

AZO 투명 전극 기반 반투명 실리콘 박막 태양전지

남지윤, 조성진^a

경북대학교 건설환경에너지공학부

AZO Transparent Electrodes for Semi-Transparent Silicon Thin Film Solar Cells

Jiyeon Nam and Sungjin Jo^a

School of Architectural, Civil, Environmental, and Energy Engineering, Kyungpook National University,
 Daegu 41566, Korea

(Received April 6, 2017; Revised April 11, 2017; Accepted April 12, 2017)

Abstract: Because silicon thin film solar cells have a high absorption coefficient in visible light, they can absorb 90% of the solar spectrum in a 1- μ m-thick layer. Silicon thin film solar cells also have high transparency and are lightweight. Therefore, they can be used for building integrated photovoltaic (BIPV) systems. However, the contact electrode needs to be replaced for fabricating silicon thin film solar cells in BIPV systems, because most of the silicon thin film solar cells use metal electrodes that have a high reflectivity and low transmittance. In this study, we replace the conventional aluminum top electrode with a transparent aluminum-doped zinc oxide (AZO) electrode, the band level of which matches well with that of the intrinsic layer of the silicon thin film solar cell and has high transmittance. We show that the AZO effectively replaces the top metal electrode and the bottom fluorine-doped tin oxide (FTO) substrate without a noticeable degradation of the photovoltaic characteristics.

Keywords: Semi-transparent, Silicon thin film solar cell, Aluminum doped zinc oxide, Building integrated photovoltaic

1. 서론

화석연료의 고갈과 이산화탄소를 비롯한 온실 가스 배출에 따른 지구온난화는 전 세계적으로 친환경, 신재생 에너지에 대한 다양한 연구 및 개발을 촉진하였다. 그 중 태양광 발전은 다른 종류의 신재생 에너지에 비하여 발전비용이 저렴하며, 사용량의 제한이 없는 태양빛을 에너지원으로 사용하기 때문에 차세대 에너지원으로 각광 받고 있다. 태양광 발전 시스템은 발전소 단위의 대형

발전뿐만 아니라 건물 외벽 및 유리창에 부착하여 추가적인 전력을 공급하는 건물 일체형 태양광 발전 시스템 (building integrated photovoltaic system, BIPV)에도 적용할 수 있는데 [1,2], 최근 건물 내부의 일조량 충족을 위해 건물 마감재를 두꺼운 유리로 설치하는 형태가 많기 때문에, 일정량의 빛을 투과시키기 위한 높은 투과도를 가진 태양전지의 개발이 요구되고 있다 [3]. 이러한 조건의 건물 일체형 태양광 시스템에 적용 가능한 태양전지로는 염료감응형 태양전지(dye-sensitized solar cell, DSSC) [4,5], 황동광 기반 태양전지(chalcopyrite-based solar cells) [6], 실리콘 박막 태양전지(silicon thin film solar cell) [7,8] 등이 있는데, 특히 실리콘 박막 태양전지는 높은 광흡수 계수(high absorption coefficient), 직접 천이 밴드갭(direct band gap), 저가 대량 생산 가

a. Corresponding author; sungjin@knu.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.

능성 등의 장점을 가지고 있다 [9,10]. 또한 실리콘 박막 태양전지는 1 μm 미만의 두께로도 태양광 스펙트럼의 90% 이상을 흡수할 수 있어 얇은 박막으로 제작이 가능하기 때문에 건물 일체형 태양광 시스템에 적용하기에 적합하다 [11]. 하지만 일반적으로 실리콘 박막 태양전지는 높은 반사도와 낮은 투과도를 가진 알루미늄 및 은과 같은 금속 전극을 전면 전극으로 사용하기 때문에, 태양전지의 면적이 넓어지고 수가 많아지면 그만큼 반사되고 투과되지 못하는 빛의 양이 증가하여 건물의 유리 마감재나 창에 적용하기에 제약이 따른다. 따라서 실리콘 박막 태양전지의 높은 투과도와 우수한 태양전지 특성을 유지하면서, 기존 불투명 금속 전극을 대체할 수 있는 투명전극의 개발 및 이를 이용한 태양전지 제작에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 알루미늄이 도핑된 산화아연(Al doped ZnO, AZO) 층을 전극으로 사용하여 실리콘 박막 태양전지를 제작하였다. AZO 층은 높은 투과도를 가지며, 비정질 실리콘(amorphous silicon, a-Si) 층과 비슷한 일함수(work function)를 가지고 있다 [12]. 실리콘 박막 태양전지의 전/후면 전극을 AZO 층으로 대체하여 반투명 실리콘 박막 태양전지를 제작하였으며, AZO 층의 두께에 따른 태양전지 특성의 차이를 평가하였다. 또한 높은 투과도 때문에 실리콘 박막 태양전지의 전면 전극 방향과 후면 전극 방향에서 각각 빛을 조사할 경우 태양전지 특성의 차이가 거의 없는 것을 확인하였다. 본 연구를 통해 AZO 전극은 실리콘 박막 태양전지의 금속 전극을 효과적으로 대체할 수 있음을 확인하였다. 높은 투과도와 1 μm 미만 두께의 얇고 가벼운 특성을 가진 실리콘 박막 태양전지는 건물 일체형 태양전지 시스템에 적용을 기대할 수 있다.

2. 실험 방법

실리콘 박막 태양전지는 플라즈마 화학 기상 증착법(plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)을 이용하여 증착하였으며, 실리콘 원소를 가스 상태의 원재료물질에서 분리해서 얻어내는 방식으로 제작하였다 [13]. AZO 층의 경우 스퍼터링(sputtering) 공정을 이용하여 증착하였다. 기판으로는 세척된 일반 유리 기판을 사용하였으며, 하부 AZO 전극/a-Si (p-i-n)/상부 AZO 전극 순으로 증착하였다. 우선 하부 AZO 층

의 경우 기판 온도 200°C 조건에서 500 nm 두께로 증착하였고, 그 이후 PECVD 방법으로 p-형, 진성(intrinsic), n-형 실리콘 박막 층을 250°C 조건에서 각각 13 nm, 460 nm, 25.7 nm 두께로 순서대로 증착하였다. 마지막으로 상부 전극으로 사용하기 위해 AZO 층을 200°C 조건에서 100 nm, 300 nm, 500 nm 두께로 각각 증착하였다. AZO 층과 실리콘 박막 층은 모두 클러스터(cluster) 시스템을 이용하여 고진공 상태에서 한번에(in-situ) 증착이 진행되었다. 태양전지 특성은 솔라시뮬레이터(Sol2A, Oriel)를 사용하여 1-sun 조건(AM 1.5, 100 mW/cm²)에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 실리콘 박막 태양전지의 기본 구조와 AZO 층을 전극으로 사용한 반투명 실리콘 박막 태양전지의 구조를 나타낸 것이다. 기존의 불투명 알루미늄 전극을

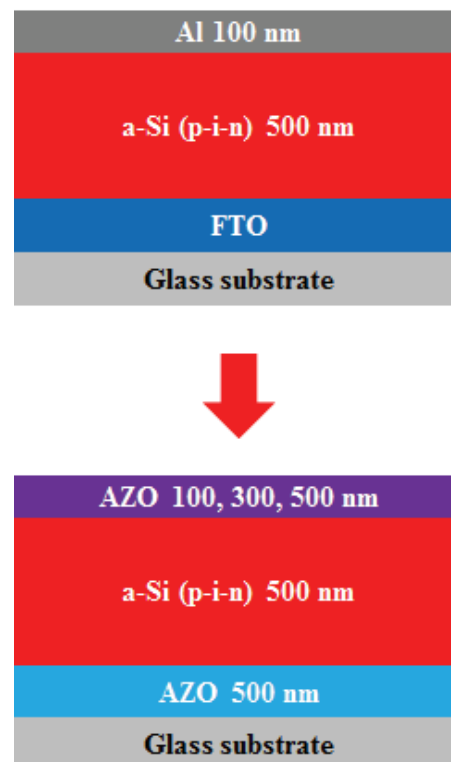


Fig. 1. Schematic illustration of silicon thin film solar cells with conventional aluminum electrode and transparent AZO electrode.

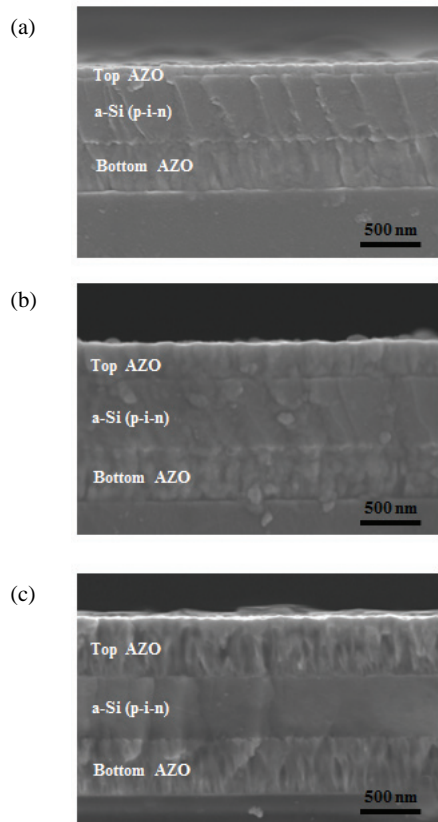


Fig. 2. Cross-sectional SEM images of silicon thin film solar cells with thickness of transparent AZO electrode of (a) 100 nm, (b) 300 nm, and (c) 500 nm.

투명 AZO 전극으로 대체하였고, 실험 조건에 따라 그 두께를 100 nm, 300 nm, 500 nm로 변경하여 각각 태양전지를 제작하였다. 하부 FTO (fluorine-doped tin oxide) 전극의 경우도 500 nm 두께의 AZO 층을 전극으로 대체하여 태양전지를 제작하였다. 하부 전극의 경우 고가의 FTO 기판 대신 일반 유리기판 위에 증착하여 사용할 수 있는 AZO 전극을 사용하여 전체 제조 공정 단가의 절감을 기대할 수 있다. 기존의 실리콘 박막 태양전지의 경우 알루미늄 전극을 전면전극으로 사용하여 FTO 전극 방향으로만 빛을 흡수하여 태양전지를 구동하였다. 하지만, 알루미늄 전극을 투명 AZO 전극으로 대체하면, 전면전극 방향으로도 빛을 흡수하여 태양전지를 구동할 수 있다. 또한 그림 1에서 확인할 수 있듯이 전극을 제외한 실리콘 박막 층(p-Si, intrinsic-Si, n-Si)은 500 nm 두께로 매우 얇은데, 이는 높은 흡수계수로 인해 얇은 두께로도 태양광을 충분히 흡수할 수 있기 때문이다.

그림 2는 (a) 100 nm, (b) 300 nm, (c) 500 nm 두께로 증착된 실리콘 박막 태양전지의 단면 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM) 이미지이다. 클러스터 시스템을 이용하여 in-situ 방식으로 공정을 진행하였기 때문에, 스퍼터링 공정으로 증착한 AZO 층과 플라즈마 화학 기상 증착법으로 제작한 a-Si 층 모두 공정 간에 고진공 상태를 유지하여 계면에서 균일한 박막 층이 형성된 것을 확인할 수 있다.

다음으로 AZO 전극을 적용한 실리콘 박막 태양전지의 특성을 분석하였다. 그림 3의 (a)에서는 알루미늄 전극을 사용한 기존의 실리콘 박막 태양전지와 이를 AZO 전극으로 대체한 실리콘 박막 태양전지의 특성을 비교하여 전류-전압 그래프로 나타내었다. AZO 전극의 두께는 알루미늄 전극의 두께와 동일하게 100 nm 두께로 증착하였고, 각각 하부 전극인 FTO 전극과 500 nm 두께의 AZO 전극 방향으로 빛을 조사하였다. 알루미늄 전극을 사용한 실리콘 박막 태양전지의 특성은 개방 전압(open circuit voltage, V_{oc}) 0.86 V, 전류 밀도(current density, J_{sc}) 14.3 mA/cm², 곡선인자(fill factor, FF) 65.8%, 효율(efficiency, Eff.) 8.16%,이며, AZO 전극을 사용한 실리콘 박막 태양전지의 특성은 V_{oc} 0.856 V, J_{sc} 13.2 mA/cm², FF 63%, Eff. 7.11%로 측정되었다. 알루미늄 전극을 AZO 전극으로 대체하여도 개방 전압은 거의 차이가 없음을 확인하였다. 이와 동시에 투명 AZO 전극의 사용으로 투과도를 확보하였지만, 그래프에서도 확인할 수 있는 약간의 전류 밀도와 곡선인자의 차이는 실리콘 박막 층에 흡수되지 않고 투과된 빛이 알루미늄 전극에 반사되어 실리콘 박막 층으로 재흡수되면서 나타난 흡광량의 차이와 알루미늄 전극의 낮은 접촉 저항에 의한 효과로 볼 수 있다.

그림 3의 (b)에서는 상부 AZO 전극의 두께에 따른 실리콘 박막 태양전지의 특성 차이를 나타내었다. 실험에 사용된 100 nm, 300 nm, 500 nm의 AZO 전극 두께 변화에 따라 실리콘 박막 태양전지의 특성은 각각 100 nm (V_{oc} 0.856 V, J_{sc} 13.2 mA/cm², FF 63%, Eff. 7.11%), 300 nm (V_{oc} 0.857 V, J_{sc} 13.2 mA/cm², FF 63.9%, Eff. 7.25%), 500 nm (V_{oc} 0.859 V, J_{sc} 13.5 mA/cm², FF 59.6%, Eff. 6.89%)으로 곡선인자를 제외하고 거의 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 약간의 곡선인자 차이는 상부 AZO 전극의 두께가 두꺼워짐에 따라 실리콘 박막 층으로 흡

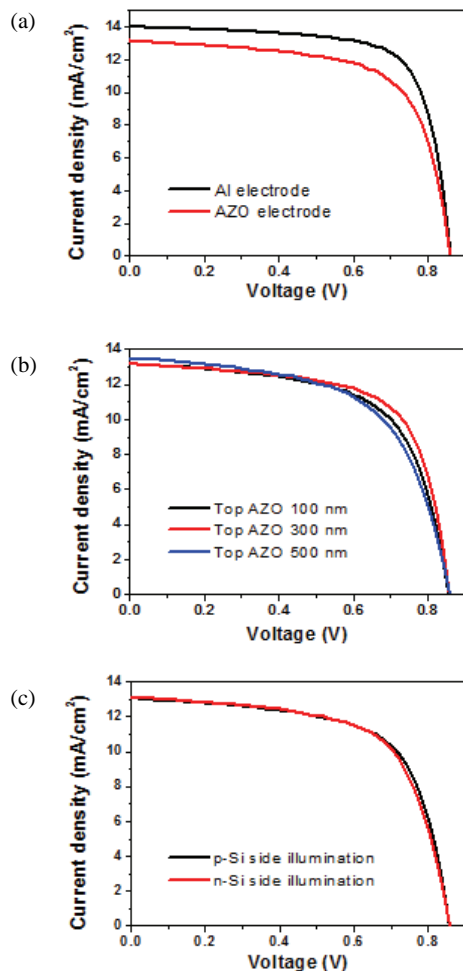


Fig. 3. Photovoltaic characteristics of silicon thin film solar cells according to (a) the difference of electrode materials, (b) thickness of transparent AZO electrodes, and (c) the direction of light illumination.

수되지 못하고 반사되거나 상부 AZO 전극 층으로 흡수되는 빛의 양이 증가하기 때문으로 판단된다. 마지막으로 그림 3의 (c)에서는 하나의 실리콘 박막 태양전지의 p-Si 방향(하부 AZO 전극 방향)으로의 흡광과 n-Si 방향(상부 AZO 전극 방향)으로의 흡광에 따른 특성의 차이를 그래프로 나타내었다. 본 실험에서는 AZO 두께에 따른 입사되는 빛의 양의 차이에 대한 영향을 배제하기 위해 상부 AZO 전극과 하부 AZO 전극 모두 500 nm 두께로 제작하여 그 특성을 측정하였다. 전류-전압 곡선에서 확인할 수 있듯이 흡광 방향에 따른 특성 변화는 전혀 없으며, 양방향 모두 우수한 태양전지 특성을 보이고 있다.

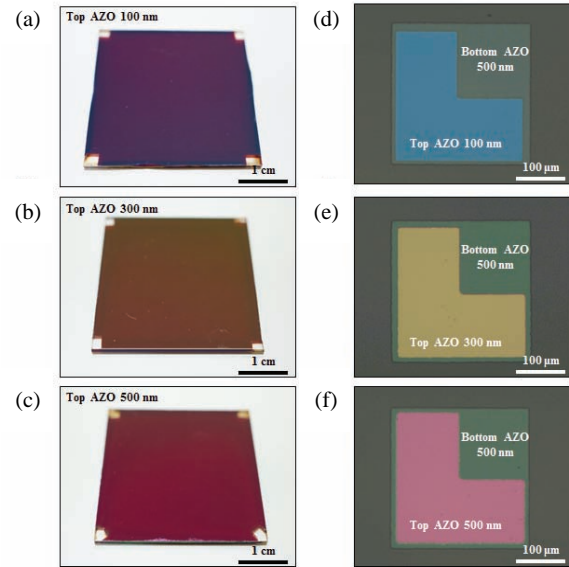


Fig. 4. (a)~(c) Photographs and (d)~(f) optical microscopic images of silicon thin film solar cells with different thickness of transparent top AZO electrodes.

실리콘 박막 태양전지를 건물 일체형 태양전지 시스템에 적용하기 위해서는 투과도의 확보와 이에 따른 태양전지 특성 저하를 막는 것이 가장 중요하다. 추가로 실제 건물 일체형 태양광 시스템은 태양전지의 효율을 높이기 위해 건물 외부 전면에 설치하는 것이 효과적인데, 이 때문에 건물 외관의 심미적 요소도 고려 대상에 포함된다. 일정량의 빛을 투과시켜 건물 내부의 일조량을 유지하는 것뿐만 아니라 외부로 반사되는 빛의 형태를 조절하여 건물 외관을 원하는 색상으로 표현할 수 있다. 건물 일체형 태양광 시스템에 주로 사용되는 염료감응형 태양전지의 장점 중 하나가 바로 태양전지의 표면 색상을 조절할 수 있다는 점이다 [14]. 염료감응형 태양전지에 사용되는 염료의 종류를 변경함으로써 태양전지 자체의 투과도와 반사되어 외부로 표출되는 빛을 원하는 방식으로 조절이 가능하다. 본 연구에서 사용한 AZO 투명전극의 경우도 두께를 조절함에 따라 표면 색상이 달라지는 것을 확인하였는데, 이는 두께에 따라 빛의 반사되는 정도와 굴절 정도의 차이에 의해 변화하는 것으로 판단된다. 그림 4에서는 AZO 전극을 사용한 실리콘 박막 태양전지의 반투명 특성과 두께에 따른 색상의 차이를 확인할 수 있는 사진과 광학 현미경(optical microscope) 이미지를 나타내었다. 그림 4의 (a), (b), (c) 사진은 AZO 전극을

사용하여 제작한 반투명 실리콘 태양전지의 표면으로 각각 100 nm, 300 nm, 500 nm의 AZO 전극 두께에 따라 외부로 표출되는 빛의 색상이 달라지는 것을 확인하였다. 그림 4의 (d), (e), (f)의 경우 포토리소그래피(photolithography) 공정을 이용하여 마이크로셀 패터닝(micro-cell patterning) 기술로 제작한 실리콘 박막 태양전지의 광학 현미경 이미지다 [15,16]. AZO 전극의 두께에 따라 각각의 태양전지 셀의 표면 색상이 뚜렷하게 변하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 투명 AZO 전극을 이용하여 실리콘 박막 태양전지를 제작하였으며, AZO 전극의 두께 따른 실리콘 박막 태양전지의 특성을 평가하였다. 또한 태양전지 전/후면에 투명 AZO 전극을 적용하여 전/후면에 빛을 조사하였을 경우 태양전지 특성의 차이가 거의 없는 것을 확인하였다. 높은 광흡수 계수를 가지고 있어 얇고 가벼운 박막으로 제작이 가능한 실리콘 박막 태양전지와 투명 AZO 전극을 결합한 반투명 실리콘 박막 태양전지는 건물 일체형 태양광 시스템에 좀 더 효율적으로 적용될 것이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 지역특화산업육성 창의융합 R&D 사업(R0005483) 및 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2015R D1A1A01061165)의 연구결과입니다.

REFERENCES

- [1] C. Peng, Y. Huang, and Z. Wu, *Energ. Build.*, **43**, 3592 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.032>]
- [2] A. Henemann, *Renewable Energy Focus*, **9**, 14 (2008). [DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1471-0846\(08\)70179-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1471-0846(08)70179-3)]
- [3] M. Saifullah, J. Gwak, and J. H. Yun, *J. Mater. Chem. A*, **4**, 8512 (2016). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/c6ta01016d>]
- [4] S. Yoon, S. Tak, J. Kim, Y. Jun, K. Kang, and J. Park, *Building and Environment*, **46**, 1899 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.03.010>]
- [5] G. E. Tulloch, *J. Photochem. Photobiol. A*, **164**, 209 (2004). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jphotochem.2004.1.27>]
- [6] B. P. Jelle, C. Breivik, and H. D. Rokenes, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **100**, 69 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.12.016>]
- [7] Y. Yang, P.G.O. Brien, G. A. Ozin, and N. P. Kherani, *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 221109 (2013). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4833542>]
- [8] H. Maurus, M. Schmid, B. Bliersch, P. Lechner, and H. Schade, *Refocus*, **5**, 22 (2004). [DOI: [http://dx.doi.org/10.016/S1471-0846\(04\)00255-0](http://dx.doi.org/10.016/S1471-0846(04)00255-0)]
- [9] Y. Lee, M. Choi, D. Kim, C. Kim, M. Song, J. Kang, Y. Jeong, K. Nam, S. Park, and S. Kwon, *J. Phys. Chem. C*, **116**, 23231 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/jp306360h>]
- [10] H. Zhou, W. Hsu, H. Duan, B. Bob, W. Yang, T. Song, C. Hsu, and Y. Yang, *Energy Environ. Sci.*, **6**, 2822 (2013). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/C3EE41627E>]
- [11] J. Poortmans and V. Arkhipov, *Thin Film Solar Cells* (2006).
- [12] X. Jiang, F. L. Wong, M. K. Fung, and S. T. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 1875 (2003). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1605805>]
- [13] B. Rech and H. Wagner, *Appl. Phys. A*, **69**, 155 (1999). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s003399900064>]
- [14] H. Otaka, M. Kira, K. Yano, S. Ito, H. Mitekura, T. Kawata, and F. Matsui, *J. Photochem. Photobiol. A*, **164**, 6 (2004). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jphotochem.2003.11.012>]
- [15] J. Nam, Y. Lee, C. S. Kim, H. Kim, D. H. Kim, and S. Jo, *J. Nanomater.*, **2016**, 3613928 (2016). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3613928>]
- [16] J. Nam, Y. Lee, W. Choi, C. S. Kim, H. Kim, J. Kim, D. H. Kim, and S. Jo, *Adv. Energy Mater.*, **6**, 1601269, (2016). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/aenm.201601269>]