

적층형 태양전지를 위한 비정질실리콘계 산화막 박막태양전지의 광흡수층 및 반사체 성능 향상 기술

강동원^a

청주대학교 태양광에너지공학과

Advances in Absorbers and Reflectors of Amorphous Silicon Oxide Thin Film Solar Cells for Tandem Devices

Dong-Won Kang^a

Department of Solar & Energy Engineering, Cheongju University, Choengju 28503, Korea

(Received December 12, 2016; Revised December 28, 2016; Accepted December 29, 2016)

Abstract: Highly photosensitive and wide bandgap amorphous silicon oxide (a-SiO_x:H) films were developed at low temperature ranges (100~150°C) with employing plasma-enhanced chemical vapor deposition by optimizing H₂/SiH₄ gas ratio and CO₂ flow. Photosensitivity more than 10⁵ and wide bandgap (1.81~1.85 eV) properties were used for making the a-SiO_x:H thin film solar cells, which exhibited a high open circuit voltage of 0.987 V at the substrate temperature of 100°C. In addition, a power conversion efficiency of 6.87% for the cell could be improved up to 7.77% by employing a new n-type nc-SiO_x:H/ZnO:Al/Ag triple back-reflector that offers better short circuit currents in the thin film photovoltaic devices.

Keywords: Amorphous silicon oxide, Solar cell, Low temperature, Al-doped ZnO, Back-reflector

1. 서론

실리콘 박막 태양전지는 단일접합 뿐만 아니라 다양한 밴드갭의 조합을 통해서 적층 구조의 구현을 통해서 고효율을 구현할 수 있다는 장점이 있어서 대면적 고효율 태양전지로서 주목을 받고 있다. 비정질실리콘(hydrogenated amorphous silicon, a-Si:H) 태양전지 및 미세결정 실리콘(nanocrystalline silicon, nc-Si:H) 태양전지는 적층형 구조에서 각각 상부와 하

부에 위치하여 넓은 영역에서의 태양광 스펙트럼을 흡수할 수 있다 [1-3]. 단파장 대역에서 더 높은 흡수 특성을 갖추기 위해서 밴드갭을 더 높인 광흡수층은 소자의 출력특성 측면에서 볼 때, 개방전압(V_{oc}, open circuit voltage)의 향상에 도움이 되기 때문에 여러 부분에서 필요한데, 산소를 첨가하여 제작한 비정질실리콘(a-SiO_x:H)은 밴드갭을 더 높여서 수 있어서 대표적으로 연구가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 기타의 연구들과 다르게, 증착온도를 100~150°C 구간으로 여타 180~300°C의 상대적으로 높은 온도의 공정으로 진행된 사전 연구결과 [4-6]에 비해서 저온에서 증착하면서도 고효율 특성을 달성하는데 초점을 맞추어 진행하였다. 이는 향후 플라스틱 기관 등의 플렉서블/웨어러블 공정에도 다양하게 적용

a. Corresponding author; kang@cju.ac.kr

Copyright ©2017 KIEEME. All rights reserved.
 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.

될 수 있다.

우리 그룹에서는 먼저 다양한 수소/실란 가스 비율 및 이산화탄소/실란 가스 비율의 변화에 맞춰 공정온도를 낮춰가며 광흡수층 박막의 광민감도(photosensitivity)와 밴드갭(E_{opt})를 면밀히 조사하고, 최적의 박막 특성을 실험 결과를 통해 도출하였다. 또한 이를 통해서 박막태양전지를 제작하여 특성을 검증하였다. 게다가, 박막이 얇아지면서 곡선인자 등을 개선하게 되는데, 이를 통해 감소될 수 있는 광전류를 보상해주기 위하여 태양전지의 후면에 3중 구조의 반사막(n-type nc-SiO_x:H/ZnO:Al/Ag)을 형성하여 전체적인 특성 향상을 도모하였고, 향상된 출력 특성을 갖는 태양전지를 검증한 결과를 본 논문에서 보고한다.

2. 실험 방법

비정질실리콘계 산화막 박막은 실란(SiH₄), 수소(H₂), 이산화탄소(CO₂) 가스를 이용하여 플라즈마 화학기상증착법(plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)으로 증착되었다. 수소/실란 비율($R = 12\sim 24$) 및 CO₂ 가스 희석(CO₂/SiH₄=0.1~0.3)을 최적화해가면서 박막의 밴드갭 및 광민감도를 측정 및 분석을 진행하였다.

광민감도는 암전도도(dark conductivity)와 광전도도(photoconductivity)의 측정 및 그 비율로 계산되었고, 밴드갭은 spectroscopic ellipsometry 장비를 이용하여 측정하였다.

최적화된 박막을 소자를 제작할 경우에는 박막태양전지의 구조[Asahi-VU (glass/SnO₂:F)/AZO(10 nm)/p-a-SiO_x:H(12nm)/i-a-SiO_x:H(100~150 nm)/n-nc-SiO_x:H(40 nm)/ZnO:Al(AZO)/Ag/Al]로 제작하였다. p, n층은 위와 같이 모두 실리콘산화막 상을 형성하여 기생흡수를 줄였고 증착온도는 100°C에서 증착되었다. 후면 반사를 강화하기 위하여 제안된 n-nc-SiO_x:H(40 nm)/ZnO:Al(AZO)/Ag 3중 구조 반사극대화 구조에서는 AZO는 스퍼터링 공정을 통해서 200°C에서 제작하였고, Ag/Al의 금속 박막은 thermal evaporator를 이용하여 증착 및 그 특성을 분석하였다. 태양전지의 특성 검증은 솔라 시뮬레이터 장비를 이용해서 AM 1.5 G (100 mW/cm²) 표준 조건 (25°C)에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

박막태양전지에서 상부 층으로 사용될 비정질실리콘계 산화막은 높은 밴드갭이 선호되므로 밴드갭을 상승시키기 위하여 CO₂ 희석을 진행하여 제작할 수 있으나, 결함 농도의 상승으로 광흡수층의 광민감도는 하락하게 된다. 따라서 밴드갭을 상승시키면서도 광민감도를 크게 희생하지 않는 최적의 영역을 찾는 것이 광흡수층 설계에 있어서 핵심이 된다.

그림 1은 다양한 수소/실란 가스 비율(R)에 따른 비정질실리콘계 산화막의 광흡수층으로서의 응용을 위하여 광민감도 및 밴드갭을 측정하여 정리한 결과이다. 그림과 같이, R 값을 증가(H₂ 희석 증가)시키면 박막

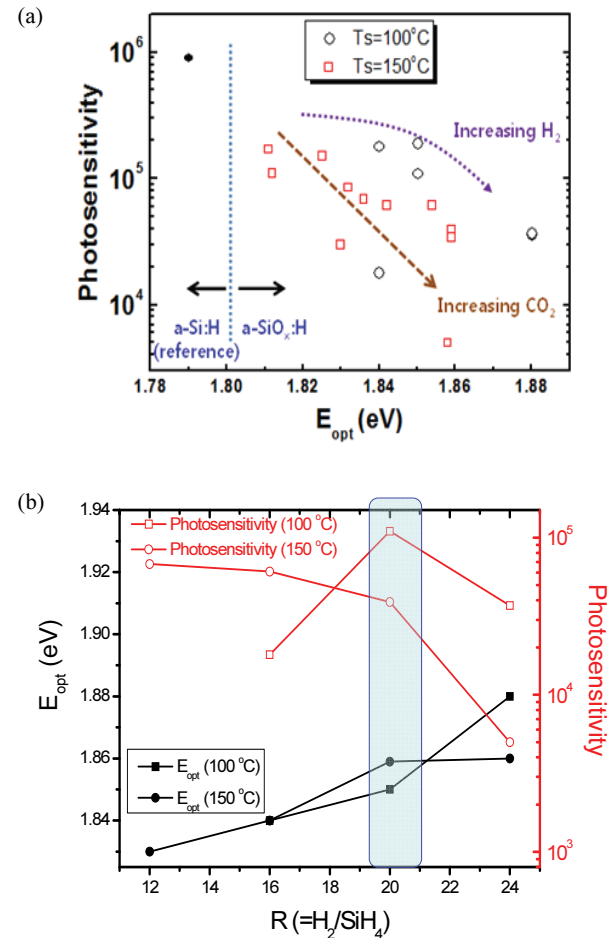


Fig. 1. Photosensitivity and E_{opt} of fabricated amorphous silicon oxide films prepared with (a) varying H₂, CO₂ and (b) R ratio. The effect of deposition temperature (100~150°C) was also investigated.

내에 수소의 함량이 증가하게 되면서 광흡수층의 밴드갭을 증가시킬 수 있게 된다. 그러나 일정 수준 이상의 R 값을 넘어서게 되면 광민감도가 급격히 손실을 입게 되는데 이는 결정성장에 의해서 미세결정 실리콘 상으로 전이되기 때문이다. 100°C의 공정온도 실험의 경우는 R 값이 20일 때 높은 밴드갭 (1.85 eV)과 더불어 1.9×10^5 수준의 광민감도를 얻을 수 있었으며, R을 더 증가시키면 미세결정화가 진행되면서 광민감도의 저하로 이어지므로 R = 20 구간에서 박막의 특성이 최적화되었다. 150°C로 온도가 높은 실험 SET에서는 역시 수소 비중이 증가함에 따라 밴드갭을 높여갈 수 있지만, 광민감도는 지속적으로 저하됨을 확인할 수 있다. 또한 CO₂ 희석의 증가는 밴드갭을 확실히 증가시킬 수 있지만 광민감도의 저하가 뒤따르는 것을 많은 실험 값을 통해서 확인할 수 있었다. 따라서 150°C에서의 최적의 조건은 1.81 eV의 밴드갭에서 1.7×10^5 수준의 광민감도를 얻을 수 있었다.

위와 같이 유사한 수준의 광민감도를 갖는 100°C와 150°C 공정으로 얻어진 광흡수층을 기초로 그림 2 및 표 1과 같이, 150 nm 두께를 갖는 박막태양전지를 제작하여 그 출력 특성을 비교하였다. 약 6.8~7.0%에 해당하는 효율이 얻어졌으며 주된 차이는 개방전압에서 나타났다. 0.987 V와 0.956 V와 같이 약 30 mV의 유의미한 차이는 주로 앞서 얻어진 밴드갭의 차이로 설명될 수 있다. 100°C에서 얻어진 박막은 밴드갭이 1.85 eV로 높아 개방전압의 향상에 도움이 된 것으로 볼 수 있다. 전류도 산화물계 광흡수층임을 감안하면 11 mA/cm² 이상으로 매우 높은 수준이며, 곡선인자 (fill factor, FF)가 낮는데, 이를 개선하기 위하여 그림 3에서는 박막의 두께를 100 nm로 낮추면서 입사광 관리를 최적화하는 새로운 구조를 개발하였고, 그림 4에는 실험적으로 소자를 제작하여 그 결과를 도시하였다.

그림 4는 더 얇아진 광흡수층 (100 nm)를 기초로 제작된 태양전지의 출력 특성을 보여주며, 얇아진 광흡수층에 따른 감소될 전류를 보상하기 위하여 후면의 n-nc-SiO_x:H/Ag 계면에 AZO를 스퍼터링 공정으로 추가하여 후면에서의 반사를 극대화하는 신규 구조를 적용하였다. 그 결과 전류를 10.8 mA/cm²까지 확보하여 150 nm 광흡수층을 갖는 태양전지와 큰 차이가 없는 수준으로 확보하면서도 곡선인자의 큰 개선으로 7.77%라는 더 높은 효율을 갖는 태양전지 소자를 설계할 수 있었다. 이 연구 결과는 더 얇은 광흡수층을 통해서 생산성 향상이라는 공정상의 측면에서 장점과 더불어, 소자적인 측면에서도 개방전압 및 효율의 향상

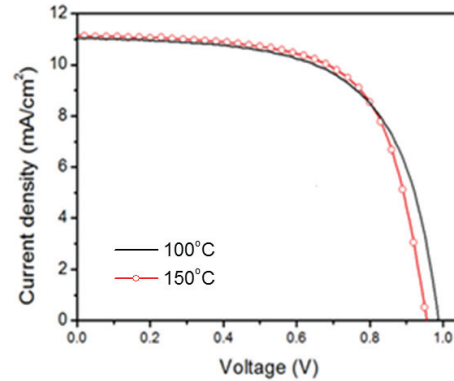


Fig. 2. Output properties of fabricated a-SiO_x:H solar cells made with various deposition temperature (100~150°C) for a-SiO_x:H absorber used in our study.

Table 1. Output properties of fabricated a-SiO_x:H solar cells.

i-a-SiO _x :H	100°C	150°C
V _{oc} (V)	0.987	0.956
J _{sc} (mA/cm ²)	11.03	11.14
FF	0.631	0.660
Efficiency (%)	6.87	7.03

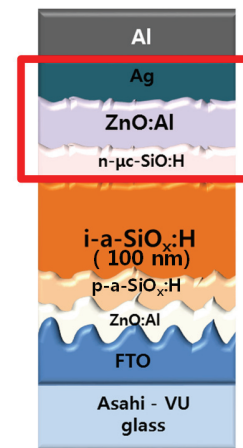


Fig. 3. The fabricated device structure of a-SiO_x:H solar cell. Here, an absorber layer thickness of 100 nm was applied for the fabricated solar cells.

으로 나타나는 큰 장점을 가져오는 결과로 해석할 수 있다. 향후에 이 소자의 추가적인 특성 향상을 위해서

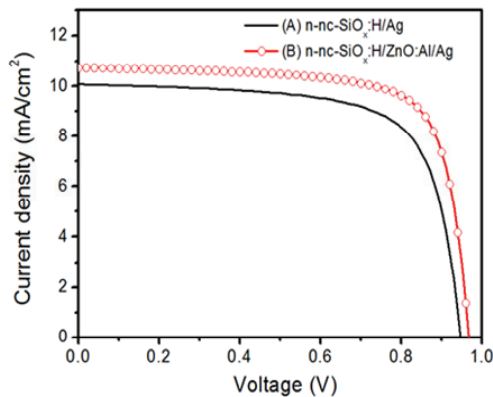


Fig. 4. Performance comparison of a-SiO_x:H solar cells with n-nc-SiO_x:H/AZO/Ag and n-nc-SiO_x:H/Ag back reflectors. Here, absorber layer thickness of 100 nm was applied for the fabricated solar cells.

Table 2. Output properties of fabricated a-SiO_x:H solar cells with different rear reflector structure of (A) n-nc-SiO_x:H/Ag and (B) n-nc-SiO_x:H/ZnO:Al/Ag.

i-a-SiO _x :H	(A)	(B)
V _{oc} (V)	0.946	0.967
J _{sc} (mA/cm ²)	10.07	10.81
FF	0.703	0.74
Efficiency (%)	6.70	7.77

굴절률이 ZnO:Al과 Ag의 사이 값을 갖는 물질을 이용하면 반사도 극대화에 따른 전류의 향상을 기대할 수 있으며, MgF₂ 소재를 이용했을 때의 사전 연구결과를 최근 발표한 바 있다 [7].

4. 결론

본 연구는 박막 실리콘 태양전지에서 비정질실리콘계 산화막을 다양한 저온 구간에서 광민감도와 밴드갭을 최적화하는 실험 결과를 통해서 고성능 태양전지의 기반이 되는 최적화 박막을 확보하였다. 이를 통해 제작된 박막태양전지에서는 100°C에서 제작된 소자가 더 높은 효율을 내면서 적층 구조의 태양전지

의 상부 전지로 최적화됨을 확인하였다. 또한 후면에서의 n-nc-SiO_x:H(40 nm)/ZnO:Al(AZO)/Ag 3중 구조 반사체를 실질적으로 구현해내면서 전반적인 효율의 향상을 이끌 수 있었다. 100 nm의 매우 얇은 두께로도 7.77%의 높은 효율을 확보하였으며, 이 수준은 현재까지 발표된 결과들로 볼 때, 비정질실리콘계 산화막을 광흡수층으로 하는 박막태양전지로는 세계적인 수준이다. 이 기술은 향후 적층형 태양전지의 제작을 위한 고효율화 기술들에 있어서 여러 가지 형태로 응용될 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 (2015~2016)학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음.

REFERENCES

- [1] S. Kim, J. W. Chung, H. Lee, J. Park, Y. Heo, and H. M. Lee, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **119**, 26 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.04.016>]
- [2] J. W. Schuttauf, B. Niesen, L. Lofgren, M. Bonnet-Eymard, M. Stuckelberger, S. Hanni, M. Boccard, G. Bugnon, M. Despeisse, F. J. Haug, F. Meillaud, and C. Ballif, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **133**, 163 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.11.006>]
- [3] G. W. Shu, J. Y. Lin, H. T. Jian, J. L. Shen, S. C. Wang, C. L. Chou, W. C. Chou, C. H. Wu, C. H. Chiu, and H. C. Kuo, *Opt. Express*, **21**, A123 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.21.00A123>]
- [4] J. Sritharathikhun, S. Inthisang, T. Krajangsang, A. Limmanee, and K. Sriprapha, *Thin Solid Films*, **546**, 383 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.05.138>]
- [5] J. Sritharathikhun, A. Moollakorn, S. Kittisontirak, A. Limmanee, and K. Sriprapha, *Curr. Appl. Phys.*, **11**, S17 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cap.2010.11.100>]
- [6] J. E. Lee, J. H. Park, J. Yoo, K. H. Yoon, D. Kim, and J. S. Cho, *Solid State Sciences*, **20**, 70 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2013.03.015>]
- [7] D. W. Kang, P. Sihanugrist, and M. Konagai, *Electron. Mater. Lett.*, **12**, 451 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s13391-016-4005-0>]