

Al 그리드와 ZnO 투명전도막 의 공정변화에 따른 Cu(In,Ga)Se₂ 박막태양전지의 특성 연구

조보환 · 김선철 · 문선홍 · 김승태 · 안병태*
한국과학기술원 신소재공학과, 대전시 유성구 대학로 291, 305-338

Effect of Process Variation of Al Grid and ZnO Transparent Electrode on the Performance of Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells

Bo Hwan Cho · Seon Cheol Kim · Sun Hong Mun · Seung Tae Kim · Byung Tae Ahn*

Department of Materials Science and Engineering, KAIST, Daehak-ro 291, Yuseong-goo, Daejeon 305-338, Korea

ABSTRACT: CIGS solar cell consisted of various films. In this research, we investigated electrode materials in Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) cells, including Al-doped ZnO (ZnO:Al), intrinsic ZnO (i-ZnO), and Al films. The sputtered ZnO:Al film with a sputtering power at 200W showed the lowest series resistance and highest cell efficiency. The electrical resistivity of the 200-W sputtered ZnO:Al film was $5.2 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ by the rapid thermal annealing at 200°C for 1 min. The electrical resistivity of i-ZnO was not measurable due to its high resistance. But the optical transmittance was highest with less oxygen supply and high efficiency cell was achieved with O₂/(Ar+O₂) ratio was 1% due to the increase of short-circuit current. No significant change in the cell performance by inserting a Ni layer between Al and ZnO:Al films was observed.

Key words: CIGS solar cell, ZnO:Al, i-ZnO, electrode(Al/Ni) film

Nomenclature

CIGS : Cu(In,Ga)Se₂
ZnO:Al : Al-doped zinc oxide film
i-ZnO : intrinsic zinc oxide film
V_{oc} : open-circuit voltage, V
J_{sc} : short-circuit current, mA/cm²
FF : fill factor

Subscript

XRD : x-ray diffraction
SEM : scanning electron microscopy
QE : quantum efficiency

1. 서론

태양전지는 다양한 층들이 증착되어서 하나의 Cell로 구성되는 구조이다. 그 구조에는 Mo, CIGS absorber, CdS, i-ZnO, ZnO:Al, electrode film들이 포함되어 있다¹⁾. 본 실험에서는 구조 중 위쪽에 해당되는 층들을 세가지의 Part로 나누어서 진행할 것이다.

첫 번째는 ZnO:Al 층이다. ZnO:Al 층은 high electric conductivity, high temperature-stability, low cost, non-toxicity의 이점을 가지고 있다²⁻⁴⁾. 이러한 장점은 thin film Solar cell에서 front contact 층으로 사용되고 있다⁵⁻⁶⁾. i-ZnO 층 뿐만 아니라 효율 Cell 제작에 영향을 미친다. 좋은 특성을 가지는 ZnO:Al을 얻기 위해서는 Power, 두께, Working pressure, substrate temperature 등의 조건들을 변화 시키게 된다. 이번 실험에서는 ZnO:Al을 제작 시 Power의 변화를 주어 생성된 film의 변화와 이를 Cell에 적용하게 되었을 때의 Photovoltaic properties에 대해서 알아 볼 것이다.

두 번째는 i-ZnO 층이다. i-ZnO는 상온에서 3.37 eV의 넓은 band gap과 60 meV의 큰 excitation binding energy를 가진다⁷⁻¹⁰⁾.

*Corresponding author: btahn@kaist.ac.kr
Received February 15, 2015; Revised February 16, 2015;
Accepted February 23, 2015

Table 1. Deposition method, thickness, efficiency of solar cell from other groups

	Group	Layer	T (nm)	Eff (%)	Method
1994	NREL	Ni/Al	50/3000	16.8%	E-beam
2003	NREL	Ni/Al	-	19.2%	E-beam
2010	ZSW	Ni/Al	-	20.3%	-
2011	IBM	Ni/Al	50/2000	-	E-beam
2011	Empa	Ni/Al/Ni	50/4000/50	17.1%	E-beam
2013	Empa	Ni/Al	-	20.4%	E-beam

Solar cell에 적용된 i-ZnO 층은 CIGS층의 버퍼층과 TCO 사이에서 전류가 세는 것을 막아주는 역할을 하게 된다⁵⁾. 이는 고효율을 Cell 제작에 영향을 미친다. 이러한 i-ZnO 를 얻기 위해서는 Power, 두께, O₂ pressure ratio, working pressure 등의 조건들을 변화 시키게 된다. 이번 실험에서는 i-ZnO에서 O₂ Pressure ratio의 변화를 주어 생성된 film의 변화와 이를 Cell에 적용하게 되었을 때의 Photovoltaic properties에 대해서 알아 볼 것이다.

세 번째는 electrode 층이다. Table 1에서 볼 수 있듯이 효율이 높게 나오는 group들에서 공통점이 두 가지 발견 되었다¹¹⁻¹⁶⁾. 첫 번째는 Al을 E-beam evaporation을 이용하여서 2 um이상 증착을 하였다. 두 번째는 Al 증착 전에 Ni을 50 nm 증착 한 것을 알 수 있다. Ni을 증착 하여서 Ni과 Al double layer를 쓰는 것은 current 수집과 낮은 resistance 를 얻을 수 있다고 알려져 있다^{15,17,18,19)}. 이는 고효율의 Solar cell 제작에 이바지 할 수 있을 것이다.

앞에서 나온 세 가지의 층들에 각각 조건들을 변화시켜서 막들의 특성을 살펴본 다음 최종적으로 Solar cell 제작에 적용하여서 Photovoltaic properties의 변화를 관찰 하였다. 이러한 각 층들의 변화에 따른 결과 값을 토대로 좋은 특성을 나타내는 조건들을 찾아서 이를 최적화하면 Solar cell 제작에서 고효율을 얻는데 이바지 할 것이라 생각된다.

2. 실험

ZnO:Al는 고정변수를 Ar 20sccm, working pressure 2mTorr, 시간을 60 min으로 하고 power 150 W, 180 W, 200 W, 220 W로 Eagle XG glass 위에 증착 하였다. 증착 된 막은 SEM을 이용하여서 막의 Thickness를 측정하여서 각각의 Deposition rate를 구하였다. 전기적인 특성을 알아보기 위해서 Hall measurement를 이용하여 각각 막의 Bulk concentration, Mobility, Resistivity를 측정하였다. 광학적인 특성을 위해서는 Transmittance를 측정하였다. 이 막들은 RTA 200°C 1 min 열처리를 한 후에 다시 Hall measurement와 Transmittance를 측정하였다. 측정된 것 중에서 특성이 좋았던 두 가지 조건과 기존에 사용하였던 조건을

이용하여서 Cell에 적용하였다. CIGS absorber를 Selenization (C.S.S 200°C 5 min) 해준다. CdS를 Chemical bath deposition을 이용하여서 50~60 nm 증착 한다. i-ZnO는 sputter를 이용하여서 Power 60 W, Ar:O₂ =20:1, working pressure 2mTorr로 50~60 nm 증착 한다. ZnO:Al는 sputter를 이용하여서 Ar 20 sccm, working pressure 2mTorr로 Power를 각각 150 W, 180 W, 200 W, 220 W하여서 400~500 nm 증착 한다. Al은 Thermal evaporation을 이용하여서 400nm 증착한다. 최종적으로 RTA 200°C 1 min 열처리 한 후에 Photovoltaic properties를 관찰하였다.

i-ZnO는 고정변수를 Power 60 W, working pressure 2mTorr, 시간 120 min으로 하고 Ar:O₂ pressure를 20:01, 15:5, 10:10로 Eagle XG glass 위에 증착 하였다. 증착 된 막은 SEM을 이용하여서 막의 Thickness를 측정하여서 각각의 Deposition rate를 구하였다. 전기적, 광학적, 구조적 특성을 측정하기 위해서 Hall measurement, Transmittance, XRD를 측정하였다. 그 다음에는 Ar:O₂ pressure를 변수로 하여서 Cell에 적용하였다. CIGS absorber를 Selenization (C.S.S 200°C 5 min) 해준다. CdS를 Chemical bath deposition을 이용하여서 50~60 nm 증착한다. i-ZnO는 sputter를 이용하여서 Power 60 W, working pressure 2mTorr로 Ar:O₂ = 20:1, 15:5, 10:10으로 하여서 50~60 nm 증착한다. ZnO:Al는 sputter를 이용하여서 Ar 20sccm, working pressure 2mTorr, Power 200 W로 400~500 nm 증착한다. Al은 Thermal evaporation을 이용하여서 400 nm 증착한다. 최종적으로 RTA 200°C 1 min 열처리 한 후에 Photovoltaic properties를 관찰 하였다.

Electrode층에서는 CIGS absorber layer를 Selenization (C.S.S 200°C 5 min)한 후에 CdS 를 Chemical bath deposition을 이용하여서 50~60 nm 증착 한다. i-ZnO는 sputter를 이용하여서

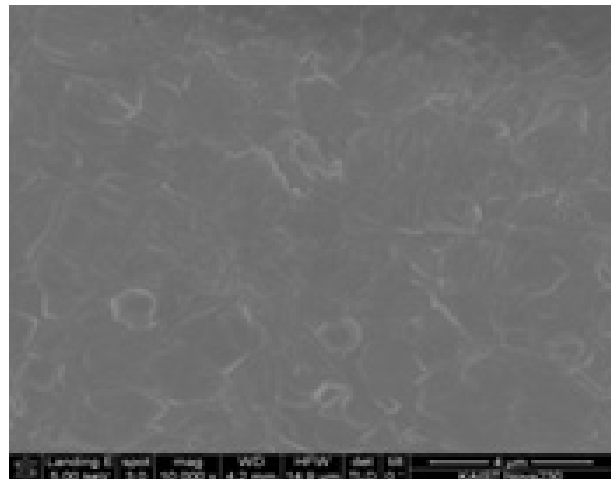


Fig. 1. CIGS absorber layer with the composition of Cu 0.86 and Ga 0.38

Power 60 W, Ar:O₂ = 20:1. Working pressure 2mTorr로 50~60 nm 증착한다. ZnO:Al는 sputter를 이용하여서 Ar 20sccm, working pressure 2mTorr, Power 200 W로 400~500 nm 증착한다. Al 400 nm은 Thermal evaporation을 이용하고 Al 3um은 e-beam evaporation을 이용하였다. Ni유무에서 Ni과 Al 증착은 E-beam evaporation을 이용했다. 완성된 Cell를 RTA 200°C 1 min 열처리 후에 Photovoltaic properties를 관찰하였다

본 실험에서 사용한 CIGS absorber 의 표면 사진은 Fig. 1과 같다. Al thickness 변화와 Ni 사용 여부도 Fig. 1의 기판을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 파워에 따른 ZnO:Al 층의 특성 변화

Fig. 2의 SEM 사진을 보면 Power가 150 W에서 220W로 증가할수록 두께가 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 3은 두께를 측정한 것을 토대로 deposition rate를 구한 것을 나타낸다. Power가 증가할수록 deposition rate이 0.85Å/s(150W), 1.35Å/s(180W), 1.43Å/s(200W), 1.48Å/s(220W)로 증가하였다. Fig. 4는 power에 따라서 As deposition, RTA 200°C 1 min 열처리 한

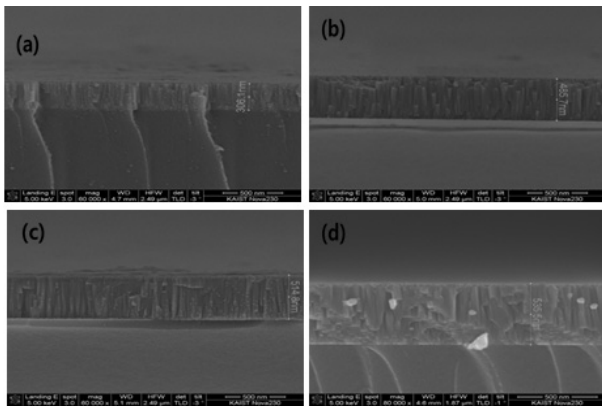


Fig. 2. Cross-sectional SEM images of ZnO:Al films deposited under condition of (a) 150 W for 60 min, (b) 180 W for 60 min, (c) 200 W for 60 min, and (d) 220 W for 60 min

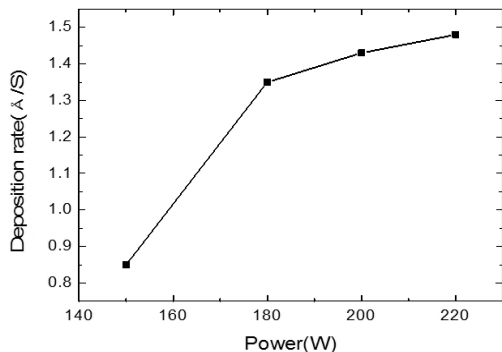


Fig. 3. Deposition rate of ZnO:Al sputtering power (As dep)

후에 electrical properties를 측정한 것을 나타낸다. 180 W, 200 W에서 Bulk concentration과 mobility가 좋은 것을 알 수 있다. RTA 200°C 1 min 열처리 후에도 똑 같은 경향이 나타났다. Bulk concentration과 mobility가 좋아짐에 따라서 Resistivity 값이 낮아지는 것을 알 수 있다. Power 200 W에서 5.42E-4 (As deposition), 5.24E-4 (RTA 200°C 1 min)로 측정되었다. Al doped zinc oxide는 Resistivity가 낮은 값을 가지게 될 때 좋은 특성을 나타낸다고 나와있다²⁰⁾. 따라서 Power가 200 W 일 때 좋

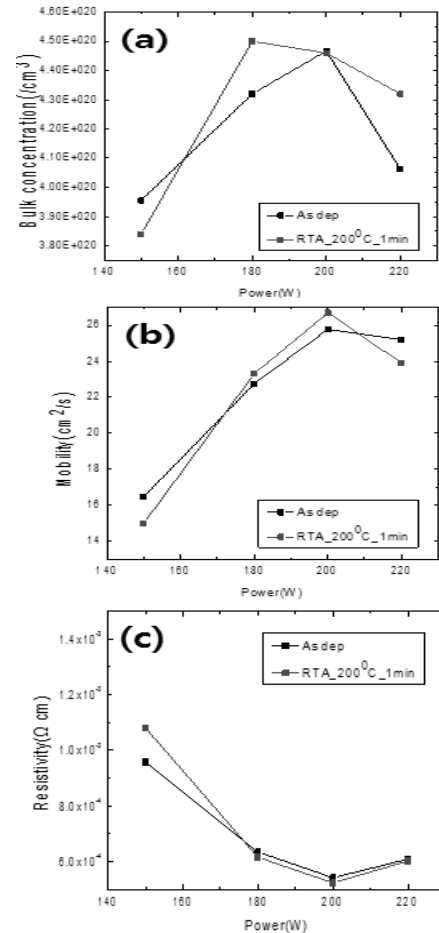


Fig. 4. Bulk concentration (a), mobility (b), and resistivity (c) of ZnO:Al film with as-seposited and RTA at 200°C for 1 min

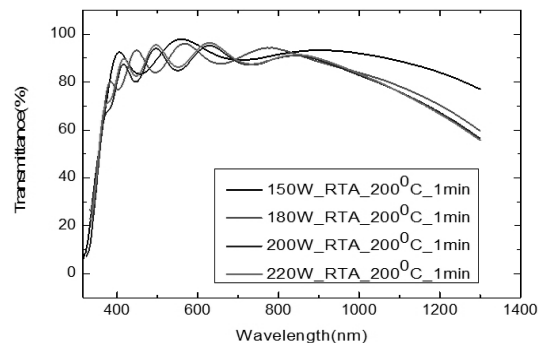


Fig. 5. Transmittance of ZnO:Al film sputtering power (As-deposited and RTA annealed at 200°C for 1 min)

Table 2. Thickness of ZnO:Al film sputtering power

Power (W)	Thickness (nm)
150	306.1
180	485.7
200	514.8
220	535.5

Table 3. Effect of ZnO:Al film sputtering power on cell performance

	Eff. (%)	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	F.F (%)	R _{sh} (ohm)	R _s (ohm)
AZ0180W (400nm)	13.82	35.22	0.575	68.28	1542.55	4.614
AZ0200W (400nm)	15.59	35.57	0.585	74.99	10797.83	3.443
AZ0220W (400nm)	16.18	35.94	0.609	73.86	1606.16	3.912

은 전기적인 특성을 가진다는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 Transmittance를 나타낸다. Power에 따라서 두께가 일정하지 않기 때문에 단순 비교는 쉽지가 않다. 막의 두께를 보면 150 W 일때는 작고 나머지는 차이가 미미 할 것을 알 수 있다. 150 W 일 때 다른 power에서 보다 transmittance가 높은 것을 볼 수 있는데 이것은 두께의 차이가 영향이 있는 것 같다. 나머지의 transmittance 값은 비슷한 것을 알 수 있다. Table 3은 electrical properties가 우수했던 180, 200 W와 기존에 사용해 왔던 220 W를 Cell로 제작하여서 Photovoltaics properties를 측정하여서 나타낸 것이다. Power 200 W, 220 W 일때 180 W에서 보다 높은 효율을 나타나는 것을 알 수 있다. 200 W, 220 W의 경우에는 효율의 차이가 미미 하기 때문에 비교적 낮은 power인 200 W를 쓰는 것이 Cell 제작시 이점이 있을 것이다. 특히, Series resistance의 값은 power가 200 W 일때 가장 낮은 값을 가진 것을 알 수 있다. 이는 sputtering power가 200 W에서 Resistivity 값이 작은 것에 기인 한 결과 인 것 같다.

3.2 산소 분압 비에 따른 i-ZnO 층의 특성 변화

Fig. 6의 SEM 사진을 보면 O₂/Ar+O₂에서 O₂ pressure가 증가할수록 두께가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 O₂가 증가하게 되면 i-ZnO 막의 성장을 방해 한다는 것을 생각해 볼 수 있다. Table 4는 두께를 관측한 것을 토대로 deposition rate를 구한 것을 나타낸다. O₂ pressure가 증가할수록 deposition rate 이 0.147 Å/s (O₂/Ar+O₂~1%), 0.119 Å/s (O₂/Ar+O₂~25%), 0.115 Å/s (O₂/Ar+O₂~50%)로 감소하였다. Electrical properties를 측정하기 위해서 Hall measurement와 4point를 사용하였는데 i-ZnO film의 Resistivity 값이 너무 커서 측정 범위 값에 포함되지 않아서 구할 수가 없었다. Fig. 7은 Film들의 Transmittance를 측정한 것이다. 여기서 보면 650 nm 이전에서는 O₂ pressure가 증가함에 따

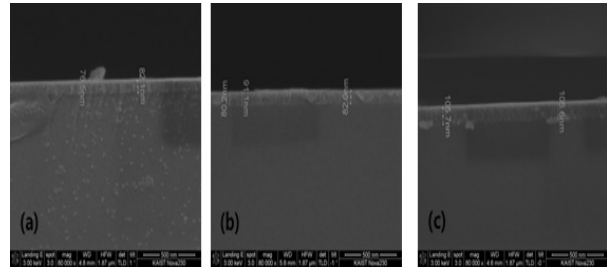


Fig. 6. Cross-sectional SEM images of i-ZnO films with Ar:O₂ ratio of (a) 10:10, (b) 15:5, and (c) 20:1

Table 4. Deposition rate of i-ZnO film (Ar:O₂)

i-ZnO (Ar:O ₂)	Deposition rate (Å/S)
10:10	0.115
15:05	0.119
20:01	0.147

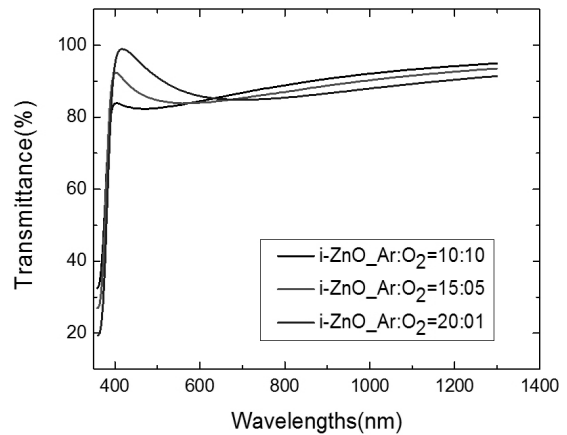


Fig. 7. Transmittance of i-ZnO film with various Ar:O₂ ratios

Table 5. Thickness of i-ZnO film (Ar:O₂)

i-ZnO (Ar:O ₂)	Thickness (nm)
10:10	82.6
15:05	85.6
20:01	105.6

라서 Transmittance가 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이는 O₂ pressure가 증가함에 따라서 결정성이 나빠져서 Scattering이 많이 발생하게 된다고 생각해 볼 수 있다. 650 nm 이후에는 O₂ pressure가 감소함에 따라서 Transmittance가 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이는 O₂ pressure가 감소하면서 전자농도가 높게 되어 free carrier에 의한 scattering에 의한 것으로 생각해 볼 수 있다. Fig. 7을 토대로 O₂/Ar+O₂가 transmittance에 상당한 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. Fig. 8과 Table 6은 film들의 XRD를 측정한 것이다. Fig. 9에서 보면 34.2°에서 Peak이 관찰 된 것을 알 수 있다. O₂/Ar+O₂가 증가할수록 peak의 intensity가 감소하게 된다. 이는 Table 6에서의 grain size와 연관 되는 것으로 보인다.

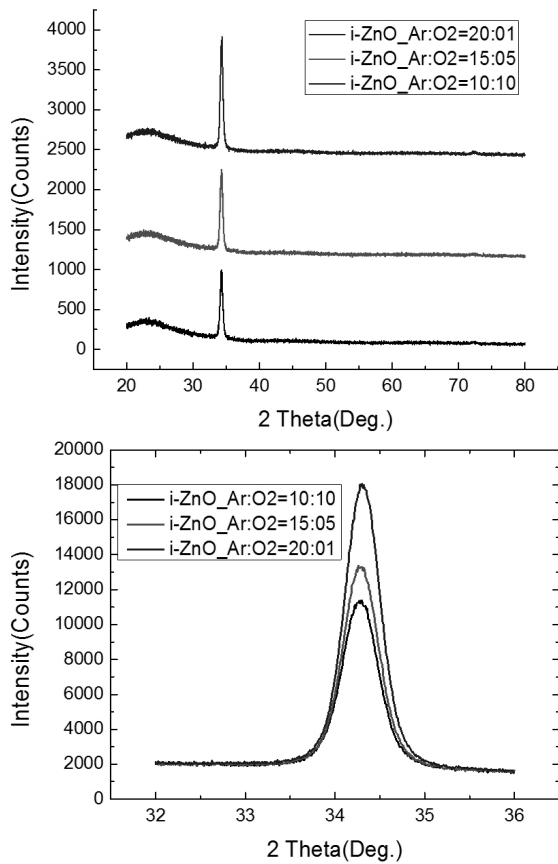
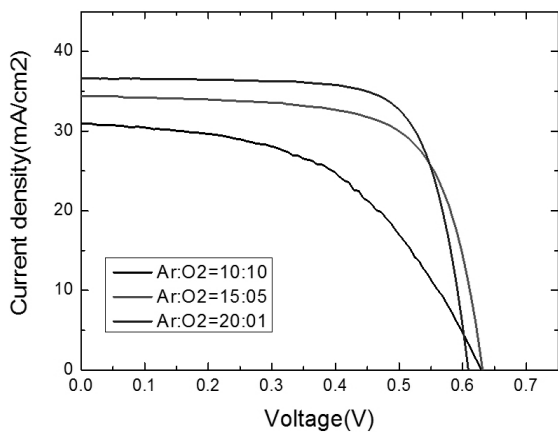


Fig. 8. XRD Patterns of i-ZnO film with various Ar:O₂ ratios

Table 6. Analysis results of XRD

i-ZnO (Ar:O ₂)	2-Theta (Deg.)	FWHM	Crystal size (Å)
10:10	34.251	0.453	188
15:05	34.258	0.446	191
20:01	34.279	0.437	196



	Eff (%)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	R _{sh} (ohm)	R _s (ohm)
Ar:O ₂ =10:10	9.93	0.629	30.96	50.94	495.01	14.33
Ar:O ₂ =15:05	14.99	0.631	34.40	69.06	1855.29	4.23
Ar:O ₂ =20:01	16.35	0.609	36.65	73.29	2796.86	3.72

Fig. 9. Photovoltaic properties of CIGS solar cell with various Ar:O₂ ratios

O₂/Ar+O₂가 증가할수록 grain size도 감소하게 된다. Fig. 9는 O₂/Ar+O₂의 ratio에 따라서 Cell을 제작하여서 Photovoltaic properties를 측정한 값이다. 여기서 보면 O₂/Ar+O₂가 증가할수록 Series resistance의 값이 증가 하는 것을 알 수 있다. 이는 i-ZnO는 O₂/Ar+O₂가 증가할수록 resistivity값이 증가 하게 된 것에 기인한 결과 값이라 추측해 볼 수 있다. 또한, O₂/Ar+O₂가 증가할수록 Current density가 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이를 알아보기 위해서 Q.E를 측정하였다. Fig. 10은 Q.E 측정값이다. 여기서 보면 O₂/Ar+O₂가 증가할수록 Q.E가 전체적으로 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이를 근거로 Current density가 낮아지는 것을 설명 할 수 있다.

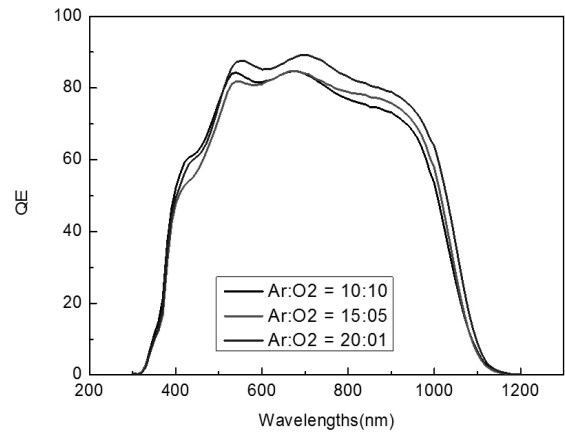


Fig. 10. Spectral quantum efficiency of CIGS cells with various Ar:O₂ ratios

Table 7. Effect of Al thickness on cell performance

Al_400nm	Eff (%)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	R _{sh} (ohm)	R _s (ohm)
#1	15.82	0.646	32.67	75.03	23265.43	3.81
#2	15.60	0.622	33.52	74.88	5816.36	3.86
#3	14.73	0.618	33.28	71.66	2585.05	4.98
#4	16.05	0.631	33.32	76.31	11131.79	3.63
#5	16.15	0.623	34.05	76.18	2326.54	3.64
Average	15.67	0.628	33.37	74.81	9025.03	3.98

Al_3um	Eff (%)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	R _{sh} (ohm)	R _s (ohm)
#6	15.14	0.646	31.03	75.55	3877.57	3.64
#7	14.57	0.617	31.08	75.93	7495.40	3.57
#8	14.48	0.595	32.56	74.81	2498.47	3.57
#9	14.50	0.619	31.36	74.74	4653.09	3.58
#10	14.38	0.586	32.81	74.79	21595.66	3.32
Average	14.61	0.613	31.77	75.16	8024.04	3.54

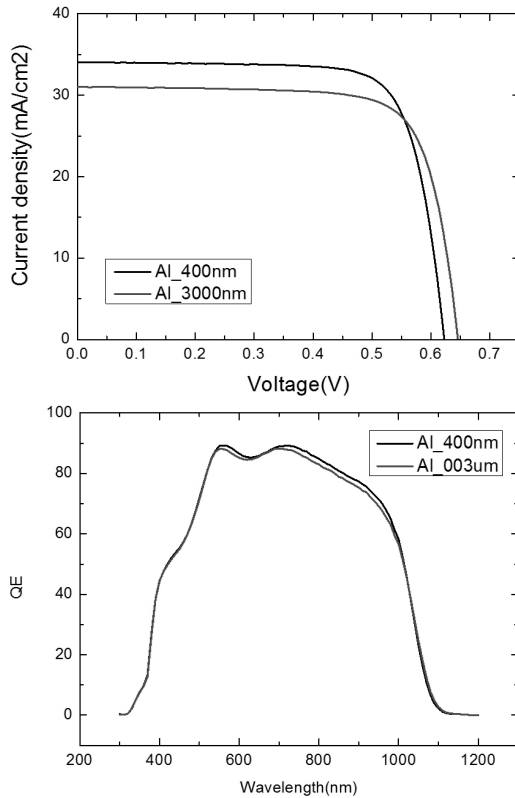


Fig. 11. Best cells with different Al thickness

Table 8. Effect of Ni interlayer

Al_3um	Eff (%)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	R _{sh} (ohm)	R _s (ohm)
#1	11.28	0.659	24.47	69.95	2012.99	4.72
#2	11.91	0.657	24.71	73.41	2012.99	4.37
#3	11.44	0.654	23.26	75.26	1717.48	4.38
#4	12.18	0.657	24.46	75.76	3019.49	4.31
#5	10.72	0.641	22.52	74.27	2115.04	4.45
#6	10.93	0.655	23.34	71.49	4025.99	4.56
Average	11.41	0.654	23.79	73.36	2484.00	4.46

Ni_50nm Al_3um	Eff (%)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	R _{sh} (ohm)	R _s (ohm)
#7	11.93	0.678	24.23	72.54	4174.42	4.79
#8	10.64	0.670	21.18	74.96	24155.97	4.96
#9	10.24	0.665	20.62	74.69	3450.85	5.13
#10	11.94	0.674	23.46	75.47	24155.97	4.44
#11	11.10	0.657	24.32	69.51	8051.99	5.27
Average	11.17	0.669	22.76	73.43	12797.84	4.92

3.3 Al 두께와 nickel 사용에 따른 electrode 층의 특성 변화

Table 7은 Al을 400 nm와 3 um로 증착 한 cell들의 Photovoltaic properties를 나타낸다. Al의 두께가 증가함에 따라서 Efficiency, open circuit voltage, current density가 떨어지는 것

을 알 수 있다. 이는 3 um로 증착 한 cell의 경우에는 e-beam evaporation되는 과정에서 grid의 폭이 넓어져서 인 것 같다. Fig. 11은 400 nm, 3 um 증착 한 cell중에서 효율이 높았던 것을 비교한 것이다. 여기서 보면 Al 400 nm인 것이 Al 3 um 보다 Current density가 높은 것을 알 수 있다. 이유를 확인 하기 위해서 QE를 측정해 보았다. QE에서 보면 Al 400 nm로 증착 한 것이 Al 3 um으로 증착 한 것 보다 전체적으로 QE 값이 증가한 것을 알 수 있었다.

Table 8은 Al 3 um 증착 시에 Ni layer의 존재 여부에 따른 Photovoltaic properties의 특성을 비교한 것이다. 여기서 보면 Ni layer를 사용한 Cell들의 값의 Open circuit voltage의 값이 증가한 것을 알 수 있다. 그러나 Current density가 감소하게 되어서 효율의 변화가 없었다. Al 증착 시에 Ni를 증착 하면 current 수집과 낮은 resistance를 얻을 수 있다고 알려져 있다^{15,17,18,19}.

4. 결론

CIGS 태양전지는 다양한 층들이 증착 이 되어진 결과물이다. 이번 실험에서는 태양전지 층들 중에서 ZnO:Al, i-ZnO, electrode 층들의 변수를 주어서 Photovoltaic properties에 어떠한 영향을 끼치는지에 대해 알아보았다.

ZnO:Al은 Power가 200 W 일 때 resistivity의 값이 작게 나왔다. 이를 태양전지에 적용한 결과 series resistance의 값 또한 작아진 것을 확인 할 수 있다. 이는 다른 power에서 증착 하는 것 보다 좋은 특성을 가지는 Al doped zinc oxide 층을 제작할 수 있을 것이다. 또한 태양전지의 효율을 높이는 데도 기여 을 할 것이라 예상된다.

i-ZnO는 O₂ pressure가 증가함에 따라서 광학적인 특성이 안 좋아지는 것을 알 수 있다. 이를 태양전지에 적용하여서 Photovoltaic properties를 관측한 결과에서도 특성들이 안 좋아지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 O₂ pressure를 증가하는 것은 태양전지 제작에 있어서 효율을 높이는 데 부적합 하다는 것을 알 수 있다.

Electrode 층에서의 Al 두께 변화와 Ni층의 유무에 대해서 Photovoltaic properties를 관측 하였다. Al을 3 um까지 증착 시키는 것과 Ni층을 사용하는 것이 두 가지의 factor는 효율을 증가시키지 못했다. 이는 Al의 3 um 증착과 Ni층의 적용은 부적합 하다는 것을 알 수 있다. 이는 추후에 Al의 두께를 변화 시켜서 최적화된 것을 찾고, Ni을 적용 한다면 효율을 높이는 데 기여 을 할 수 있을 것이라 예상된다.

세 가지의 층들을 변화를 시킴에 따라서 태양전지 특성 변화에 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. 추후에 세 가지의 층들에 다른 변수를 주어서 최적화된 조건을 찾는 다면 현재 보다 더 높은 효율을 가지는 태양전지 제작을 할 수 있을 것이라 예상된다.

Acknowledgement

This work was financially supported by the Center for Inorganic Photovoltaic Materials (No. 2012-0001167), funded by the Korea Ministry of Education, Science, and Technology.

References

1. J. N. Alexander, S. Higashiya, D. Caskey Jr, H. Efstathiadis, P. Haldar, Deposition and characterization of cadmium sulfide (CdS) by chemical bath deposition using an alternative chemistry cadmium precursor, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 125, 47-53, 2014.
2. K. Ellmer, Magnetron sputtering of transparent conductive zinc oxide: relation between the sputtering parameters and the electronic properties, *J. Phys. D : Appl. Phys*, 33, R17-R32, 2000.
3. J. Hu, R.G. Gordon, Textured aluminum-doped zinc oxide thin films from atmospheric pressure chemical-vapor deposition, *J. Appl. Phys.*, 71, 880, 1992.
4. Je-hsiung Lan, Jerzy Kanicki, An Alternative Transparent Conducting Oxide to ITO for the a-Si:H TFT-LCD Applications, 54-57, AMLCDs'95 2nd International Workshop, 1995.
5. S. Ishizuka, K. Sakurai, A. Yamada, K. Matsubara, P. Fons, K. Iwata, S. Nakamura, Y. Kimura, T. Baba, H. Nakanishi, T. Kojima, S. Niki, Fabrication of wide-gap Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ thin film solar cells: a study on the correlation of cell performance with highly resistive i-ZnO layer thickness, *Solar Energy Mater. solar cells*, 87, 1-4, 541-548, 2005.
6. F. Couzinie-Devy, N. Barreau, J. Kessler, Dependence of ZnO:Al properties on the substrate to target position in RF sputtering, *Thin Solid Films*, 516, 7094-7097, 2008.
7. D.C. Look, Recent advances in ZnO materials and devices, *Mater. Sci. Eng*, B80, 383, 2001.
8. D. S. Wiersma, The smallest random laser, *Nature*, 406, 132-133, 2000.
9. P. H. Holloway, T. A. Trottier, B. Abrams, C. Kondoleon, S. L. Jones, J. S. Sebastian, W. J. Thomes and H. Swart, Advances in field emission displays phosphors, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 17, 758, 1999.
10. H. Cao, J. Y. Xu, D. Z. Zhang, S. H. Chang, S. T. Ho, E. W. Seelig, X. Liu, and R. P. H. Chang, Spatial confinement of laser light in active random media, *Phys. Rev. Lett*, 84, 5584-5587, 2000.
11. M.A. Contreras, J.R. Tuttle, A. Gabor, A. Tennant, K. Ramanathan, S. Asher, A. Franz, J. Keane, L. Wang, J. Scofield, and R. Noufi/ High efficiency Cu(In,Ga)Se₂-based solar cells: Proc. novel absorber structures, 68-75, 24th IEEE Photovolt, Special Conf., 1994.
12. K. Ramanathan, M. A. Contreras, C. L. Perkins, S. Asher, F. S. Hasoon, J. Keane, D. Young, M. Romero, W. Metzger, R. Noufi, J. Ward and A. Duda, Properties of 19.2% Efficiency ZnO/CdS/CuInGaSe₂ Thin-film Solar cells, *Prog. Photovolt: Res. Appl*, 11, 225-230, 2003.
13. P. Jackson, D. Hariskos, E. Lotter, S. Paetel, R. Wuerz, R. Menner, W. Wischmann and M. Powalla, New world record efficiency for Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells beyond 20%, *Prog. Photovolt: Res. Appl*, 19, 894-897, 2011.
14. O. Cao, O. Gunawan, M. Copel, K. B. Reuter, S. J. chey, V. R. Deline, and D. B. Mitzi, Defects in Cu(In,Ga)Se₂ Chalcopyrite Semiconductors: A Comparative Study of Material Properties, Defect States, and Photovoltaic Performance, *Adv. Energy Mater*, 1, 845-853, 2011.
15. A. Chirila, P. Bloesch, S. Seyrling, A. Uhi, S. Buecheler, F. Pianezzi, C. Fella, J. Perrenoud, L. Kranz, R. Verma, D. Guettler, S. Nishiwaki, Y.E. Romanyuk, G. Bilger, D. Bremaud and A.N. Tivari, Cu(In,Ga)Se₂ solar cell grown on flexible polymer substrate with efficiency exceeding 17%, *Prog. Photovolt: Res. Appl*, 19, 560-564, 2011.
16. P. Reinhard, A. Chirila, F. Pianezzi, S. Nishiwaki, S. Buecheler and A. N. Tivari, High efficiency flexible Cu(In,Ga)Se₂ Solar cells, 79-82, AM-FPD 2013 20th International Workshop, 2013.
17. P. Liska, K. R. Thampi, M. Gratzel, D. Bremaud, D. Rudmann, H. M. Upadhyaya, and A. N. Tiwari, Nanocrystalline dye-sensitized solar cell/copper indium gallium selenide thin-film tandem showing greater than 15% conversion efficiency, *Appl. Phys. Lett.*, 88, 20310, 2006.
18. M. B. Ard, K. Granath, L. Stolt, Growth of Cu(In,Ga)Se₂ thin films by coevaporation using alkaline precursors, *Thin Solid Films*, 361, 9-16, 2000.
19. Malm U, Edoff M, Influence from front contact sheet resistance on extracted diode parameters in CIGS solar cells, *rog. Photovolt: Res. Appl.*, 16, 113-121, 2008.
20. Chia-Hua Huang, Hung-Lung Cheng, Wei-En Chang, and Ming-Show Wong, Comprehensive Characterization of DC Sputtered AZO Films for CIGS Photovoltaics, *J. Electrochem. Soc.*, 158, H510-H515, 2011.