

광흡수층 두께에 따른 투광형 비정질 실리콘 박막 태양전지의 양면발전 성능특성

서영훈^{1,2)} · 이아름¹⁾ · 신민정¹⁾ · 조아라¹⁾ · 안승규¹⁾ · 박주형¹⁾ · 유진수¹⁾ · 최보훈^{2)*} · 조준식^{1)*}

¹⁾태양광연구실, 한국에너지기술연구원, 대전, 34129

²⁾신소재물리학과, 동아대학교, 부산, 49315

Impact of Absorber Thickness on Bifacial Performance Characteristics of Semitransparent Amorphous Silicon Thin-Film Solar Cells

Yeong Hun Seo^{1,2)} · Ahruem Lee¹⁾ · Ara Cho¹⁾ · Min Jeong Shin¹⁾ · Seungkyu Ahn¹⁾ · Joo Hyung Park¹⁾ · Jinsu Yoo¹⁾ · Bo-Hun Choi^{2)*} · Jun-Sik Cho^{1)*}

¹⁾Photovoltaics Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Korea

²⁾Department of Materials Physics, Dong-A University, Busan 49315, Korea

Received September 25, 2019; Revised December 5, 2019; Accepted December 8, 2019

ABSTRACT: Bifacial and semitransparent hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) thin-film solar cells in p-i-n configuration were prepared with front and rear transparent conducting oxide (TCO) electrodes using plasma-enhanced chemical vapor deposition method. Fluorine-doped tin oxide and tin-doped indium oxide films were used as front and rear TCO contacts, respectively. Film thickness of intrinsic a-Si:H absorber layers were controlled from 150 nm to 450 nm by changing deposition time. The dependence of performance characteristics of solar cells on the front and rear illumination direction were investigated. For front illumination, gradual increase in the short-circuit current density (J_{SC}) from 10.59 mA/cm² to 14.19 mA/cm² was obtained, whereas slight decreases from 0.83 V to 0.81 V for the open-circuit voltage (V_{OC}) and from 68.43% to 65.75% for fill factor (FF) were observed. The average optical transmittance in the wavelength region of 380 ~ 780 nm of the solar cells decreased gradually from 22.76% to 15.67% as the absorber thickness was changed from 150 nm to 450 nm. In case of the solar cells under rear illumination condition, the J_{SC} increased from 10.81 to 12.64 mA/cm² and the FF decreased from 66.63% to 61.85%, while the V_{OC} values were maintained at 0.80 V with increasing the absorber thickness from 150 nm to 450 nm. By optimizing the deposition parameters, a high-quality bifacial and semitransparent a-Si:H solar cell with 350 nm-thick i-a-Si:H absorber layer exhibited the conversion efficiencies of 7.69% for front illumination and 6.40% for rear illumination, and average visible optical transmittance of 17.20%.

Key words: Bifacial, Semitransparent, Absorber, Amorphous silicon, Conversion efficiency, Optical transmittance

Nomenclature

a-Si:H : Hydrogenated amorphous silicon

p-nc-SiC:H : P-type hydrogenated nanocrystalline silicon carbide

i-a-Si:H : Intrinsic hydrogenated amorphous silicon

V_{OC} : Open-circuit voltage, V

J_{SC} : Short-circuit current density, mA/cm²

FF : Fill factor

EQE : External quantum efficiency

PECVD : Plasma-enhanced chemical vapor deposition

BIPV : Building-Integrated Photovoltaics

1. 서론

급격한 산업화 및 도시 확장으로 인하여 도시 내 건물들의 과도한 에너지 소비는 온실가스 배출 등의 환경오염에 큰 영향을 미치고 있다. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 제 5차 보고서에 따르면, 온실가스 배출은 산업부문이 31%, 건물부문이 19%로 건물 배출량이 두 번째로 높으며 에너지 소비

*Corresponding author: adamchoi@dau.ac.kr, jscho@kier.re.kr

에 의한 온실가스 배출비율은 전력으로 사용되는 경우가 63%로 가장 높다.¹⁾ 이러한 이유로, 태양광발전을 이용한 도시 내 친환경 전력생산은 온실가스 배출량 저감에 큰 기여를 할 것으로 기대되고 있으며 많은 선진국에서 건물 에너지 소비특성을 개선시킬 수 있는 중요 기술 중 하나로 건물일체형 태양광발전 (building-integrated photovoltaics; BIPV)에 주목하고 있다.²⁾ 건물 일체형 태양광발전 시스템에서는 태양전지를 주로 건물 외벽의 창호와 파사드 (facade)에 사용한다. 건물 외벽에는 기존의 단결정, 다결정 실리콘 태양전지를 설치하기도 하지만 외관과 투광성이 좋지 않고 쓰임새가 한정적이다. 이와 같은 단점을 극복하기 위하여 투명한 유리 또는 유인기판에 박막형태로 증착된 투광형 박막 태양전지를 BIPV에 적용하기 위한 다양한 시도가 진행되고 있다. 그러나, 결정질 실리콘 태양전지에 비하여 상대적으로 낮은 효율은 추가적으로 극복해야 할 기술적 요소이다.^{3,4)}

최근 비정질 실리콘 (a-Si:H) 및 나노결정질 실리콘 (nc-Si:H)⁵⁾, CIGS⁶⁾, CdTe⁷⁾, 페로브스카이트⁸⁾, 유기⁹⁾ 등을 광흡수층으로 사용하고 투명기판과 양면 투명전극을 이용한 다양한 투광형 태양전지가 개발되고 있다. 태양전지의 장기안정성과 효율 관점에서 실리콘 박막을 기반으로 만들어지는 투광형 실리콘 박막 태양전지는 다른 경쟁기술에 비하여 상용화 가능성이 매우 높다.¹⁰⁾ 또한, 투광형 태양전지는 전면뿐만 아니라 후면 방향으로도 전력을 생산할 수 있는 양면발전의 장점이 있어, BIPV 적용과 더불어 방음벽, 주차장/벤치 가림막 등의 다양한 분야에 응용이 가능하다.

본 연구에서는 플라즈마 화학기상증착법 (plasma-enhanced chemical vapor deposition; PECVD)을 이용하여 전면 FTO (fluorine-doped tin oxide) 전극과 ITO (tin-doped indium oxide) 후면전극을 양면 투명전극으로 하는 양면발전 투광형 a-Si:H 박막태양전지를 제조하고 광흡수층 두께와 전후면 광조사 방향에 따른 태양전지의 성능 변화를 조사하였다.

2. 태양전지 구조 및 실험방법

기판으로는 FTO 박막이 증착된 소다라임 유리기판 (Ashai U-type glass)을 사용하였다. 기판세정 후 FTO 전극 위에 p-i-n 구조의 실리콘 박막층을 형성하였고 이때, p와 n 도핑층, i 광흡수층은 각각 13.56 MHz와 60 MHz의 글로우 방전을 이용하여 증착하였다. p층인 p-nc-SiC:H 박막은 고진공 조건에서 H₂와 B₂H₆, CH₄, SiH₄ 가스를 주입하여 플라즈마를 발생시키고 증착 온도 250°C 에서 증착하였다. p-nc-SiC:H 박막은 밴드갭이 2.0 eV 이상으로 단파장 영역에서의 광 응답특성을 향상시킬 수 있는 장점을 갖고 있다. I-a-Si:H 광흡수층은 증착온도 300°C 에서 H₂와 SiH₄ 가스를 주입하여 증착하였으며 광흡수층의 두께는 동일 증착조건에서 증착시간을 조정하여 150 ~ 450 nm로 변화

시켰다. N 도핑층은 증착온도 350°C 에서 H₂와 PH₃, SiH₄ 가스를 주입하여 두께 20 nm로 증착하였다. 후면전극인 ITO 박막은 RF 마그네트로 스퍼터링 방법을 사용하여 두께 130 nm로 증착하였으며 면 저항은 약 20 Ω/sq 값을 나타내었다. 최종적으로 제작된 소자의 구조 및 각층의 두께는 유리기판/FTO 전면전극 (650 nm)/p-nc-SiC:H (30 nm)/i-a-Si:H (150 ~ 450 nm)/n-nc-Si:H (15 nm)/ITO 후면전극 (130 nm)이다.

제조된 양면발전 투광형 a-Si:H 태양전지의 광학적 물성은 적분부가 장착된 UV-Vis-NIR 스펙트로미터를 이용하여 350 ~ 800 nm 파장영역에서 측정하였으며 평균 가시광 투과도 값은 380 ~ 780 nm의 가시광 파장영역에서 측정된 데이터값으로부터 계산하였다. 태양전지의 주요한 성능지표인 개방전압 (open-circuit voltage; V_{OC}) 및 단락전류밀도 (short-circuit current density; J_{SC}), 충전율 (fill factor; FF)은 광조사량 100 mW/cm² 와 온도 25°C 의 표준 조건에서 솔라 시뮬레이터를 이용한 J-V 측정을 통하여 조사하였다. 태양전지의 입사광 파장에 따른 광 응답성을 조사하기 위하여 외부양자효율 (external quantum efficiency; EQE)을 측정하였다.

3. 실험 결과

Fig. 1은 양면발전 투광형 a-Si:H 박막 태양전지의 표면 및 단면구조 SEM (scanning electron microscope) 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 표면텍스처링된 FTO 박막의 표면형상을 따라 실리콘 박막과 ITO 투명전극이 균일하게 증착되는 것을 확인할 수 있다. 표면텍스처링된 계면에서는 표면형상 및 거칠기에

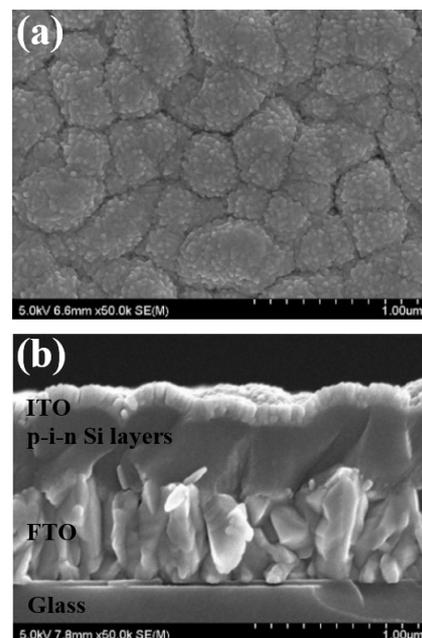


Fig. 1. Plane and cross-sectional SEM images of the bifacial and semitransparent a-Si:H thin-film solar cell.

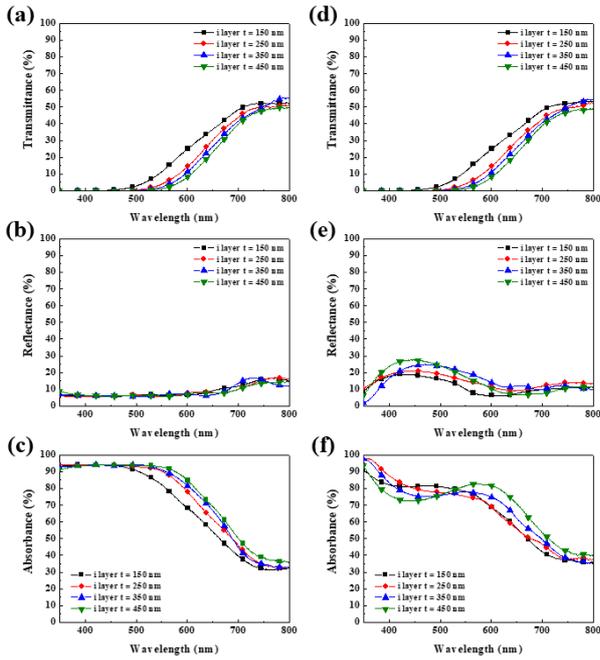


Fig. 2. Optical properties of the bifacial and semitransparent a-Si:H thin-film solar cells with different i-a-Si:H absorber thicknesses: (a) front transmittance, (b) front reflectance, (c) front absorbance (d) rear transmittance, (e) rear reflectance, (f) rear absorbance.

따라 입사광의 산란이 발생하여 광흡수층 내에서의 광 이동 경로를 증가시킨다. 이러한 광 산란의 증가는 간접천이형의 흡수 특성을 갖는 비정질 실리콘 광흡수층 내에서 광흡수를 향상시키는데 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

I-a-Si:H 광흡수층 두께에 따라 제조된 태양전지의 전면 및 후면 입사방향에 따른 투과 및 반사, 흡수 특성을 조사하고 이를 Fig. 2에 나타내었다. 입사광이 FTO 투명전극으로 입사되는 방향을 전면방향, ITO 후면전극으로 입사되는 방향을 후면방향으로 측정하였다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 태양전지의 투과도는 입사광의 방향과는 상관없이 같은 두께에서는 동일한 값을 나타낸다. 광흡수층 두께가 150 nm의 경우 450 nm 파장부근에서 투과가 시작되며 광흡수층의 두께가 증가될수록 투과가 시작되는 파장값은 긴 파장 쪽으로 이동된다. 투과가 시작되는 파장부터 800 nm까지의 파장영역에서는 광흡수층의 두께가 증가될수록 투과값이 감소하며 이는 광흡수층 두께에 따라 광흡수가 증가되기 때문이다. 800 nm 이상의 파장영역에서는 i-a-Si:H 광흡수층의 밴드 갭보다 낮은 에너지 영역이므로 광흡수는 광흡수층 두께의 영향을 받지 않는다. Fig. 2에서 관찰되는 바와 같이 전후면 입사방향에 따른 흡수와 반사값의 변화는 FTO와 ITO 박막의 광학적 특성에 영향을 받는 결과를 나타낸다. FTO 전면전극으로 입사된 경우에는 600 nm 이하의 파장영역에서 약 10%이하의 낮은 반사도를 가지며 반사광의 고저차를 보이지 않는 반면, ITO 후

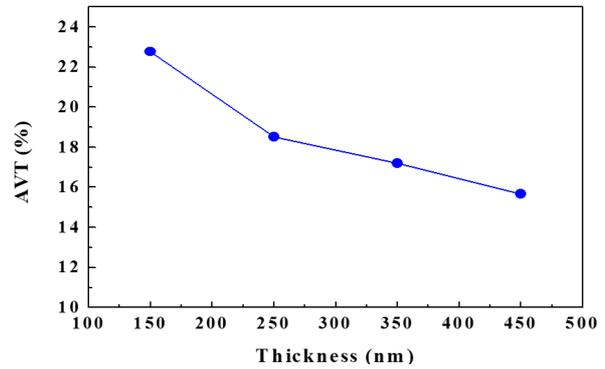


Fig. 3. Changes in average optical transmittance in visible wavelength range of 380 ~ 780 nm for the bifacial and semitransparent a-Si:H thin-film solar cells with different i-a-Si:H absorber thicknesses.

면전극으로 입사된 경우는 파장에 따라 반사율이 30%까지 증가되며 고저차가 발생한다. 이는 표면반사율에 의한 차이로 판단된다. 이에 따라 태양전지의 흡수도도 변화되며 평균적인 값을 고려 시 FTO 전면전극을 통한 입사의 경우가 광흡수 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

태양전지의 전후면 입사광에 대한 광흡수층 두께에 따른 가시광 영역 (380 ~ 780 nm)에서의 태양전지 평균 투과도 값을 Fig. 3에 나타내었다. 광흡수층의 두께가 150 nm인 경우 태양전지의 평균 가시광 투과도는 22.76%로 나타나며 광흡수층 두께가 250 nm에서 450 nm로 증가됨에 따라 평균 가시광 투과도는 18.52%에서 15.67%까지 점차로 감소한다. 증착된 광흡수층 두께 영역에서는 모두 15%이상의 평균 가시광 투과도를 보여주었다. 앞선 연구결과들에 의하며 투과형 태양전지를 건물창호에 적용 시 10 ~ 20% 수준의 투과도가 시각적인 편안함을 주는 동시에 입사광 차단에 의한 건물 내 온도상승 억제에 유리한 것으로 알려져 있다.¹¹⁾

Fig. 4는 광흡수층 두께별로 제작된 양면발전 투과형 태양전지의 실물 사진을 나타낸 것이다. 광흡수층 두께가 150 nm에서 450 nm로 변화됨에 따라 태양전지의 투과색은 노란색에서 짙은 붉은색으로 변화되었으며 이는 Fig. 2의 투과도 그래프에서 보는 결과와 같이 광흡수층 두께 증가에 따라 투과가 시작되는 파장이 장파장 쪽으로 옮겨가기 때문이다.

제조된 양면발전 투과형 태양전지의 광흡수층 두께 및 전후면 입사방향에 따른 광 응답특성을 조사하기 위하여 외부양자 효율을 350 ~ 800 nm 범위에서 측정하고 이를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 전면 입사광의 경우, 450 nm 이하의 단파장 영역에서는 광흡수층 두께에 따른 광응답성 변화가 거의 없는 반면 450 ~ 800 nm 파장영역에서는 광흡수층의 두께가 증가할수록 광 응답성이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 450 nm 이상의 파장영역에서의 광 응답성 향상은 광흡수층 두께 증가에 따라 광흡수층 내의 흡수가 증가되었기 때문이며 이

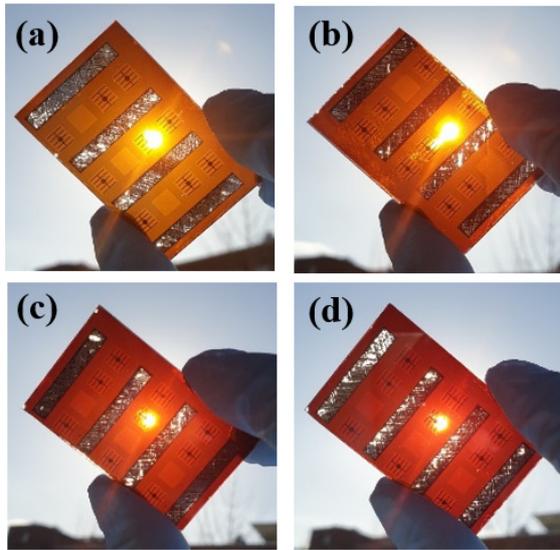


Fig. 4. Photographs of the bifacial and semitransparent a-Si:H thin-film solar cells with different i-a-Si:H absorber thicknesses: (a) 150 nm, (b) 250 nm, (c) 350 nm and (d) 450 nm.

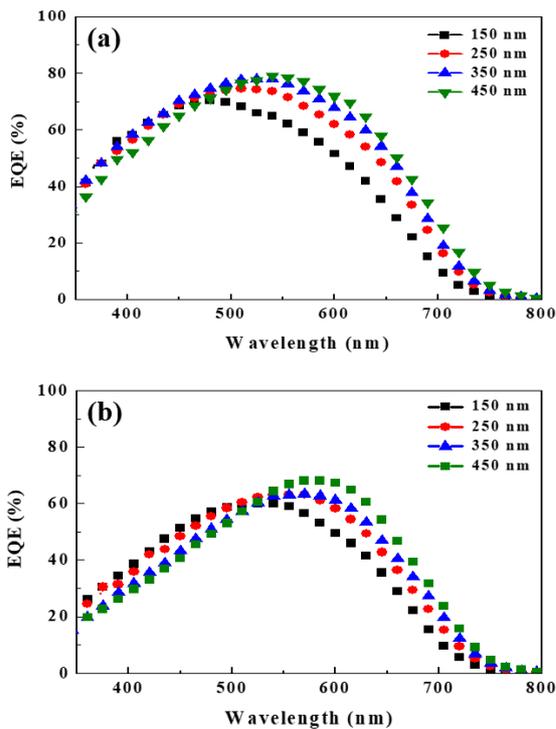


Fig. 5. EQE spectra of the bifacial and semitransparent a-Si:H thin-film solar cells with different i-a-Si:H absorber thicknesses: (a) front illumination and (b) rear illumination.

는 Fig. 2의 광학적 특성 결과와도 잘 일치함을 알 수 있다. 후면 입사의 경우에는 (Fig. 5(b)), 전면입사와는 다른 결과를 보여주며 광흡수층의 두께가 증가됨에 따라 550 ~ 800 nm 파장영역에서는 광 응답성이 증가되는 반면 550 nm이하의 파장영역에서는 광 응답성이 감소하는 것을 알 수 있다. 광흡수층 두께 증가에

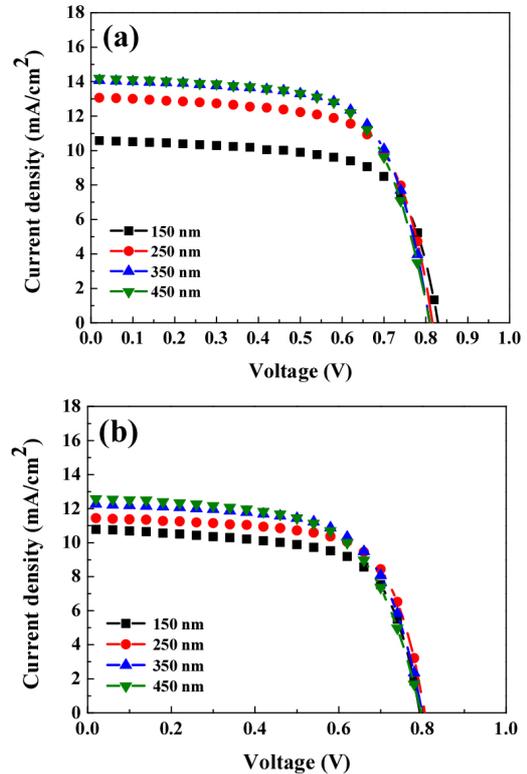


Fig. 6. Photo J-V curves of the bifacial and semitransparent a-Si:H thin-film solar cells with different i-a-Si:H absorber thicknesses: (a) front illumination and (b) rear illumination.

다른 높은 파장 영역에서의 광 응답성 증가는 전면입사와 같이 광흡수 증가에 따른 결과이다. 반면 단파장 영역에서의 광 응답성 감소는 ITO 후면전극에서의 반사도 증가에 따른 흡수도 감소에 기인한다. 따라서 후면입사의 경우에는 전면 입사에 비하여 전반적으로 낮은 효율 성능을 나타낸다.

광흡수층 두께 및 입사광의 방향에 따른 양면발전 투광형 태양전지의 Photo I-V 결과와 성능 특성을 각각 Fig. 6과 Table 1에 나타내었다. 전면입사의 경우 (Fig. 6(a)), 광흡수층의 두께가 150 nm에서 450 nm로 증가될 때 태양전지의 J_{sc} 값은 10.59 mA/cm²에서 14.19 mA/cm²로 지속적으로 증가하는 반면 V_{oc} 와 FF값은 각각 0.83 V와 68.43%에서 0.81 V와 65.75%로 감소한다. J_{sc} 값의 증가는 Fig. 6의 EQE 결과에서 보는 바와 같이 광흡수층 두께 증가에 따른 450 nm 이상의 파장영역에서의 광 응답성 증가에 의한 것이다. V_{oc} 와 FF값의 감소는 광흡수층 두께 증가에 따른 내부 결함과 직렬저항 증가에 의한 것으로 보인다. 효율측면에서는 광흡수층 두께가 350 nm인 경우 가장 높은 7.69%를 나타내었다. 후면 입사의 경우도 (Fig. 6(b)), i-a-Si:H 광흡수층 두께가 150 nm에서 450 nm로 증가됨에 따라 J_{sc} 값은 9.94 mA/cm²에서 12.64 mA/cm²으로 증가되었다. Fig. 5(b)의 EQE 결과에서 보듯이 후면입사조건에서는 광흡수층 두께의 증가에 따라 500 nm이하의 단파장 영역에서는 광 응답성이 감소

Table 1. Performance parameters of the bifacial and semitransparent a-Si:H thin-film solar cells with different i-a-Si:H absorber thicknesses.

Sample	Illumination direction	i-layer thickness (nm)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	PCE (%)	AVT (%)
a-Si:H	Front	150	0.83	10.59	68.43	6.01	22.76
		250	0.82	13.07	67.67	7.25	18.52
		350	0.81	14.11	67.26	7.69	17.20
		450	0.81	14.19	65.75	7.56	15.67
	Rear	150	0.80	10.81	66.63	5.76	22.70
		250	0.80	11.47	67.98	6.24	18.27
		350	0.80	12.29	65.14	6.40	16.94
		450	0.80	12.64	61.85	6.25	15.30

하고 그 이상의 파장영역에서는 증가되는 경향을 보여준다. 따라서 후면입사광에 대한 태양전지의 광흡수층 두께에 따른 J_{sc} 값의 증가값은 전면 입사광에 비하여 다소 낮아진다. 태양전지의 FF값은 광흡수층 두께 증가에 따라 66.05%에서 61.85%로 감소하고 V_{oc}값은 0.80 V로 일정한 값을 나타내었다. 후면입사 조건에서의 태양전지 효율은 5.25%에서 6.25%로 변화되었으며 전면 입사조건과 같이 350 nm의 광흡수층 두께에서 6.41%로 가장 높은 값을 나타내었다.

4. 결론

PECVD 증착법을 이용하여 유리기판위에 증착된 FTO 전면 전극과 ITO 후면전극의 양면 투명전극 구조를 갖는 양면발전 투명 a-Si:H 박막 태양전지를 제조하고 i-a-Si:H 광흡수층의 두께와 전후면 입사방향에 따른 태양전지의 성능변화를 조사하였다. I-a-Si:H 광흡수층의 두께가 150 nm에서 450 nm로 증가됨에 따라 가시광 영역의 평균 투과도는 22.76%에서 15.67%로 감소되었다. 광흡수층 두께가 증가될수록 전후면 입사방향에 상관없이 태양전지의 J_{sc}값은 점차로 증가되었으며 V_{oc}와 FF값은 감소하거나 동일한 값을 나타내었다. 광흡수층 두께 증가에 따른 J_{sc}값의 증가는 입사광의 흡수증가에 의한 것으로 확인되었다. 전면입사의 경우는 450 nm이상의 파장영역에서 광 응답성이 증가되었고 후면입사의 경우는 500 nm이하에서는 광 응답성이 감소하는 반면 그 이상의 파장영역에서는 증가되었다. V_{oc}와 FF값은 광흡수층 두께에 따른 내부결함과 직렬저항 변화에 영향을 받는 것으로 조사되었다.

광흡수층 두께 조절과 함께 다른 증착변수의 최적화를 통하여 광흡수층 두께 350 nm 조건에서 전면입사 7.69%와 후면입사 6.40%의 양면발전 효율 값을 갖고 동시에 평균 가시광 투과도 17.20%를 갖는 우수한 양면발전 투명형 a-Si:H 박막 태양전지를 제작하였다. 양면발전과 투명 특성을 함께 이용하는 경우 건물용 태양광발전을 비롯하여 다양한 도시태양광발전 응용분야에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 2016 3010012560).

References

- IPCC, Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in : Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, p. 151, 2014
- Chae, Y. T., Kim, J.H., Park, H.S., Shin, B.H., "Building energy performance evaluation of building integrated photovoltaic (BIPV) window with semi-transparent solar cells", *Applied Energy*, Vol. 129, pp. 217-227, 2014.
- Ablayev, G. M., Kosarev, A. I., Kukin, A. V., Semerukhin, M. Y., Shvarts, M. Z., Terukov, E. I., Zhilina, D. V., "Semitransparent solar modules based on amorphous and microcrystalline silicon", *J. Phys. Conf. Ser.*, Vol. 572, p. 012049, 2014.
- Jelle, B. P., Breivik, C., Røkenes, H. D. "Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 100, pp. 69-96, 2012.
- Jo, H. J., Yang, J. H., Lee, J.H., Lim, J. W., Lee, J. S., Shin, M.H., Ahn, J. H., Kwon, J. D., "Transparent bifacial a-Si:H solar cells employing silver oxide embedded transparent rear electrodes for improved transparency", *Sol. Energy*, Vol. 170, pp.940-946, 2018.
- Shin, M. J., Jo, J. H., Cho, A., Gwak, J. H., Yun, J. H., Kim, K. H., Ahn, S. K., Park, J. H., Yoo, J. S., Jeong, I. Y., Choi, B. H., Cho, J. S., "Semi-transparent photovoltaics using ultra-thin Cu(In,Ga)Se₂ absorber layers prepared by single-stage co-evaporation", *Sol. Energy*, Vol. 181, pp. 276-284, 2019.
- Heisler, C., Schnohr, C.S., Hadrich, M., Oertel, M., Kraft, C.,

- Reislohner, U., Metzner, H., Wesch, W., "Transparent CdTe solar cells with a ZnO:Al back contact", *Thin solid films* Vol. 548, pp. 627-631, 2013.
8. Bodiul Islama, M., Yanagidaa, M., Shiraia, Y., Nabetanib, Y., Miyanoa, K., "Highly stable semi-transparent MAPbI₃ perovskite solar cells with operational output for 4000h". Vol. 195, pp. 323-329, 2019.
9. Seemann, A., Egelhaaf, H.-J., Brabec, C. J., Hauch, J. A. "Influence of oxygen on semi-transparent organic solar cells with gas permeable electrodes", *Organic Electronics* Vol. 10, No. 8, pp. 1424-1428, 2009.
10. Park, C. M., Cho, J. H., Lee, Y. S., Park, J. J., Ju, M. K., Lee, Y. J., Yi, J. S., "Technology Trends and Prospects of Silicon Solar Cells", *Current Photovoltaic Research* Vol. 1, No. 1, pp 11-16, 2013.
11. Chae, Y. T., Kim, J., Park, H., Shin, B., "Building energy performance evaluation of building integrated photovoltaic (BIVP) window with semi-transparent solar cells", *Appl. Energy* Vol. 129, pp. 217-227, 2014.