투명 태양전지

DOI: 10.3938/PhiT.28.019

이강민·서관용

Transparent Solar Cells

Kangmin LEE and Kwanyong SEO

Transparent solar cells are attractive energy conversion devices because they can be used in various applications in our daily life, such as building-integrated photovoltaics and vehicle-integrated photovoltaics. Currently, transparent solar cells are being developed, and the main focus is dye-sensitized solar cells, organic photovoltaics, and perovskite solar cells. However, the transparent solar cells developed so far have limitations in efficiency, stability, and aesthetics. Accordingly, a different approach in the study of transparent solar cells is required to develop colorless transparent solar cells with high efficiency and stability. Crystalline silicon should be one of the best candidates for developing transparent solar cells with high efficiency and stability because conventional crystalline silicon solar cells are known to exhibit high power conversion efficiency and long-term stability compared to other solar cells. However, the opaque characteristic of the crystalline silicon wafer hinders the development of transparent solar cells using crystalline silicon. In this article, we present a novel approach to develop colorless, transparent, crystalline silicon solar cells that show the highest efficiency achieved among transparent solar cells to date.

저자약력

이강민 박사과정 학생은 울산과학기술원(UNIST) 에너지 및 화학공학부에서 학사 학위를 받았다. 2014년부터 울산과학기술원(UNIST) 에너지 및 화학공학부 석박사 통합 과정에 재학 중이다. 주요 연구 분야는 투명 결정질 실리콘 태양전지 및 투명 전자 소자이다.

서관용 교수는 한국교원대학교(KNUE)에서 학사, KAIST에서 석·박사 학위를 받았다. 2004년부터 2005년까지 UC Berkeley에서 방문 연구원, 2009년부터 2013년까지 미국 Harvard University에서 박사후연구원을 거쳐 2013년부터 울산과학기술원(UNIST) 에너지 및 화학공학부 교수로 재직 중이다. (kseo@unist.ac.kr)

Fig. 1. Applications of transparent solar cells.

들어가는 글

최근 10년간 화석연료의 고갈, 개발도상국의 고도성장에 따른 급격한 에너지 수요 증가, 지구온난화로 인한 기후 변화 등 여러 에너지 환경의 변화로 전 세계적으로 재생에너지에 대한 관심과 수요가 증가하고 있다. 이에 따라 친환경적이며, 무한한 태양에너지를 이용하는 태양전지 시장 또한 필요성이 강조되고 있다. 이러한 태양전지 시장의 급속한 성장에도 불구하고 태양광 발전은 현재 전 세계 에너지 수요량의 2% 미만의 낮은 공급량을 보이고 있다. 태양광 발전이 전 세계 에너지 수요량 대비 낮은 에너지 공급량을 보이는 주된 원인은 태양전지 사용이 태양광 발전소나 건물의 옥상과 같은 제한적인 발전설비에만 국한될 수밖에 없는 특성 때문이다. 이러한 한계점을 극복하기 위한 방안 중 하나인 투명 태양전지는 건물 및 차량의 창문, 모바일 디바이스 등에 적용될 수 있어 태양전지 발전 설치범위를 극대화시킬 수 있는 장점이 있다.(그림 1 참조)

투명 태양전지 동향

투명 태양전지는 1991년 스위스의 그라첼 박사에 의해 염료 감응형 태양전지(Dye Sensitized Solar cells)가 보고된 후,^[1]

REFERENCES

- [1] B. O'regan and M. Grätzel, Nature 353, 737 (1991).

Fig. 2. Transparent dye-sensitized solar cells developed by Samsung SDI (2008). 자료 출처: 한국전력신문.

염료감응형 태양전지를 중심으로 개발되어 왔다. 우리나라에서도 2008년 삼성 SDI가 염료감응형 태양전지를 이용하여 다양한 색상의 건물일체형 투명 태양전지를 보고하였다.(그림 2 참조) 이후, 많은 연구소에서 염료감응형 태양전지뿐만 아니라 유기 태양전지(organic solar cells), 페로브스카이트 태양전지(perovskite solar cells)를 이용한 투명 태양전지도 보고하고 있다.^[2-5]

투명 태양전지 개발을 위해서는 높은 에너지 변환 효율, 외부적 환경에 대한 높은 옥외 사용 안정성, 적용대상의 외관을 해치지 않기 위한 심미적 요소를 모두 고려해야 한다.(그림 3 참조) 그러나, 최근까지 개발된 투명 태양전지 중에서는 이 3가지 요소를 모두 만족시키는 태양전지를 찾기는 어렵다. 가장 우선적으로 고려할 요소는 에너지 변환 효율이다. 투명 태양전지의 경우 입사되는 빛의 일부만을 에너지 전환에 이용하기 때문에, 일반적으로 불투명한 태양전지와 비교하여 낮은 에너지 변환 효율을 보인다. 따라서 불투명 태양전지의 효율이 낮을 경우, 고효율 투명 태양전지는 기대하기 어렵다. 그런데, 그림 4에서 확인할 수 있듯이 현재 결정질 실리콘 태양전지와 페로브스카이트 태양전지를 제외한 대부분의 태양전지들은 불투명한 상태에서도 10% 안팎의 낮은 에너지 변환 효율을 보이고 있기 때문에 이를 기반으로 한 고효율 투명 태양전지 제작에는 한계가 있다.

표 1과 표 2에서 최근 국내와 해외 연구팀이 개발한 투명 태양전지 특성을 확인할 수 있다. 표에서 확인할 수 있듯이 염료감응형 태양전지부터 페로브스카이트 태양전지까지 다양한 종류의 태양전지를 기반으로 한 투명 태양전지들이 개발되고 있지만 고효율의 투명 태양전지는 찾아보기 어렵다. 불투명 태양전지에서는 20%가 넘는 에너지 전환 효율을 보일 수 있는 페로브스카이트 태양전지의 경우에도, 이를 기반으로 한 투명 태

Fig. 3. Factors to consider when developing transparent solar cells.

Fig. 4. Comparison graph of solar cells efficiency.^[6]

양전지 연구는 초기 단계로 아직까지 가시광 영역 평균 광 투과도 24.5%에서 4%대 에너지 변환 효율에 그치는 것을 확인할 수 있다. 이렇듯 현재까지 개발된 투명태양전지는 낮은 에너지 변환 효율을 보이고 있으며, 최근의 연구는 낮은 에너지 변환 효율을 최대한 높이고자 하는 연구가 주를 이루고 있다.

두 번째로 고려할 요소는 안정성이다. 투명 태양전지가 실제

REFERENCES

- [2] P. Selvaraj *et al.*, Solar Energy Materials and Solar Cells **175**, 29 (2018).
- [3] E. Della Gaspera *et al.*, Nano Energy **13**, 249 (2015).
- [4] G. E. Eperon, V. M. Burlakov, A. Goriely and H. J. Snaith, ACS Nano **8**, 591 (2013).
- [5] C. J. Traverse, R. Pandey, M. C. Barr and R. R. Lunt, Nature Energy **2**, 849 (2017).
- [6] M. A. Green *et al.*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications **26**, 427 (2018).

Table 1. Research trends : Republic of Korea.

기반물질		비정질 실리콘 ^[7]	염료감응형 ^[8]	유기물 ^[9]	페로브스카이트 ^[10]
참고문헌		Thin Solid Films, 2013, 547, 212–215	Electron. Lett., 2011, 47, 281–283	ACS Appl. Mater. Interfaces, 2018, 10, 3596–3601	Sol. Energy Mater Sol. Cells, 2018, 176, 435–440
특성	평균 광투과도	17.9% (400–800 nm)	85% (at 550 nm)	52% (400–800 nm)	24.5% (400–800 nm)
	에너지 변환 효율	5.9%	2.3%	3.12%	4.21%
	안정성 평가 유무	×	×	×	×
	색상	colored	colored	colored	colored

Table 2. Research trends : Other countries.

기반물질		비정질 실리콘 ^[11]	염료감응형 ^[12]	유기물 ^[13]	NIR 흡수형 ^[14]
참고문헌		Mater. Sci. Eng., B, 2018 , 229, 1–5	Sol. Energy Mater Sol. Cells, 2018 , 175, 29–34	Adv. Funct. Mater., 2017 , 27, 1605908	Adv. Opt. Mater., 2014 , 2, 606–611
특성	평균 광투과도	34% (500–800 nm)	25% (390–700 nm)	27.4 % (400–600 nm)	88.3% (400–700 nm)
	에너지 변환 효율	4.9%	5.15%	5.6%	0.4%
	안정성 평가 유무	×	×	×	×
	색상	colored	colored	colored	colorless

Fig. 5. (Left) Color windows, (Right) colorless windows.

환경에 적용되기 위해서는 눈, 비 등의 외부적 환경에 대해 높은 옥외 안정성을 가지고 있어야 한다. 하지만 앞에서 언급했듯이, 투명 태양전지 연구는 현재 에너지 변환 효율 향상을 위한 연구가 주를 이루고 있어 아직까지 안정성 평가가 이루어진 연구를 찾아보기 어렵다. 하지만, 불투명 태양전지의 경우를 보면 염료감응형 태양전지, 유기물 태양전지 등 유기물을 포함하고 있는 태양전지는 실리콘 태양전지와 같은 무기물 태양전지에 비해 매우 낮은 옥외 안정성을 보이고 있고, 최근 주목을 받고 있는 페로브스카이트 태양전지의 경우에도 낮은 수분 안정성 및 광안정성을 보여 상용화를 위해서는 선행되어야 할 많은 연구가 필요한 상황이다. 이러한 문제는 투명 태양전지에서 동등하게 작용될 것으로 예상되며, 각 태양전지들의 옥외

안정성 평가 및 향상에 관한 연구도 필요할 것으로 보인다.

마지막으로 심미적 요소의 경우, 연구 초기에는 염료 및 유기 물질의 색을 조절하여 다양한 색상을 보이는 투명 태양전지 연구가 주를 이루었으나, 색을 보이는 태양전지는 사용 분야가 제한적이기 때문에 최근에는 일반 유리와 같이 색을 보이지 않는 무색·투명 태양전지를 개발하고자 하는 연구가 늘어나고 있다. 대표적으로 2014년에 옥스퍼드 대학(University of Oxford)에서는 섬 구조(island type)의 페로브스카이트를 적용하여 무색에 가까운 페로브스카이트층을 만들었지만, 금(Au) 전극과 같이 색을 보이는 다른 층 때문에 완벽한 무색·투명 태양전지 구현에는 실패하였다.^[15] 같은 해 미시간 주립대학에

REFERENCES

- [7] J. W. Lim, S. H. Lee, Y. J. Lee and S. J. Yun, Thin Solid Films **547**, 212 (2013).
- [8] H. Choi *et al.* Electronics Letters **47**, 281 (2011).
- [9] D. H. Shin, C. W. Jang, H. S. Lee, S. W. Seo and S.-H. Choi, ACS Applied Materials & Interfaces **10**, 3596 (2018).
- [10] K. M. Kim *et al.*, Solar Energy Materials and Solar Cells **176**, 435 (2018).
- [11] R. Yang, C.-H. Lee, B. Cui and A. Sazonov, Materials Science and Engineering: B **229**, 1 (2018).
- [12] P. Selvaraj *et al.*, Solar Energy Materials and Solar Cells **175**, 29 (2018).
- [13] G. Xu *et al.* Advanced Functional Materials **27**, 1605908 (2017).
- [14] Y. Zhao, G. A. Meek, B. G. Levine and R. R. Lunt, Advanced Optical Materials **2**, 606 (2014).
- [15] Z. Liu, P. You, S. Liu and F. Yan, ACS Nano **9**, 12026 (2015).

Table 3. Summary of the developed transparent solar cells.

고려 요소	염료 감응형 태양전지	유기 태양전지	페로브스카이트 태양전지	NIR 흡수형 태양전지
높은 광변환 효율	×	×	△	×
외부적 환경에 대한 안정성	×	×	×	- (보고되지 않음)
심미성	△ (무색 구현 ×)	△ (무색 구현 ×)	△ (무색 구현 ×)	○ (무색 구현 ○)

서는 가시광 영역 파장의 빛은 모두 투과시키고, 적외선(NIR) 영역의 빛만을 이용하여 전기를 생산하는 유기와 같은 무색·투명 태양전지를 개발했지만 1% 미만의 효율을 보여 아직 많은 연구가 필요하다.^[14]

결정질 실리콘 태양전지

결정질 실리콘 태양전지는 1950년대에 벨연구소에서 최초로 개발된 후,^[16] 현재는 25% 이상의 높은 에너지 변환 효율을 보이고 있다.^[6] 뿐만 아니라, 20년 이상 사용 가능한 높은 옥외 안정성과 기존 반도체 공정을 그대로 활용할 수 있다는 장점을 바탕으로 현재 상용 태양전지 시장의 85% 이상을 차지하고 있다.

더불어, 결정질 실리콘 태양전지의 단점으로 여겨졌던 높은 가격 또한 지속적으로 하락하여 현재는 가격 경쟁력에서도 점차 우위를 보이고 있는 상황이다. 이처럼 현재 결정질 실리콘 태양전지는 이미 효율과 안정성이 입증되었으며 상용화도 이루어져 있어, 이를 기반으로 투명 태양전지 개발이 성공할 경우, 높은 에너지 변환 효율 및 높은 옥외 사용 안정성을 만족시킬 수 있을 뿐 아니라 다른 종류의 투명 태양전지보다 빠른 상용화도 가능할 것으로 쉽게 예상할 수 있다.

그러나, 태양전지 및 반도체 공정에서 주로 사용되는 150 μm 전후의 두께를 갖는 결정질 실리콘 웨이퍼는 모든 가시광을 흡수하는 불투명성으로 인해 반투명 태양전지 개발에 활용되기에는 기본적인 한계를 가지고 있다. 그렇다면 어떻게 결정질 실리콘을 이용하여 투명 태양전지를 제작할 수 있을까? 투명한 결정질 실리콘 태양전지를 제작하기 위해 고려할 수 있는 방법 중 한 가지는 결정질 실리콘 웨이퍼의 초박막화이다. 비어-램버트 법칙(Beer-Lambert law)에 따르면 입사광의 강도와 투과광의 강도는 광이 투과하는 기판의 두께와 관련이 있다(식 (1)).

$$I_T = I_0 e^{-\beta l} \quad (1)$$

Fig. 6. Solar cells market share.

Fig. 7. Trend of crystalline silicon PV module price. 자료: BNEF

식 (1)에서 I_T 는 투과광의 강도를 의미하며 I_0 는 입사광의 강도, β 는 흡수 계수(absorption coefficient), l 은 기판의 두께를 의미한다. 기판의 두께가 얇아지면 광투과도가 높아질 수 있다. 결정질 실리콘의 경우에도 두께가 얇아짐에 따라 광투과도가 증가하게 되고 10 μm 이하의 두께가 되면 가시광(380~780 nm) 영역대의 빛이 투과할 수 있게 되면서 투광형 결정질 실리콘 기판 제작이 가능해진다. 이러한 결정질 실리콘의 초박막화는 현재까지 투광형 결정질 실리콘 기판을 제작할 수 있는 유일한 방법으로 알려져 있다. 이는 현재 출원된 특허 동향을 통해서도 알 수 있는데, 현재 결정질 실리콘 기반 투명 태양전지에 관한 특허는 전체 투명 태양전지 특허의 10% 정도를 차지하고 있으며, 그 중 대부분이 결정질 실리콘의 초박막화를 통한 투명 태양전지 특허이며, 그 외의 다른 접근 방식은 찾아보기 어렵다.

그럼에도 불구하고, 초박막 결정질 실리콘은 투명 태양전지 개발에는 뚜렷한 한계를 보이고 있다. 비록 10 μm 이하 두께의 결정질 실리콘 기판이 가시광 영역의 빛을 투과시킬지라도, 550 nm 파장 기준으로 4% 미만의 매우 낮은 광투과도를 보이기 때문이다(그림 9(a)). 더불어, 박막 결정질 실리콘 기판은

REFERENCES

- [16] D. M. Chapin, C. Fuller and G. Pearson, Journal of Applied Physics 25, 676 (1954).

Fig. 8. Patent application trends of transparent solar cells.

장파장 영역에서 cut-on 파장이 존재하여 무색 구현이 불가능하다. 더욱이 장파장 영역의 낮은 광흡수율로 인해 태양전지 제작 시 높은 에너지 변환 효율을 기대하기 어렵다(그림 9(b)). 따라서 결정질 실리콘을 이용하여 고효율 투명 태양전지를 개발하기 위해서는 지금까지와는 다른 새로운 접근 방식이 요구된다.

이러한 초박막 결정질 실리콘의 한계로 인해, 독일 콘스탄츠 대학교(University of Konstanz)에서는 실리콘 태양전지 일부 분에 사각형 모양의 구멍을 형성하여 일부 영역에서 광투과가 가능한 태양전지를 제작하기도 하였지만, 엄밀한 의미의 완벽한 투명 태양전지라고 보기는 어렵다(그림 10).

무색 · 투명 결정질 실리콘 태양전지

최근 울산과학기술원(UNIST) 서관용 교수 연구팀은 상용 결정질 실리콘 태양전지에 사용되는 150 μm 이상 두께의 결정질 실리콘 웨이퍼를 무색·투명하게 변화시키는 새로운 방법을 개발하였다. 뿐만 아니라, 이를 이용하여 세계 최고의 효율을 보이는 투명 태양전지 개발에도 성공하였다.

이를 위해, 연구팀은 먼저 150 μm 두께의 결정질 실리콘 기판(그림 11(a))에 가시광 영역의 모든 파장이 간섭 및 회절 현상 없이 모두 투과 가능한 광투과 영역을 설계하였다. 또한, 인간의 최소 분리 시력(2분각)을 고려하여 광투과 영역 사이의 간격

Fig. 9. (a) Transmittance spectra of the thin crystalline silicon substrate with thicknesses of 50 μm (blue line), 30 μm (green line), and 10 μm (red line). (b) Absorption spectra of thin crystalline silicon substrate with thicknesses of 200 μm (blue line), 10 μm (red line).

Fig. 10. Light transmissive crystalline silicon solar cells. 자료: Architect: Arnold Wild, Stadtwerke Konstanz GmbH; System provider: Sunways, 2011, Photo: Ian Collins.

을 설계하였다. 그 결과 그림 11(b)에서 확인할 수 있듯이 우리와 구별이 되지 않을 정도의 완벽한 무색·투명 결정질 실리콘을 개발하여 현재 관련 연구를 진행 중이다.

더불어, 개발된 무색·투명 결정질 실리콘의 두께는 상용 결

a) Cut-on 파장: 50%의 투과율을 보이는 지점.

b) 최소 분리 시력: 떨어져 있는 두 점이나 선을 두 개로 인식할 수 있는 능력.

Fig. 11. (a) Conventional 200-μm-thick crystalline silicon substrate. (b) Transparent crystalline silicon substrate with 200-μm-thickness.

Fig. 12. Comparison of fabrication process of commercialized crystalline silicon solar cells (top), and colorless transparent crystalline silicon solar cells (bottom).

정질 실리콘 웨이퍼와 동일한 두께를 가지고 있기 때문에, 광투과 영역을 제외한 부분에서는 결정질 실리콘 태양전지가 사용하는 300에서 1100 nm까지 파장 영역대의 빛을 효과적으로 흡수할 수 있다. 이외에도 광흡수 영역의 굴절률, 안정성 등 대부분의 물리적 특성이 상용 결정질 실리콘 웨이퍼와 매우 유사하기 때문에, 태양전지 제작 시 p-n 접합 형성 공정부터 패시베이션 및 반사방지막 공정까지 대부분의 공정을 기존 실리콘 태양전지의 제작 공정과 동일한 공정으로 진행할 수 있다(그림 12). 이는 결정질 실리콘 기반 투명 태양전지가 향후 빠른 상용화가 가능함을 의미할 뿐 아니라, 기존 상용 결정질 실리콘 태양전지에서 사용하는 구조를 그대로 사용하고 있기 때문에 기존 결정질 실리콘 태양전지와 같이 높은 옥외 사용 안정성을 기대할 수 있음을 의미한다.

실제로 연구팀이 개발한 무색·투명 결정질 실리콘 기반을 이용하여 제작된 투명 결정질 실리콘 태양전지는, 20%의 광투과도에서는 12%가 넘는 매우 높은 에너지 변환 효율을 보였으며, 50%의 광투과도에서도 7%가 넘는 효율을 보였다. 이는

Fig. 13. Illustration of a future building integrated with transparent crystalline silicon solar cells.

현재까지 개발된 다양한 종류의 투명 태양전지들과 비교해 보아도 월등하게 높은 에너지 변환 효율이다. 하지만, 연구팀은 표면 패시베이션 연구 및 선택적 영역의 광흡수 향상 기술 개발 등을 통해 현재보다 더 높은 에너지 변환 효율을 보이는 투명 결정질 실리콘 태양전지 개발이 가능할 것으로 보고 있다.

나가는 글

전 세계적으로 건물의 에너지 소비량 및 온실가스 감축을 위해, 제로에너지건축물에 대한 의무화를 추진 중이다. 국내의 경우에도 국토교통부는 신규 건축물을 대상으로 2025년까지 제로에너지빌딩 의무화를 추진하고 있고, 산업통상자원부의 경우 건물에서 사용하는 전력의 100%를 신재생에너지로 충당하는 RE100 캠페인 도입 방안을 검토하고 있다. 이러한 세계적 추세에 따라 투명 태양전지는 매우 매력적인 친환경 에너지 변환 소자이지만, 아직까지는 낮은 효율, 검증되지 않은 안정성 및 색상 이슈로 인해 아직 연구 초기 단계라는 인식이 지배적이었다. 하지만 결정질 실리콘을 기반으로 고효율 투명 태양전지가 개발됨에 따라 빠른 상용화가 가능하도록 현재 연구 개발이 진행되고 있다. 특히, 연구 개발이 성공적으로 수행될 경우, 그림 13에서 볼 수 있는 것처럼 유리나 같이 투명한 태양전지가 적용된 건물을 볼 수 있을 것으로 기대된다.