Current Photovoltaic Research 6(2) 56-61 (2018)
DOI:https://doi.org/10.21218/CPR.2018.6.2.056
pISSN 2288-3274
eISSN 2508-125X

다양한 두께의 KF로 후증착열처리된 Cu(In,Ga)Se2 광흡수층의 태양전지 성능 변화

배진아 · 송유진 · 전찬욱*
화학공학과, 영남대학교, 경산시, 38541

Performance Variation of Cu(In,Ga)Se2 Photovoltaic Absorber Post-deposition Treated with Different KF Thickness

Jin A Bae · Yu Jin Song · Chan Wook Jeon*
Department of Chemical engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Korea

Received Jun 4, 2018; Revised Jun 10, 2018; Accepted June 11, 2018

ABSTRACT: In this study, CIGS absorber layers were deposited on low-alkali glass and sodalime glass substrates and potasium floride (KF) of various thicknesses was supplied at an elevated temperature after the CIGS growth. The effect of KF post-deposition treatment on the two types of substrates was extremely different. On the low-alkali substrate, the open-circuit voltage (Voc) was improved but the fill-factor (FF) degradation was severe, whereas the sodalime substrate showed Voc deterioration and FF improvement. In the case of supplying 20 nm of KF on both substrates, the efficiency gain of 0.3~1.1%p was obtained. With increasing the KF thickness, a small protrusion-like microstructure developed on the surface of the absorber layer, and the microstructures that were not removed in the subsequent process were found to be the main cause of the FF loss.

Key words: CIGS, Thin film solar cell, Alkali element

Nomenclature

eV : electron volt

Subscript

SEM : scanning electron microscope
XRD : x-ray diffraction
CFT : capacity voltage temperature
MIV : microscope current voltage

1. 서 론

Cu(In,Ga)Se2 (CIGS) 태양전지는 높은 안정성 및 변환효율에 비해 저비용 제작이 가능하다는 장점으로 인해 집중적인 연구개발 대상이 되어왔다. 기판과 형태에 대한 제약이 낮기 때문에 다양한 기능과 용도로 제작될 수 있으므로, 다양한 응용분야 개척이 가능하다는 부가적인 장점도 가진다[1]. 태양전지 시장이 급속히 팽창함에 따라 연구 분야도 다양한 방향으로 확장되고 있다. 특히 CIGS 광흡수층에 대한 Na의 영향이 밝혀진 이후로 여러 종류의 알칼리 원소들을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 최고 효율을 기록한 연구에서는 Na 뿐만 아니라 K, Rb, Cs 등의 다양한 알칼리 원소를 사용한 경우에도 Na과 유사한 효과를 얻을 수 있으나, 개별 알칼리 원소들이 미치는 영향은 서로 차이를 보인다는 사실 또한 확인되었다[2,3].

현재까지 밝혀진 알칼리 원소의 영향은 다음과 같이 정리할 수 있다. 광흡수층 형성 공정 중에 기판으로부터 공급되는 Na는 Ga의 상호확산(interdiffusion)을 저하시켜 3-stage co-evaporation 공정에서 밴드갭 경사(band gap grading) 생성을 더 수월하게 한다[4]. 결정립 크기에 미치는 영향은 상반된 결과들이 보고되었다[4,5]. 또한, Na은 흡수층 내 캐리어 농도를 증가시켜 p-type 전도도를 향상시킨다[6]. 한편, KF의 후증착열처리(KF-PDT, post deposition treatment)는 CIGS/CdS 간의 계면 품질을 개선시켜 개방전압(Voc), 충진율(FF, fill factor)의 향상을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 단파장에서의 전류포집효율을 증가시킨다[7,8,9]. Voc와 FF의

*Corresponding author: cwjeon@ynu.ac.kr

ⓒ 2018 by Korea Photovoltaic Society
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

증가는 Na의 효과로도 알려져있기 때문에 알칼리 효과라고도 한다. 반면 몇몇 연구결과에서는 KF-PDT가 FF를 저하시키기도 했다[10,11].

이와 같이 알칼리 원소는 양적인 차이 혹은 미세한 공정요소의 차이로도 태양전지의 성능을 저하 혹은 향상시킬 수 있기 때문에 사용된 흡수층에 따라 최적 조건이 달라지며, 따라서, 효율 향상 메커니즘도 달라질 수 있다. 그러므로 좀 더 다양한 조건들에 대해 알칼리-PDT 효과에 대한 검증 결과가 요구된다.

본 연구에서는 Na이 포함된 soda lime glass (이하 SLG) 기판과 알칼리 함량이 극소량인 저알칼리 유리기판(이하 low alkali glass, LAG) 등의 두가지 종류의 기판을 사용하여 KF-PDT 효과를 관찰하였다. SLG 기판에서의 연구는 흡수층 내 포함된 Na이 KF-PDT에 미치는 영향을 파악할 수 있는 반면, LAG 기판 연구는 Na과 무관한 KF-PDT 의 효과를 분리하여 해석할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 실험 방법

기판과 KF PDT에 따른 결과를 확인하기 위해 본 연구에서는 알칼리 원소의 함량이 서로 다른 두가지 기판 SLG, LAG를 사용하였다. 후면전극인 Mo는 DC 스퍼터링을 이용해 증착되었다. 흡수층은 3-스테이지 동시증발공정으로 증착되었으며, Cu/(Ga+In)=0.85, Ga/(Ga+In)=0.37의 조성비를 갖는다. 증착이 끝난 후 기판온도를 400°C로 냉각한 후, 동일한 챔버 내에서 KF PDT가 연속적으로 수행되었다. KF PDT의 주요변수는 KF 증착 두께로서, 0, 10, 20, 30 nm로 변화시켰다. KF 증발속도를 고정하여 KF 공급시간에 차이를 뒀으며, 상이한 공급시간에 따른 annealing 효과의 차이를 방지하기 위해 총 PDT 시간은 900초로 고정하였다. 처리된 흡수층 박막은 KCN 용액으로 1분간 표면을 식각한 후 용액성장법(CBD, chemical bath deposition)으로 CdS 버퍼층을 50 nm 두께로 증착하였다. 투명전극층은 유기금속화학증착법(MOCVD, metal organic chemcal vapor deposition)으로 i-ZnO 100nm, B:ZnO 350 nm를 증착하였으며 B:ZnO는 200°C에서 증착되었다. 전류포집그리드는 전자빔증발법을 이용해 Ni 100 nm/Ag 1.65 μm로 형성시켰다.

3. 실험 결과

3.1 전류-전압 곡선

Fig. 1은 기판 및 KF 두께에 따른 태양전지의 I-V 곡선을 나타내며, 성능파라미터를 Table 1에 요약하였다. LAG는 KF 두께가 두꺼워질수록 V_{oc}가 지속적으로 상승한다. 그러나, 30 nm에서 FF가 대폭 하락하며 V_{oc}의 증가 경향도 둔화되었다. J_{sc} 또한 감소하며, 두께를 30 nm 이상으로 증가시키더라도 성능 개선은 없을 것으로 예상된다. 반면 SLG는 미처리 샘플과 20 nm 샘플

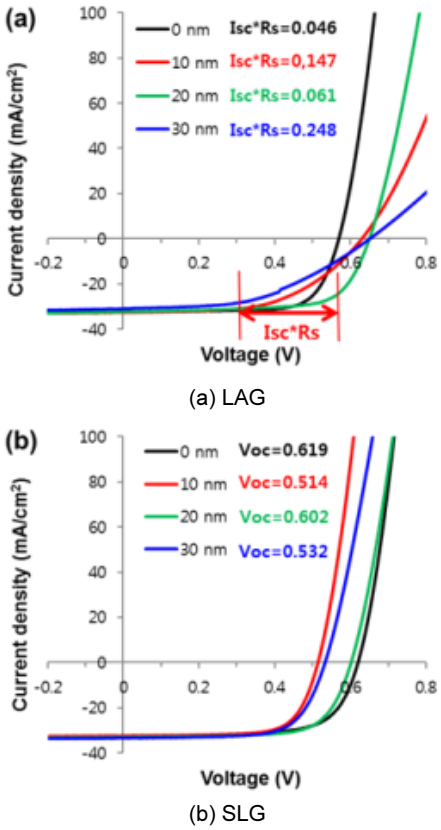

Fig. 1. Current density–Voltage curves for solar cell depending on the substate and KF thickness

Table 1. Solar cell performance parameters with repsect to the substate and KF thickness

	KF (nm)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF (%)	Eff. (%)	I sc * R s (V)
LAG	0	0.568	32.34	73.36	13.5	0.046
	10	0.629	32.46	54.34	11.1	0.147
	20	0.649	32.33	69.72	14.6	0.061
	30	0.652	31.15	47.91	9.7	0.248
SLG	0	0.619	33.26	67.71	13.9	0.050
	10	0.514	32.17	71.69	11.8	0.045
	20	0.602	33.19	70.94	14.2	0.052
	30	0.532	33.30	69.13	12.3	0.057

이 유사한 효율을 보였으나. V_{oc}는 처리된 모든 샘플에서 감소하고, FF는 모든 두께 조건에서 개선되었다. 하지만 10 nm에서 FF가 최대값을 보임에도 불구하고 효율 개선이 없었으므로, 그 이상의 KF 두께는 성능개선 효과가 없을 것으로 판단된다.

LAG의 경우, 효율은 FF 변화 경향에 지배적인 의존성을 보였다. 반면 SLG는 V_{oc}의 변화가 가장 지배적이며, 나머지 성능파라미터의 변화는 적다. FF는 다이오드 식 (1)에 따라 I*Rs에 영향을 받는다. I*Rs 값이 커지면 실제로 가한 전압보다 낮은 전압에서 확산전류가 흐르기 시작하므로 FF가 저하된다. 반면, SLG는 단락전류 및 Rs 값에 큰 차이를 보이지 않았다.

$$I = I_{th}\left(e^{\frac{q(V-IR_s)}{AkT}} - 1\right) + \frac{V-IR_s}{R_{sh}} - I_{op} \quad (1)$$

3.2 도핑농도, 양자효율

Fig. 2(a)에서 보인 바와 같이, SLG가 LAG에 비해 전체적으로 도핑농도가 높다. 이는 기판에서 확산공급된 Na은 흡수층 전 영역에 분포하는 반면, K는 흡수층 표면영역에 국한되므로, Na이 도핑농도에 더 큰 영향을 준 것으로 이해할 수 있다. 하지만 각 기판에서 도핑농도가 10^{15}/cm^3 수준으로 최대 30% 정도의 차이를 보이는데, 수식 (2)로부터 환산된 Voc 변동은 0.01 V 미만으로서 제시된 태양전지 성능 차이를 설명할 수 없다[12].

$$V_{oc} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_a + \Delta n + n}{n_i^2}\right) \quad (2)$$

Fig. 2(b)는 각 태양전지의 양자효율을 보여준다. LAG 소자의 단파장 양자효율이 SLG에 비해 낮다는 사실을 제외하면 전체적으로 KF 두께 및 KF PDT 처리에 따른 유의차는 없었다. 단파장 양자효율은 차이는 CdS 두께 차이에서 비롯되었으며, 상이한 시점에서 버퍼층 증착이 이뤄졌기 때문이다. 한편, Na 존재하에 KF PDT 처리된 경우 태양전지의 V_{oc} 및 FF의 저하를 일으키지 않고 CdS의 두께를 감소시킬 수 있다는 보고가 있다. 이는 KF가 표면에 공급될 경우 강하게 Cu를 고갈시키는데, 이렇게 표면에 고갈된 Cu 공핍층이 Cd가 Cu vacancy site를 점유하는 경향에 의한 현상이라는 모델이 제시되어 있다[3]. 따라서 Na이 포함된 박막에서 KF PDT의 최적화를 수행할 경우, CdS 두께를 함께 고려해야 할 것으로 판단된다.

3.3 X-ray Diffraction

Fig. 3은 KF 두께 및 기판이 CIGS 결정성에 미치는 영향을 보여준다. 모든 샘플에서 (220) 우선배향임을 알 수 있다. Na이 (112) 우선배향성을 향상시킨다는 보고가 있긴 하지만 본 실험

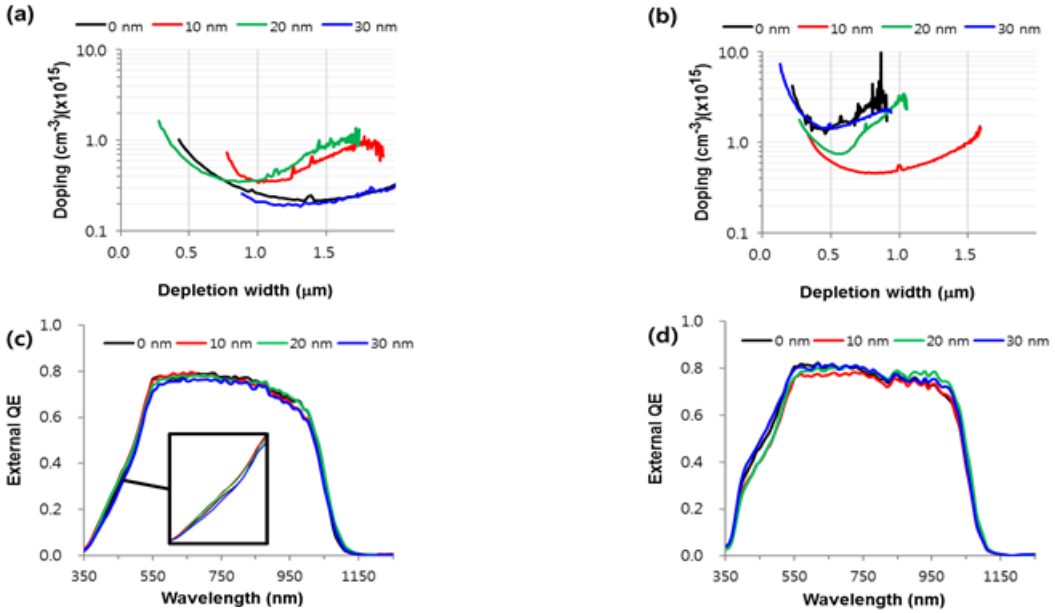

Fig. 2. Doping concentration in the absorber formed on (a) LAG and (b) SLG substrates, and quantum efficiency of solar cells fabricated with (c) LAG and (d) SLG

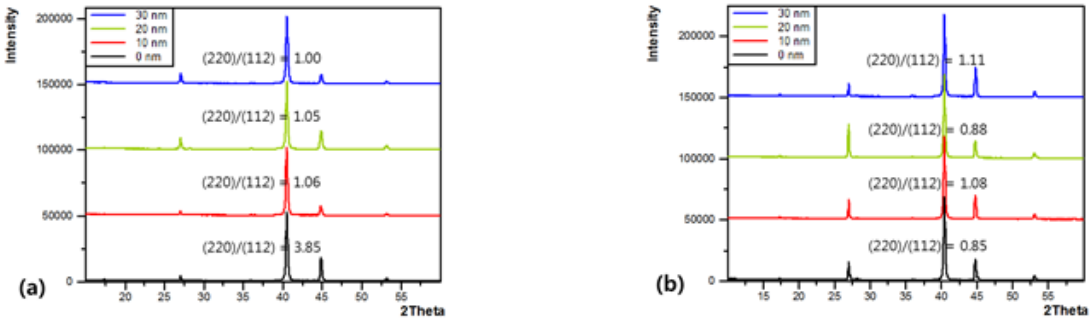

Fig. 3. X-ray Diffraction patterns of CIGS layers having various KF-PDT conditions and formed on different substrates ; (a) LAG and (b) SLG

에서는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 본 연구에서 제작된 모든 흡수층은 (220)우선배향을 보이고, (220)/(112) 피크 강도비의 차이는 run-to-run 공정의 차이로 이해할 수 있다. PDT는 CIGS 결정성장온도인 530°C보다 낮은 400°C의 저온으로 진행되기 때문에 PDT 자체는 결정배향에 영향을 주기 어렵기 때문이다. 따라서 XRD 데이터에서 볼 수 있는 것은 기판에 따른 차이에 해당하며, KF-PDT는 CIGS 결정성에 영향을 주지 않았다고 결론지을 수 있다.

3.4 어드미턴스(admittance)

온도별 주파수에 따른 capacitance를 측정할 경우 흡수층에 존재하는 결함의 에너지준위와 결함밀도를 계산할 수 있다. Fig. 4(a)와 (b)는 10 K 간격으로 100~320 K 온도범위에 대해 캐패시턴스의 주파수 특성을 나타내고 있다. 심준위 결합(deep level defect)은 낮은 주파수 및 높은 온도에서 활성화될 수 있으며, 천준위 결함(shallow level defect)은 높은 주파수 혹은 낮은 온도에서도 활성화될 수 있으므로, 곡선의 계단 위치로부터 결함의 에너지를, 계단의 높이로부터 심준위 결함의 밀도를 짐작할 수 있다.

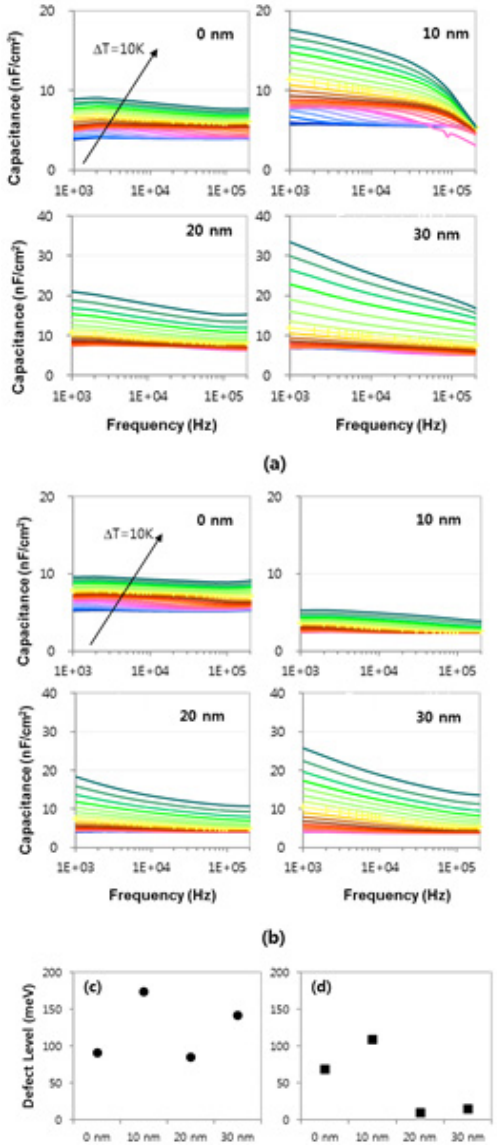

Fig. 4. Capacitance-frequency-temperature curves and defect activation energies for the solar cells fabricated with different substrates and KF PDT thicknesses; (a),(c) LAG and (b), (d) SLG

$$E_\omega = k_B T \ln\left(\frac{2\xi_0 T^2}{\omega}\right) \quad (3)$$

미처리 샘플에서는 모두 100 meV 이하의 활성화에너지를 갖는 천준위 결함이 존재하며, SLG 소자가 더 낮은 결함에너지를 갖는다. Na는 CIS 박막 내 Se vacancy, V_{Se}를 passivation 시키는데, 특히 산화가 잘 되는 표면에 비해 박막 내부 결정립계의 V_{Se}을 제거하기 위해 반드시 필요하다. SLG의 경우, Na이 공정 중에 박막으로부터 공급되므로 결함에너지가 LAG에 비해 더 낮다. 10 nm 경우를 제외하면, KF PDT로 인해 결함에너지가 천준위 상태를 유지하는 것도 LAG와 대비된다.

SLG에서도 10 nm 경우를 제외하면 KF PDT에 의해 결함에너지가 더 낮아졌다. 기판 종류와 무관하게 10 nm 처리된 소자에서 높은 활성화에너지를 가진 결함이 검출된 점은 CIGS 제조공정의 차이로 인해 흡수층 자체의 품질이 다른 것도 원인이 될 수 있다. 그럼에도 불구하고, Na이 없는 LAG에서 K의 혼입효과는 크지 않음을 알 수 있다. 한편, 캐패시턴스 계단의 높이 차이로부터 KF 두께가 증가함에 따라 심준위 결함의 밀도는 증가하며, 30 nm에서 급격한 증가를 보인다. 이러한 심준위 결함들에 의한 고온 캐패시턴스 곡선의 계단은 측정된 주파수 범위 내에서 뚜렷하지 않기 때문에, Fig. 4(c)와 (d)에는 나타내지 않았음을 주의해야 한다. 결론적으로, KF PDT에 의해 심준위 결함이 오히려 증가하는 경향이 나타났으며, 태양전지의 효율 개선이 이뤄지지 않은 이유로 판단된다.

3.5 표면 분석

Fig. 5에 나타낸 바와 같이, LAG 흡수층 표면에 KF 두께가 증가할수록 수십 nm 크기의 작은 돌기가 흡수층 결정 표면에 형성되나, SLG에서는 이러한 미세구조 변화가 상대적으로 약하다. 특히 LAG에서 미세구조의 크기가 크고 facet을 가진 덩어리 결정도 관찰된다. 이러한 결정 발생이 FF 저하에 기여한 것으로 판단된다. 하지만 알칼리 원소는 수분과 매우 반응을 잘 하기 때문에 용액공정인 CBD 공정 중 대부분의 돌기가 사라질 것이라고 생각된다. 실제로, KCN etching 이후 표면 SEM 이미지를 분석했을 때, 작은 돌기는 사라지지만 크게 생성된 날카로운 결정은 일부 잔류하였으며(Fig. 5(c)), SEM-EDS 분석을 통해 잔류한 거대 결정은 KF임을 확인하였다. Fig. 6은 마이크로 전류-전압

(이하 MIV) 측정으로부터 얻은 FF 분포도이다. 통상 태양전지의 IV 측정은 쏠라시뮬레이터를 이용해 샘플 전체에 광을 조사하여 효율을 측정하기 때문에 수많은 p-n 접합의 평균 성능을 나타낸다. 본 연구팀에서 자체 개발한 MIV의 경우 광학현미경 상에서 집속된 레이저를 광원으로 사용하여, 수십 μm 지름의 국부적인 영역에서 pn 다이오드의 성능을 평가할 수 있기 때문에 소자의 면방향 불균일성을 파악하기 용이하다. 본 결과에 사용한 데이터는 가로 x 세로 총 400 pt를 0.39 mm 간격으로 측정한 결과에 해당한다.

SLG 미처리샘플과 30 nm샘플에 비해 LAG 30 nm샘플의 FF가 매우 낮은 것은 앞서 제시된 소자 전체 IV 결과를 반영한다. 이 분석으로 얻고자 한 것은 KF PDT로 인한 흡수층 표면성질 변화에 기인된 FF 불균일 발생 여부이다. SLG의 미처리샘플인 Fig. 6(a)에서는 성능분포가 가장 균일하였다. 소자 외곽의 가장자리와 그리드 지역은 FF가 매우 낮은 연두색으로 나타나있다. 측정 포인트 간격이 비교적 크기 때문에 0.2 mm 선폭을 가지며, 왼쪽으로 누운"主" 모양의 그리드가 일부만 나타나있다. 반면 Fig. 6(b)는 동일한 SLG임에도 불구하고 표면 불균일이 더욱 강하게 나타난다. Fig. 6(c)는 LAG의 30 nm 처리 샘플로서, 마찬가지로 표면 불균일이 가장 심하게 관찰되었다. 특히 앞서 측정된 샘플과는 다르게 grid 구역이 아닌 곳에서 FF가 심하게 저하된 곳이 확인된다. 이는 Fig. 5에서 설명했던 표면 잔류 결정에 의한 영향으로 추측된다. Fig. 5의 LAG 30 nm 샘플에서 관찰된 결정 크기는 대략 1~2 μm이지만 이러한 결정이 밀집되어있거나 SEM에서 관찰되지 않은 더 큰 결정이 존재해 심각한 열화를 야기한 것으로 판단된다.

Na이 포함된 기판에서 Cu(In,Ga)Se2를 증착할 경우 공정 중에 박막으로 공급된 Na이 표면에 불균일하게 분포할 수 있으며[13], 흡수층 표면을 장기간 보관 후 확인한 결과 산화가 심하게 이루어지는 부분이 국소적임을 관찰할 수 있었다(Fig. 7) 알칼리원소는 산화를 촉진시키기 때문에 검은 반점이 많은 구역에서 Na이 많음을 짐작해볼 수 있다. 또한 SLG 샘플은 시간이 얼마 지나지 않아도 반점이 생기지만 LAG의 경우 거의 2년이 지나도 반점이 생기지 않았다. 따라서 공정 후 표면에 점차 발생하는 검은 반점은 Na에 의한 것으로 판단할 수 있다. Fig. 6에 따르면 KF PDT를 하지 않은 SLG에서는 FF 불균일성이 관찰되지 않았고, KF PDT 30 nm 처리된 샘플에서는 SLG와 LAG 모두 표면 반점이 발생하였다. 따라서 기판 내 Na의 국소적 축적은 FF에 영향을 주지 않는다고 판단할 수 있으며 KF PDT로 인해 나타난 증상이라는 것을 증거한다. SLG 30 nm에서는 LAG 30 nm 샘플처럼 크게 열화된 지점은 없지만 미처리 샘플에 비해 불균일한 모습을 보이는데, 이는 표면에서 Na와 K가 어떤 상호작용을 일으키

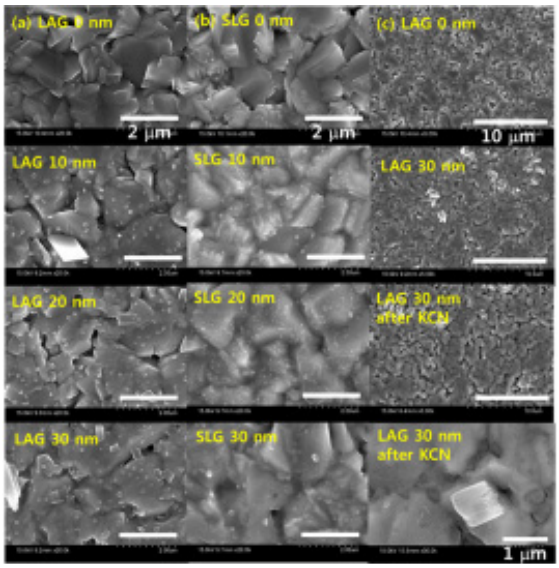

Fig. 5. SEM plan-view images of the absorbers formed on (a) LAG, (b) SLG substrates, and (c) surface images taken after KCN etching of CIGS on LAG

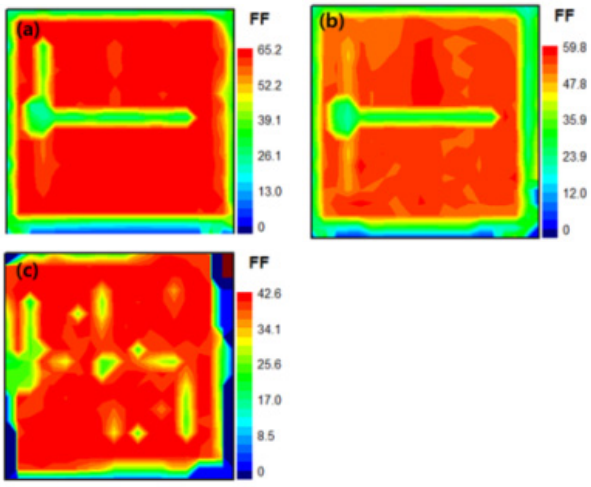

Fig. 6. Areal distribution of FF of the solar cells with different substrate and KF thickness; (a) no treatment on SLG, (b) 30 nm KF on SLG, and (c) 30 nm KF on LAG

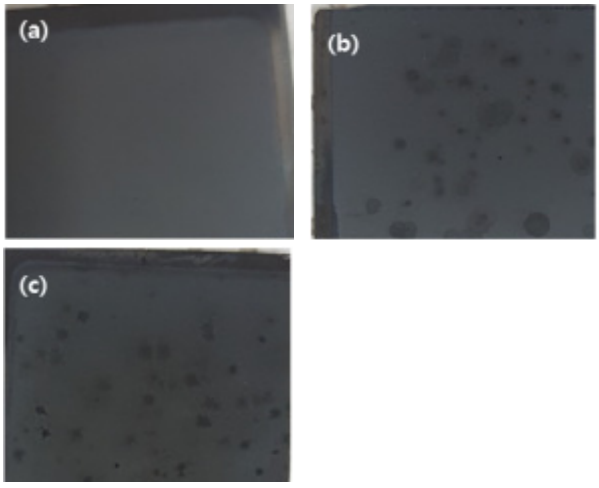

Fig. 7. Optical images of the absorbers stored in the air after KF treatment; (a) no treatment on LAG, (b) no treatment on SLG, (c) 30 nm KF on SLG

며 FF 불균일성을 야기한 것으로 예상된다. 앞서 보인 데이터들을 종합적으로 고려해볼 때, 표면 Na < 표면 Na + KF PDT < 표면 KF PDT 순으로 FF 불균일성이 증가한다.

4. 결 론

본 연구에서는 Na이 포함된 soda lime glass와 소량의 알칼리 원소가 함유된 저알칼리 유리를 사용하여 CIGS 박막 위의 KF PDT 효과를 실험하였다. SLG에서는 FF 향상이 있었지만 Voc 감소로 KF PDT에 의한 효율 이득은 없었다. LAG 기판은 Voc가 뚜렷하게 증가했지만 특정 조건에서 FF 감소가 극단적으로 나타났다. 결론적으로 LAG 20 nm에서 최고효율을 얻었다. FF의 급격한 감소는 I*Rs 값의 증가와 동시에 나타났으며, PDT 이후 표면에 발달한 미세구조와 관련되는 것으로 판단된다. KF PDT로 인한 표면의 불균질성이 FF를 심하게 저하시키는 것을 실험적으로 확인하였으며, 박막 내 Na이 없을 경우 이 현상이 더 두드러지게 나타난다. SLG에서는 V_{oc} 이득을 얻기가 어렵고, LAG에서는 V_{oc}의 저하는 없었지만 FF의 제어가 어렵다. 향후 연구에서는 KF PDT 이후 표면을 최적화하기 위해 미세구조를 어떤 방향으로 조절해야 하는지, 알칼리 원소간의 상호작용이 태양전지 성능 인자에 어떤 영향을 미치는지 알아볼 필요가 있다.

후 기

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

References

1. W. N. Shafarman, S. Siebentritt, L. Stolt, "Cu(In,Ga)Se2 Solar Cells", in: A. Luque, S.Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, UK, pp. 546-599, 2010.
2. P. Jackson, R. Wuerz, D. Hariskos, E. Lotter, W. Witte, M. Powalla, "Effects of heavy alkali elements in Cu(In,Ga)Se2 solar cells with efficiencies up to 22.6%", Phys. Status Solidi RRL Vol. 10, pp. 583-586, 2016.
3. A. Chirila, 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, A. N. Tiwari, "Potassium-induced surface modification of Cu(In,Ga)Se2 thin films for high-efficiency solar cells", Nature Mater. Vol. 12, pp. 1107-1111, 2013.
4. D. Rudmann, G. Bilger, M. Kaelin, F. J. Haug, H. Zogg, A. N. Tiwari, "Effects of NaF coevaporation on structural properties of Cu(In,Ga)Se2 thin films", Thin Solid Films, Vol. 431-432, pp. 37-40, 2003.
5. K. Granath, M. Bodegård, L. Stolt, "The effect of NaF on Cu(In, Ga)Se2 thin film solar cells", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 60, pp. 279-293, 2000.
6. D. Rudmann, A. F. da Cunha, M. Kaelin, F. Kurdesau, H. Zogg, A. N. Tiwari, "Efficiency enhancement of Cu(In,Ga)Se2 solar cells due to post-deposition Na incorporation", Appl. Phys. Lett. Vol. 84, pp. 1129-1131, 2004.
7. F. Pianezzi, P. Reinhard, A. Chirilă, et al. "Unveiling the effects of post-deposition treatment with different alkaline elements on the electronic properties of CIGS thin film solar cells", Phys Chem Chem Phys, Vol. 16, pp. 8843-8851, 2014.
8. P. Jackson, D. Hariskos, R. Wuerz, W. Wischmann, M. Powalla, "Compositional investigation of potassium doped Cu(In,Ga)Se2 solar cells with efficiencies up to 20.8%", Phys Status Solidi RRL – Rapid Res Lett. Vol. 8, pp. 219-222, 2014.
9. T. Lepetit, S. Harel, L. Arzel, G. Ouvrard, N. Barreau, "Coevaporated KInSe2: a fast alternative to KF postdeposition treatment in high-efficiency Cu(In,Ga)Se2 thin film solar cells", IEEE J Photovolt. Vol. 6, pp. 1316-1320, 2016.
10. P. Pistor, D. Greiner, C. A. Kaufmann, S. Brunken, M. Gorgoi, A. Steigert, W. Calvet, I. Lauermann, R. Klenk, T. Unold, M.-C. Lux-Steiner, "Experimental indication for band gap widening of chalcopyrite solar cell absorbers after potassium fluoride treatment", Appl Phys Lett. Vol. 105, pp. 063901, 2014.
11. T. Lepetit, S. Harel, L. Arzel, G. Ouvrard, N. Barreau, "KF post deposition treatment in co-evaporated Cu(In,Ga)Se2 thin film solar cells: Beneficial or detrimental effect induced by the absorber characteristics", Prog. Photovolt: Res. Appl., Vol. 25, pp. 1068-1076, 2017.
12. R. A. Sinton, A. Cuevas, "Contactless determination of current–voltage characteristics and minority-carrier lifetimes in semiconductors from quasi-steady-state photoconductance data", Applied Physics Letters, Vol. 69, pp. 2510-2512, 1996.
13. A. Romeo, M. Terheggen, D. Abou-Ras, D. L. Batzner, F. J. Haug, M. Kalin, D. Rudmann, A. N. Tiwari, "Development of Thin-film Cu(In,Ga)Se2 and CdTe Solar Cells", Prog. Photovolt: Res. Appl., Vol. 12, pp. 93-111, 2004.