Emitting Device (OLED)", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, Vol. 520, pp. 19-27, 2010.
4. S. T. Meyers, J. T. Anderson, C. M. Hung, J. Thompson, J. F. Wager, D. A. Keszler, "Aqueous Inorganic Inks for Low-Temperature Fabrication of ZnO TFTs", *Am. Chem. Soc.*, Vol. 130, pp. 17603-17609, 2008.
5. H. Wei, H. Gong, Y. Wang, X. Hu, L. Chen, H. Xu, P. Liu, B. Cao, "Three kinds of Cu<sub>2</sub>O/ZnO heterostructure solar cells fabricated with electrochemical deposition and their structure-related photovoltaic properties", *Cryst. Eng. Comm.*, Vol. 13, pp. 6065-6070, 2011.
6. Y. Sato, H. Makino, N. Yamamoto, T. Yamamoto, "Structural, electrical and moisture resistance properties of Ga-doped ZnO films", *Thin Solid Films*, Vol. 520, pp. 1395-1399, 2011.
7. M. C. Li, C. C. Kuo, S. H. Peng, S. H. Chen, C. C. Lee, "Influence of hydrogen on the properties of Al and Ga-doped ZnO films at room temperature", *Applied Optics*, Vol. 50, pp. C197-C200, 2011.
8. K. S. Jung, S. J. Kwon, E. S. Cho, "Effect of Temperature on the Characteristics of ZnO Thin Film Applied to the Window Layer of CIGS Solar Cells", *J. KIEEME*, Vol. 26, pp. 304-308, 2013.
9. I. Y. Kim, S. W. Shin, M. S. Kim, J. H. Yun, G. S. Heo, C. H. Jeong, J. H. Moon, J. Y. Lee, J. H. Kim, "Effect of Sputtering Powers on Mg and Ga Co-Doped ZnO Thin Films with Transparent Conducting Characteristics", *Kor. J. Mater. Res.*, Vol. 23, pp. 155-160, 2013.
10. C. F. Yu, S. H. Chen, S. J. Sun, H. Chou, "Influence of the grain boundary barrier height on the electrical properties of Gallium doped ZnO thin films", *Applied Surface Science*, Vol. 257, pp. 6498-6502, 2011.
11. Y. S. Jung, H. W. Choi, K. H. Kim, "Properties of AZO Thin Films for Solar Cells Deposited on Polycarbonate Substrates", *J. Kor. Phys. Soc.*, Vol. 55, pp. 1945-1949, 2009.
12. T. Minami, H. Sato, K. Ohashi, T. Tomofuji, S. Takata, "Conduction mechanism of highly conductive and transparent zinc oxide thin films prepared by magnetron sputtering", *J. of Crystal Growth*, Vol. 117, pp. 370-374, 1992.
13. O. Bamiduro, H. Mustafa, R. Mundle, R. B. Konda, A. K. Pradhan, "Metal-like conductivity in transparent Al:ZnO films", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 90, pp. 252108, 2007.
14. E. Fortunato, L. Raniero, L. Silva, A. Goncalves, A. Pimentel, P. barquinha, H. Aguas, L. Pereira, G. Goncalves, I. Ferreira, E. Elangovan, R. Martins, "Highly stable transparent and conducting gallium-doped zinc oxide thin films for photovoltaic applications", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 92, pp. 1605-1610, 2008.
15. V. Bhosle, A. Tiwari, J. Narayan, "Electrical properties of transparent and conducting Ga doped ZnO", *J. Appl. Phys.*, Vol. 100, pp. 033713, 2006.
16. J. S. Hong, K. W. Jang, Y. S. Park, H. W. Choi, K. H. Kim, "Preparation of ZnO Based Thin Films for OLED Anode by Facing Targets Sputtering System", *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, Vol. 538, pp. 103-111, 2011.
17. Y. K. Hyun, J. W. Choi, D. H. Lee, "Characteristics of ZnO films deposited onto Al/Si substrate by r.f. magnetron sputtering", *Thin Solid Films*, Vol. 302, pp. 116-121, 1997.
18. D. W. Kim, D. W. Lee, H. S. Lee, S. T. Kim, C. H. Park, Y. N. Kim, "Effect of Degraded Al-doped ZnO Thin Films on Performance Deterioration of CIGS Solar Cell", *J. Kor. Ceramic Soc.*, Vol. 48, pp. 328-333, 2011.