Eco-friendly colorful Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells technology

Yong-Duck Chung^{1,2†}, Dae-Hyung Cho¹, Woo-Jung Lee¹

¹Emerging Materials Research Section, Electronics and Telecommunications Research Institute
218 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Republic of Korea

²Advanced Device Technology, Korea University of Science and Technology
217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Republic of Korea

친환경 컬러 Cu(In,Ga)Se₂ 박막 태양전지 기술

정용덕^{1,2†}, 조대형¹, 이우정¹

¹한국전자통신연구원 신소재연구실, ²과학기술연합대학원대학교 차세대소자공학

(Received November 15 2020; Revised December 9 2020; Accepted December 10 2020)

Abstracts

The conventional achromatic photovoltaic modules are considering only the power generation performance, but recently, as the demand for building-integrated photovoltaics (BIPV) increases for energy self-sufficiency in urban areas, photovoltaic modules of various colors, sizes, and shapes are being applied to buildings. Colorful photovoltaics are implemented by using the physical properties of each layer of the photovoltaic module configuration. Color is realized in Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) thin-film solar cells using multi-layer interference coating, the control of optical path length of the front layer, transparent diffraction grating, and light emission of quantum dots. The solar technology composed of eco-friendly materials is also required for resident acceptance. To avoid the toxic CdS buffer layer in CIGS thin-film solar cells, a Zn-based buffer layer using a chemical solution deposition method, sputtering deposition method, and the atomic layer deposition method is being actively studied.

Keywords: Eco-friendly, colorful, Cu(In,Ga)Se₂, thin-film, solar cells.

[†]Corresponding Author: Yong-Duck Chung
E-mail: ydchung@etri.re.kr

1. 서론

최근 정부는 2050년 탄소중립을 이루겠다고 선언했다. 문재인 대통령은 국회 시정연설에서 ‘국제사회와 함께 기후변화에 적극 대응하여 2050년 탄소중립을 목표로 나아 가겠다’라고 밝혔다. 탄소중립은 온실가스 배출량과 제거량이 상쇄돼 순배출량이 ‘0’이 되는 상태로 일명 넷제로, 배출제로라 불린다.¹⁾ 이미 세계적으로 이산화탄소 배출량 규제에 따라 화석연료에 의존한 에너지 생산을 규제하고 있으며, 이에 따라 신재생에너지의 개발 및 보급에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재 사용되고 있는 신재생에너지는 태양광, 태양열, 지열, 바이오, 풍력, 수력, 연료전지, 수소 에너지 등이 있으며, 특히 건축물에서는 태양광, 태양열, 지열 등이 많이 사용되고 있다.²⁾ 현재 대부분의 태양광을 이용한 발전은 주로 외곽에 대규모 단지를 중심으로 이루어지고 있으나, 향후 건물일체형 태양광 (building integrated photovoltaics, BIPV) 및 도심에 설치된 태양광 모듈을 이용한 발전의 증가가 예상되고 있다. 그 중 건축물에 적용되는 BIPV 시스템은 건물의 지붕 및 입면에 태양광을 설치하는 시스템으로, 대지가 부족하고 건물이 많은 국내 환경에 가장 적합한 시스템으로 각광받을 것으로 기대된다.³⁾ BIPV는 벽, 옥상 또는 정면과 같은 건물 덮개 부분에서 건축 자재를 대체할 수 있으며, 건축물에서

흔히 볼 수 있는 불투명 및 반투명 외장재로 금속 또는 유리와 함께 사용된다. BIPV는 유연성, 크기, 외관 및 모양과 같은 발전 성능 이외의 기능적 측면이 중요 시된다.⁴⁾ 또한, 기존 태양광 기술은 공간적인 제약과 함께 주민 수용성 등의 한계로 인해 보급 확대에 어려움을 겪고 있다. 특히, 상용화를 위해 납, 수은, 카드뮴과 같은 규제물질이 포함되지 않는 친환경 재료로 구성된 태양광 기술이 요구되고 있는 상황이다.^{5), 6)}

본 논문에서는 도심 건물에 적용할 수 있는 태양전지의 요구사항 및 컬러 태양광 구현 기술에 대해 알아보

Fig. 1. 일반적인 태양광 모듈이 적용된 사례 (a)와 컬러 태양광 모듈이 적용된 사례 (b)

Fig. 2. 일반적인 태양전지 모듈과 BIPV 모듈의 요구사항 비교⁷⁾

고, 이에 적합한 Cu(In,Ga)Se₂(CIGS) 박막 태양전지에 대해 논의하고자 한다. 또한, CIGS 박막 태양전지에 컬러를 구현하기 위한 다양한 기술과 무독성 버퍼층 Zn(O,S) 박막의 물리적/화학적 특성을 이해하며, 다양한 증착 방법으로 제작한 Zn(O,S)버퍼층이 적용된 CIGS 박막 태양전지의 특성에 대해 알아보하고자 한다.

2. 컬러 태양광 기술

기존의 태양광 모듈은 발전성능만을 고려하여 무채색 계열이 대부분을 차지하고 있으나, 최근에는 도심의 에너지 자급자족을 위해 BIPV 수요가 증가함에 따라 다양한 크기와 모양, 컬러의 태양광 모듈이 건물

Fig. 3. 전 세계 BIPV 시장 전망⁸⁾

에 적용되고 있다 (Fig. 1). Fig. 2에서 나타난 바와 같이, 기존의 태양광 모듈은 효율과 가격이 중요한 요소인 반면에 BIPV 모듈에서는 발전성능 뿐만 아니라, 신뢰성 및 안정성 등이 요구되고 있으며, 특히 컬러와 같은 심미적인 요소가 강조되고 있다.⁷⁾ BIPV는 2030년에 전체 전기 수요의 약 22%를 담당할 것으로 예상된다. BIPV 시장은 적용 분야에 따라, 창호, 벽체, 지붕으로 나눌 수 있으며, 2017년 11억달러에서 2026년에 약 70억 달러로 시장이 확대될 것으로 예상하고 있다 (Fig. 3).⁸⁾ 일반적인 태양광 모듈 구조는 Fig. 4와 같다. 태양광 모듈은 습기, 산소, 바람, 눈과 같은 외부 충격으로부터 반도체 소재를 보호하는 것을 염두에 두고 만들어 지는데, encapsulants를 이용하여 물리적, 화학적, 기계적 손상을 받지 않도록 제작된다. 이를 위해, 후면의 back sheet가 있으며, encapsulation을 위한 ethylene vinyl acetate (EVA), 후면전극, Si로 대표되는 반도체 소재, 반사방지막, 전면전극, encapsulation을 위한 EVA, cover 유리, frame으로 구성된다.⁹⁾ 컬러 태양광 기술은 태양광 모듈 구성에 사용된 각 layer의 물성을 이용하여 컬러를 구현할 수 있다.

태양광 모듈에서 컬러를 구현하는 방법은 다음과 같다. 첫째로, 결정질 Si 위에 있는 반사 방지막의 두께를 제어하여 컬러를 구현할 수 있다. Fig. 5 (a)는 회색

Fig. 4. 일반적인 결정질 태양광 모듈의 구조. 반사 방지막 (anti-reflection layer)가 태양전지 위에 형성됨⁹⁾

Fig. 5. 태양광 모듈의 컬러 구현 방법 (a) 결정질 태양전지의 원래 색깔과 반사 방지막이 형성된 경우 비교, (b) 다양한 컬러로 구현된 염료감응형 태양전지, (c) 다양한 컬러 유리, (d) 특수 필터가 적용된 BIPV 제품 (e) 컬러 encapsulation층이 적용된 BIPV 모듈^{9, 10)}

Fig. 6. Plasmonic nanostructures를 이용한 다양한 컬러 구현 방법¹¹⁾

빛의 결정질 Si 태양전지가 반사방지막 코팅을 통해 갈색으로 바뀐 것을 보여주고 있다. 최적화된 반사 방지막의 두께를 제어하다 보면 약간의 광전변환 손실을 감수해야 할 수도 있다. 두번째로, active layer 즉, 흡수층 자체를 이용하여 컬러를 구현하는 것이다. 대표적

로 염료감응형 태양전지가 있으며, 사용하는 염료의 색깔을 변화시켜서 Fig. 5 (b)와 같이 다양한 컬러를 구현할 수 있다. 세번째로, Fig. 5 (c)와 같이 컬러를 구현하는 층 또는 컬러필터를 적용하는 것이다. 이 방법은, 다양한 무늬와 컬러를 구현할 수 있지만, 성능 저하와 추

Fig. 7. Luminescent layer가 적용된 태양전지 (a) luminescent layer를 결정질 Si와 CdTe 태양전지에 적용한 결과,¹²⁾ (b) perovskite quantum dots embedded composite film을 이용한 컬러 구현,¹³⁾ (c) InP/ZnSeS 양자점을 이용하여 결정질 Si 태양전지와 CIGS 박막 태양전지에 적용한 결과,¹⁴⁾ (d) perovskite nanocrystals을 유연 CIGS 박막 태양전지에 적용한 결과¹⁵⁾

가적인 소재 및 공정에 따른 비용 증가가 발생할 수 있다. 네번째로, cover 유리를 이용하여 컬러를 구현하는 방법이다. 유리는 원래 자체로 약간의 컬러를 띄고 있는데, 유리 제작 시, 금속 산화물을 추가하여 오래된 교회나 성당에서 볼 수 있는 것처럼 스테인 유리와 같은 컬러 유리를 제작할 수 있다. 다른 방법으로 다층박막을 코팅하여 컬러를 구현할 수 있다 (Fig. 5 (d)). 단순히 페인트를 이용하여 컬러를 구현하는 방법이 활용되기도 한다. 다섯번째로, Fig. 5 (e)와 같이 컬러가 있는 lamination 필름을 이용하여 컬러를 구현할 수도 있다. 컬러 태양광 모듈을 제작하기 위해서는 사용하고자 하는 소재 및 비용, 모듈의 내구성 등을 고려하여 적절한 방법을 적용해야 한다.¹⁰⁾

그 외 방법으로, plasmonic nanostructure를 이용하여 컬러를 구현하기도 한다. (Fig. 6) Static plasmonic 컬러 구현 방법으로, grating과 주기적 배열을 이용하거나, subwavelength nanohole 배열, nanohole과 nanodisk 배열을 동시에 이용하기도 한다. Dynamically tunable plasmonic 컬러 구현 방법으로,

polarization을 이용하거나, 전기적 제어, 온도 제어, 화학적 제어, 기계적 제어, MEMS 또는 NEMS를 이용한 방법을 사용하기도 한다.¹¹⁾ 또한, 최근에는 luminescent layer를 추가하여, 단파장의 에너지를 활용하는 방법으로 효율 향상과 함께 컬러를 구현하는 기술이 보고되고 있다. Fig. 7 (a)는 luminescent layer를 결정질 Si와 CdTe 태양전지에 적용한 결과이고,¹²⁾ Fig. 7 (b)는 perovskite quantum dots embedded composite film을 이용하여 컬러를 구현하고, 효율이 향상된 결과를 보여주고 있다.¹³⁾ Fig. 7 (c)은 InP/ZnSeS 양자점을 이용하여 결정질 Si 태양전지와 CIGS 박막 태양전지에 적용한 결과를 보여주고 있으며,¹⁴⁾ Fig. 7 (d)은 perovskite nanocrystals을 유연 CIGS 박막 태양전지에 적용한 결과이다.¹⁵⁾

태양광 모듈은 발광소자가 아니기 때문에 휴대폰과 같은 선명한 색을 구현하기는 어렵다. 이론적인 계산에 따르면, 반사를 이용해서 컬러를 구현하기 때문에 컬러가 구현될 때 손실은 불가피 하다. 각각의 컬러가 구현될 때 얻을 수 있는 최고 효율은 Fig. 8과 같다. 흰색

Dark skin 0.103 32.7 %	Light skin 0.354 30.6 %	Blue sky 0.185 31.8 %	Foliage 0.133 32.6 %	Blue flower 0.233 31.3 %	Bluish green 0.418 30.2 %
Orange 0.311 30.9 %	Purplish blue 0.114 32.2 %	Moderate red 0.199 31.6 %	Purple 0.064 32.9 %	Yellow green 0.444 30.5 %	Orange yellow 0.436 30.1 %
Blue 0.057 32.7 %	Green 0.230 32.0 %	Red 0.126 32.2 %	Yellow 0.607 28.9 %	Magenta 0.200 31.4 %	Cyan 0.189 31.7 %
White 9.5 0.909 24.1 %	Neutral 8 0.585 28.4 %	Neutral 6.5 0.357 30.6 %	Neutral 5 0.191 32.0 %	Neutral 3.5 0.089 32.9 %	Black 2 0.032 33.4 %

Fig. 8. 이론적으로 계산한 컬러에 따른 태양전지 변환효율¹⁶⁾

인 경우에 가장 효율이 낮은 24.1%가 예상되며, 흡수가 가장 좋은 검은색의 경우에 이론적인 효율은 33.4%가 된다.¹⁶⁾

3. CIGS 박막 태양전지

위에서 살펴보았듯이 다양한 방법을 활용하여 태양전지 컬러 구현이 가능하다. CIGS 박막 태양전지는 23% 이상의 높은 광전변환 효율을 보일 뿐 아니라 웨이퍼 기반의 실리콘 태양전지와 달리 유연 기판에 제작 가능한 장점이 있다.¹⁷⁾ 일반적인 CIGS 박막 태양전지 구조는 Fig. 9과 같다. 유리, 스테인리스 스틸과 같은 금속 포일, 플라스틱 등을 기판으로 활용할 수 있다. 일반적으로 후면전극인 Mo를 스퍼터링 방법으로 형성한 후, 동시증발법 또는 스퍼터링과 셀렌화/황화를 이용하는 2단계 방법을 이용하여 CIGS 흡수층을 형성한다.¹⁸⁾ 형성된 흡수층 위에 화학적 용액증착법, 스퍼터링, 원자층 증착법 등의 방법으로 Zn(O,S) 또는 CdS로 대표되는 버퍼층을 형성하고, i-ZnO와 ITO로 대표되는 투명전극으로 원도우층을 증착하고 그리드 전극을 형성하여 소자

Fig. 9. 일반적인 Cu(In,Ga)Se₂ 박막 태양전지 구조¹⁹⁾

를 완성하게 된다.¹⁹⁾ CIGS의 밴드갭 에너지는 약 1.1 eV ~ 1.2 eV이며 이를 파장으로 환산하면 약 1100 nm 부근에 해당한다. 버퍼층으로 사용되는 Cd 및 Zn 계열 화합물은 약 2.4 eV ~ 3.0 eV, 즉 400 nm ~ 500 nm 파장 부근의 밴드갭 에너지를 갖기 때문에 CIGS 박막 태양전지는 대부분 400 nm 이상, 1100 nm 이하의 파장 영역에서 에너지 변환이 이루어 진다.

Fig. 10. (a) 고굴절률과 저굴절률 박막을 번갈아 적층하여 생성된 narrow-bandwidth stopband filter (NBSF) 필름의 기본 구조에 대한 개략도. (b) 유리 기판에 형성한 적색 NBSF, 녹색 NBSF 및 청색 NBSF 필름의 FE-TEM 이미지. (c) RGB 컬러 CIGS 태양전지의 반사율, 반사 스펙트럼의 색좌표 및 전산모사 결과 비교, 실제 반사 이미지. (d) 기준 시료 대비 컬러 태양전지의 상대전류밀도 및 외부양자효율 스펙트럼.²⁰⁾

4. CIGS 박막 태양전지의 컬러화 기술

4.1 다층 간섭 코팅 기술

다층 간섭 코팅 기술은 태양전지뿐 아니라 저반사 또는 컬러를 구현하기 위한 다양한 소자에 널리 사용되는 기술이다. 주로 산화물 계열의 고굴절률 박막과 저굴절률 박막을 교대로 형성하여 원하는 특정한 파장의 보강 간섭을 일으켜 반사 또는 투과 컬러를 구현하게 된다. 박막 물질 종류 (굴절률), 두께, 적층 횟수 등을 조절하면 채도, 명도 등을 제어할 수 있다. 태양광 모듈로의 적용을 위해, 유리 기판에 다층 간섭 코팅을 형성하여 태양전지 위에 얹어 컬러를 구현하는 방법이 일반적이라 할 수 있다. 잘 알려진 상용 제품으로는 SwissINSO사의 KromatixTM가 있다.

CIGS 박막 태양전지에도 다층 간섭 코팅을 적용하려는 연구가 활발하다. KIST 연구진은 SiO₂/Al₂O₃의 적층 박막을 CIGS 박막 태양전지 상에 증착하여 선명한 컬러를 구현함과 동시에 광손실을 최소화하였다.²⁰⁾ SiO₂

및 Al₂O₃의 가시광 영역대에서의 굴절률은 각각 약 1.47 및 1.75이다. 박막의 두께와 적층 횟수를 달리하여 빨강, 초록, 파랑색을 구현할 수 있다. 적층 박막의 모식도 및 단면 TEM 이미지를 Fig. 10 (a) 및 (b)에 각각 나타냈다. 목표로 한 파장에서의 반사율은 50 nm 이하의 매우 작은 반치폭을 달성할 수 있다. 때문에 육안상으로 선명한 컬러가 관찰되며, 색지수 상에서 넓은 컬러 구현 범위를 갖는다 (Fig. 10 (c)). 단락전류밀도 (J_{sc})는 다층 간섭 코팅을 적용하지 않았을 경우 대비하여, 빨간색에서 92.8%, 초록색에서 95.0%, 파랑색에서 99.4% 수준을 보인다 (Fig. 10 (d)).

4.2 전면층의 광경로길이 조절 기술

태양전지의 구성 층 자체를 이용하여도 컬러 구현이 가능하다. 앞서 소개한 다층 간섭 코팅 기술은 선명한 컬러를 구현할 수 있는 장점이 있지만, 태양전지 제작 후 추가적인 재료 및 공정이 필요하여 생산 비용을 증가시키는 단점이 있다. CIGS 태양 전지에는 버퍼층과 투

Fig. 11. (a) Mo 후면 전극, CIGS 광 흡수층, Zn(O,S) 버퍼 및 ITO 투명 전극을 포함하는 CIGS 박막 태양 전지의 단면 SEM 이미지. (b) ITO/Zn(O,S) 투명 전면층 부근의 확대 된 SEM 이미지. 화살표로 표시된 것처럼 입사 태양 광은 ITO, Zn (O, S) 및 CIGS의 표면에서 반사된다. (c) Zn(O,S) 두께 (ITO 두께 = 140nm) 및 (d) ITO 두께 (Zn(O,S) 두께 = 50nm) 변화에서의 전류 밀도-전압 곡선. (e) 일광에서 외부에서 촬영한 CIGS 박막 태양전지 시료 사진. (f) Y = 0.05에서 CIE 1931 xyY 색 공간에 표시된 측정 및 전산모사 색 좌표.²¹⁾

명 전극을 포함한 투명층이 형성되어 있어 추가 비용 없이 반사광의 특성을 조절할 여지가 있다. 이 두 투명층은 굴절률이 다르기 때문에 두께, 즉 광로 길이에 따라 광 간섭 효과에 의해 반사되는 주 파장이 변경되어 컬러를 조절할 수 있다. BIPV에 사용되는 태양 광 모듈은 매우 높은 광도 (생생한 컬러)를 가질 필요보다는 낮은 광도 (어두운 컬러)를 주변 환경과 잘 조화시킬 수 있도록 하는 것이 중요하다. ETRI에서는 CIGS 태양 전지에서 스퍼터링 방법으로 증착된 Zn(O,S) 버퍼층과 ITO 투명 전극의 두께를 변경하여 태양전지의 컬러를 조절하고 그에 따른 태양광 성능을 관찰하였다 (Fig. 11 (a), (b), (c), (d)).²¹⁾ Zn(O,S) 및 ITO 박막의 굴절률은 가시광선 파장에서 0.34 이상의 차이가 충분히 크게 나타나 광경로, 즉 두께를 변경하여 지배적인 반사 파장 범위의 제어가 가능하다. Zn(O,S)층의 두께는 35 nm에서 65 nm로, ITO 층의 두께는 20 nm에서 175 nm로 변화시켜 육안으로 다양한 색채를 관찰 할 수 있으며 색좌표로도 표현된다 (Fig. 11 (e), (f)). 각 층의 두께와 해당 컬러에 따른 J_{sc} 손실을 전산모사하여 광학 손실을 정량적

으로 예측할 수 있다. 태양 전지의 성능은 전기적, 광학적 특성의 영향을 받았지만 각 층의 두께에 따라 규격화된 효율의 평균값은 0.8에서 1.0 사이의 균일 한 분포를 나타낸다. Zn(O,S) 및 ITO의 두께를 변경하는 것 외에도 MgF_2 층을 적용하여 컬러 인덱스 및 셀 성능 선택을 다양화 할 수 있다. MgF_2 두께를 늘리면 광도와 J_{sc} 손실이 감소한다.

4.3 투명 회절 격자 기술

회절에 의한 빛 간섭을 일으켜 컬러 변화를 구현할 수 있다. 투명한 격자를 사용하는 회절 유도 간섭은 최소한의 광손실로 컬러를 만들어 낸다. 평평한 표면의 반사 파동은 서로 간섭하지 않는 반면, 격자 구조의 반사 회절 파동들은 다양한 각도로 이동하고 특정 각도에 대해 보강 간섭을 일으킨다. 보강 간섭의 회절 각은 파장에 따라 달라 지므로 회절 파동 사이의 간섭을 조절하여 컬러를 구현할 수 있다. 다양한 분야에서 색의 각도 의존성을 줄이기 위해 연구되지만, 태양전지에서는 이러한 각도 의존성을 잘 이용하면 건물, 차량 및 모바일 장

Fig. 12. (a) CIGS 박막 태양 전지에서 ZnO 나노격자 패턴의 제조 공정 개략도. (b) 다양한 관찰 각도에서 촬영한 770 nm 및 1400 nm 회절격자 주기의 다채로운 태양전지 시료 사진. (c) 각 격자 주기의 55.4° 입사각 조건에서 CIE 1931 xyY 색공간에 나타난 관찰각도 변화에 따른 측정 및 전산모사된 색좌표. (d) 서로 다른 격자주기 (770 nm 및 1400 nm)를 가진 태양전지 시료에 대한 전류 밀도-전압 (J-V) 곡선.²²⁾

치와 같은 응용 분야에 의도적으로 활용 가능하다. 또한, 반사 회절을 이용 시 태양 전지 외부에서 회절 유도 간섭이 발생하기 때문에 격자 구조를 사용하면 기존 방법에 비해 높은 투과율을 얻을 수 있다. ETRI에서는 투명한 ZnO 나노격자를 간단한 나노전사 리소그래피 방법 (Fig. 12 (b))을 통해 CIGS 박막 태양전지에 형성하여 광전변환 효율 손실이 거의 없는 다채로운 태양 전지를 구현하였다 (Fig. 12(b)).²²⁾ 컬러 구현은 파장, 입사각, 격자 주기 및 회절 오더와 같은 다양한 매개 변수에 따라 반사 회절을 계산하여 정량화 될 수 있다. 주로 1차 반사 회절을 활용하여 다양한 비축 (off-axis) 관찰 각도에서 뚜렷한 컬러가 구현 가능하다 (Fig. 12 (c)). 관찰 각도에 따른 색 변화 정도인 색상 감도는 격자주기를 변경하면 조절 가능하다. ZnO 나노격자에 의해 유도된 태양 전지의 빛 흡수 손실은 매우 적다. 상대 J_{SC} 손실은 대조군 시료에 비해 2.84% 이하이다 (Fig. 12 (d)). 비스듬한 입사되는 태양광에 의한 J_{SC} 손실은 대조군 시료보다 ZnO 나노격자에서 더 작다. 격자 시료는 자가 세척 태양 전지 적용에 적합한 훨씬 더 높은 소수성을 가진다.

4.4 양자점을 이용한 발광 기술

태양전지 상에 양자점을 도포하는 기술은 주로 태양 전지 성능을 향상시키기 위한 목적으로 개발되었다. 양자점 화합물은 주로 II-VI족 화합물의 코어/셸 구조로 이루어진다. CIGS 박막 태양전지에서 흡수 효율이 낮은 UV 부근의 단파장 빛을 양자점 층이 흡수한 후 흡수 효율이 높은 더 긴 파장대 (더 낮은 에너지)의 빛을 방출한다. 때문에 광흡수 이득이 생겨 단락전류밀도가 증가하게 된다. 이 때 방출되는 빛은 하부의 태양전지로도 향하지만 그 반대 방향으로도 방출되어 컬러를 띄게 된다. 때문에 양자점의 물질, 크기, 균일도 등을 조절하면 방출되는 컬러 (파장)을 조절할 수 있다. 즉, 효율 향상과 동시에 원하는 컬러를 구현할 수 있다. GIST에서는 CdSe/CdZnS 구조의 양자점을 CIGS 박막 태양전지 상에 도포하여 효율 이득을 관찰하였다 (Fig. 13 (a)).²³⁾ Luminescent down-shifting (LDS) 층 역할을 하는 CdSe/CdZnS의 코어/셸 양자점을 MgF₂ 반사 방지 코팅과 CIGS 태양 전지의 창 층 사이에 삽입하면 광 이득을 향상된다. LDS 층은 단파장 범위의 광자를 흡수하고 609 nm 범위의 광자를 재방출하며 (Fig. 13 (b)), 이는

Fig. 13. (a) 윈도우층에 증착된 CdSe/CdZnS 양자점을 적용한 CIGS 박막 태양전지의 개략도. (b) 325 nm의 여기 파장을 사용하여 얻은 CdSe/CdZnS 양자점의 흡수 및 PL 스펙트럼. 삽입도는 실내 조명과 365nm의 UV 조명에서 촬영한 양자점 솔루션의 사진. (c) 스펙트럼 복사 조도 (AM1.5G) 및 다양한 양의 양자점을 적용한 CIGS 박막 태양전지의 EQE 결과. (d) 다양한 양의 양자점에 대한 CIGS 박막 태양전지의 전류 이득 및 손실 곡선. (e) 80 μ g의 양자점을 포함하는 CIGS 박막 태양전지에 대한 EQE 및 IQE 스펙트럼과 참조 셀의 EQE 비교 결과. (f) 기준 셀과 비교 한 전류 밀도 및 전압 특성.²³⁾

윈도우층과 버퍼층을 통해 투과되고 CIGS 층에 흡수된다. 300 nm ~ 520 nm 영역의 단파장에서의 평균 외부 양자 효율은 약 51 % 향상된다 (Fig. 13 (c), (d), (e)). 그 결과 CdSe/CdZnS 양자점을 사용한 CIGS 박막 태양전지의 단락전류밀도와 광전변환효율은 각각 34.04 mA/cm²와 14.29%를 보이며, 이는 양자점이 없는 기존 태양전지에 비해 각각 4.35%와 3.85% 향상된 값이다 (Fig. 13 (f)).

5. CIGS 박막 태양전지의 친환경화 기술

CIGS 태양전지의 도심 중심형 BIPV 적용은 친환경 소재 개발 연구에 발화점이 되었다. 일반적으로 CIGS 박막 태양전지에서는 화학적 용액증착법 (chemical bath deposition, CBD)을 이용한 CdS 박막이 버퍼층으로 사용된다. 용액공정을 이용할 경우 쉽고 빠르게 고품질의 CdS 박막을 형성할 수 있으며, 격자상수 및 밴드 정렬이 CIGS와 접합하였을 때 유리하여, 고효율 태양전지 제작을 위한 버퍼층으로 활용되어 왔다.²⁴⁾ 그러

Fig. 14. 다양한 버퍼층이 적용된 CIGS 박막 태양전지의 외부양자효율 그래프 (모든 소자에 반사방지막이 적용된 결과임)²⁶⁾

나, CdS 화합물은 상용화측면에서 중금속이라는 치명적인 약점과, 밴드갭 2.4 eV로 단파장 영역의 광흡수의 한계가 있다. 친환경을 위한 Cd를 포함하지 않는 버퍼층에 대한 연구개발은 CIGS 박막 태양전지 연구분야에서 끊임없이 요구되어지고 있는 과제이며, 지금까지

Table 1. 증착방법 및 증착물질에 따른 각기 다른 버퍼층이 적용된 CIGS 박막 태양전지의 최고효율 비교 ²⁶⁾

Buffer layer	Dep. method	Absorber	Window layer	Eff. (%)	V _{OC} (V)	J _{SC} (mA cm ⁻²)	FF (%)	Area (cm ²)	Ref
CdS	CBD	CIGSe	i-ZnO/ZnO:Al	21.7*	0.746	36.6	79.3	0.5	[51]
Zn(O,S)	CBD	CIGSe	Zn _{0.75} Mg _{0.25} O/ ZnO:Al	21.0*	0.717	37.2	78.6	0.5	[27]
Zn(O,S)	CBD	CIGSSe	ZnO:B	17.9*	0.66 (cell calc.)	38.1	71.1	900	[43]
Zn(O,S)	ALD	CIGSe	ZnO:B	19.8*	0.715	36.5	75.8	0.522	[107]
Zn(O,S)	Sputtering	CIGSe	ZnO:Al	18.3*	0.654	38.4	72.8	0.49	[104]
Zn _{1-x} Mg _x O	ALD	CIGS	i-ZnO/ In ₂ O ₃ :Sn	15.5*	0.92	23.4	72.2	0.433	[89]
Zn _{1-x} Mg _x O	ALD	CIGSe	i-ZnO/ZnO:Al	18.1	0.668	35.7	75.7	0.5	[105]
In _x S _y	Thermal evaporation	CIGSe	i-ZnO/ZnO:Al	18.2	0.673	36.3	74.5	0.5	[106]
Zn _{1-x} Sn _x O _y	ALD	CIGSe	i-ZnO/ZnO:Al	18.2*	0.689	35.1	75.3	0.49	[41]

*Externally certified efficiency.

도 CdS 버퍼층을 대체하기 위해 많은 후보물질들이 활발히 연구되고 있다. 그 중, 가장 대표적인 대체 물질로 Zn(O,S) 물질을 꼽을 수 있는데, O와 S 비율 조절에 따른 밴드갭 에너지 조절이 가능하고, CdS에 비해 큰 밴드갭 에너지로 인한 단파장에서의 광이득, 다양한 증착 방법으로 증착 가능한 장점이 있기 때문이다. 실제로, Zn(O,S) 박막을 버퍼층으로 갖는 CIGS 박막 태양전지의 변환효율은 CdS 버퍼층을 갖는 CIGS 박막 태양전지와 같거나 일부 높은 효율이 보고 되고 있다.²⁵⁾

Table 1은 다양한 증착 방법으로 증착된 버퍼층을 갖는 CIGS 박막 태양전지의 효율 결과를 보여주고 있다.²⁶⁾ 버퍼층 소재 중, 용액증착법으로 증착한 Zn(O,S) 버퍼층을 갖는 CIGS 박막 태양전지 효율이 우수한 것을 알 수 있으며, CdS 버퍼층을 갖는 CIGS 박막 태양전지와 거의 유사한 효율 값을 나타낸다. Fig. 14은 CIGS 박막 태양전지의 외부양자효율을 나타낸 그래프로, Zn(O,S) 버퍼층을 사용할 경우 실제로 단파장 영역에서 뚜렷하게 광이득이 나타나는 것을 확인할 수 있다.²⁶⁾

5.1 화학적 용액증착법

CIGS 박막 태양전지의 버퍼층 제작으로 가장 많이 쓰이는 방법은 용액공정 증착 기술이며, 기존 CdS 버퍼층 역시 용액공정을 이용해서 손쉽게 고품위의 박막을 제

작할 수 있었다. 용액공정은 증착물질의 몰농도, 공정온도, 공정시간 및 용액의 회전속도 등을 변수로 하여 화학반응물이 표면에 쌓이면서 박막이 성장한다. 각 변수들을 조절하여 적절한 조건에서 고품위의 박막을 빠르고 손쉽게 증착 가능하다는 장점이 있다. Zn(O,S) 박막 또한, CdS와 마찬가지로 용액공정을 기반으로 초기연구를 시작하였다. 한가지 흥미로운 것은, Zn(O,S)를 용액공정으로 증착한 버퍼층을 CIGS 박막 태양전지에 적용할 경우, 초기 효율에 비해 1시간 동안 1 sun 기준의 빛을 쏘인 후 효율을 측정하게 되면 빛 젖음(light soaking) 효과에 의해 눈에 띄게 증진율이 향상되어 효율이 상당히 증가한다 것이다. 이러한 현상은 많은 실험 결과에서 보고 되었지만, 이에 대한 원인은 효율향상에 기여하는 층이 CIGS 흡수층인지 Zn(O,S) 버퍼층인지 불분명하여, 여전히 많은 연구가 진행되고 있다. ETRI에서는 용액공정으로 성장된 Zn(O,S) 박막의 빛 젖음 효과에 대한 원인을 밝혀 내기 위해, 암모니아 몰 농도를 변수로 Zn(O,S) 버퍼층을 증착 한 후, CIGS 박막 태양전지를 제작하였고, 증진을 향상과 함께 뚜렷한 빛 젖음 효과를 관찰하였다.²⁷⁾ 빛 젖음에 기여하는 파장을 알아보고자 파장의존성 C-V depth profile 측정을 수행하였고, 계면의 결함분포를 분석하였다. 파장의존성 C-V 측정을 통해 자외선 영역의 빛에 의해 효율이 향상되며 이는 p-n 접합에 존재하는 결함의 패시베이션

Fig. 15. 암모니아 물농도 2M에서 증착된 Zn(O,S) 적용된 태양전지의 빛 젖음 전(a), 후(b)의 파장의존성 J-V 측정 결과와 동일한 소자에서 빛 젖음 전(c), 후(d)의 파장의존성 C-V depth profile 측정 결과.²⁷⁾

Fig. 16. 용액증착기술로 증착된 CBD-Zn(O,S)를 버퍼층으로 갖는 CIGS 박막 태양전지의 빛 젖음 효과를 보여주는 밴드구조 제안²⁷⁾

Fig. 17. 광펌핑테라헤르츠 분광법을 이용하여 광펌핑 에너지에 의존하는 CIGS 흡수층(a)과 CIGS위에 Zn(O,S)를 증착한 후(b) 측정된 광전자의 감쇠곡선²⁸⁾

효과에 의한 것임을 알 수 있었다 (Fig. 15). 계면에 주로 존재하는 (정확히는 CIGS 흡수층 표면) 준안정 결합 ($V_{Se} + V_{Cu}$)³⁻에 자외선 영역을 충분히 쏘여주면, 빛에 의해 여기된 광전자가 결합에 포획되어 전자수집을 용이하게 하여 효율이 향상된다는 모델을 제안하였다 (Fig. 16). 또한, 빛 젖음 효과를 광전자의 움직임으로 설명하고자, S의 전구체인 thiourea 물 농도를 변수로 증착된 Zn(O,S)를 CIGS 박막 태양전지에 적용 후 효율 및 빛 젖음 효과에 대해 관찰하였다.²⁸⁾ X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) depth profile 측정을 통해, 깊이 방향으로 형성된 Zn(O,S) 박막의 화학결합 분포를 분석하였고, 흡수층으로의 S의 확산 및 박막 내에 존재하는 균일한 분포가 효율에 긍정적인 영향을 줄 수 있다는 것을 실험적으로 밝혀냈다. 결합에 관여하는 광전자의 움직임을 측정하고자 광펌핑 테라헤르츠 분광법을 도입하였고, 그동안 CIGS 박막 태양전지 분야에서 보고되지 않았던 특이한 감쇠곡선을 측정하였다 (Fig. 17). 펌핑 파장에 의존하여 감쇠곡선이 다르게 측정되었는데, 이는 CIGS 흡수층과 Zn(O,S) 버퍼층에 흡수되는 빛의 파장의존성에 의한 결과였다. 즉, 광전자의 계면에 존재하는 준안정 결합에 광전자의 포획 후 패시베이션 효과에 의해 재여기되는 특이한 곡선이 검출된 것이었다. 이는, 앞서 제시하였던 용액공정으로 증착한 Zn(O,S)를 버퍼층으로 갖는 CIGS 박막 태양전지의 빛 젖음 효과 매커니즘을, 계면에 존재하는 준안정 결합과 관련된 매우 빠

른 광전자의 동역학을 근거로, 실제 실험값으로 증명된 연구결과이다.

5.2 스퍼터링 증착법

스퍼터링 증착법이란, 증착하려는 물질(타겟)과 증착하려는 기판 사이에 가스를 주입한 후, 타겟에 마이너스 전압을 인가하여 글로우 방전을 발생시켜 가스를 이온화 시키면 플라즈마가 형성되고, 타겟의 표면에서 가스 이온의 충돌로 인해 떨어져 나온 입자가 전압차에 의해 기판 표면에 증착하여 박막을 형성한다. 이 방법은, 어려운 재료도 성막이 가능하고 형성된 박막이 강하고 치밀하다는 장점이 있으며, 증착공정이 이미 잘 알려져 있어 접근이 용이하다. ETRI에서는 스퍼터링 증착법을 활용하여 Zn(O,S) 박막을 증착하였고, S/(O+S)비율을 조절하여 $0 < x < 1$ 에 해당하는 Zn(O_{1-x}S_x) 단위 박막을 제작하였다. XRD 측정을 통해 결정구조에서의 격자상수를 도출한 후, 박막의 조성에 해당하는 밴드갭 에너지를 구하였다 (Fig. 18). Zn(O_{1-x}S_x)박막의 경우, S 함량에 따라 밴드 보잉 현상이 나타나는데, 실제로 단위박막 제작 후, Fig. 18 (d)와 같이 스퍼터링 박막으로 제작한 Zn(O_{1-x}S_x) 박막에서도 S 함량에 의존하는 밴드갭 에너지 휨 현상을 확인하였다.²⁹⁾ CIGS 흡수층 위에 버퍼층을 증착하면, 페르미 준위가 평형상태가 되고 전위차가 발생하게 되어, 밴드의 불연속성에 의해 전도대 밴드 오프셋 값 (ΔE_C)이 결정된다. 기존 CdS를 버퍼로 사

Fig. 18. (a) $O_2/(Ar+O_2)$ 비율에 따라 형성된 Zn(O,S) 박막의 (0002) 결정구조를 나타내는 XRD 결과. (b) 박막의 조성비를 추정하기 위한 S/(O+S) 조성비의 함수로 도출된 격자상수 이전 결과. (c) Zn(O,S) 박막의 $O_2/(Ar+O_2)$ 비율에 따른 S/(O+S) 조성비 그래프. (d) Zn(O,S) 박막의 S/(O+S) 조성비에 따른 밴드갭 에너지.²⁹⁾

Fig. 19. (a) S/(O+S) 함량에 따른 Zn(O,S) 박막의 valence band spectrum. (b) 스퍼터링 방법으로 증착한 Zn(O,S)를 갖는 태양전지의 깊이방향으로의 SIMS 측정 결과. (c) S/(O+S) 함량에 따른 Zn(O,S) 박막이 CIGS 박막과 접합 후, 밴드 에너지 차이에 의한 ΔE_C 값.³⁰⁾

용한 CIGS 박막 태양전지의 경우, ΔE_C 는 0 eV ~ 0.4 eV 값을 갖는 스파이크 형태의 밴드구조에서 우수한 성능을 보였다. 스퍼터링 방법으로 S 함량을 변수로 갖는 Zn(O,S) 버퍼층을 CIGS 박막 태양전지에 적용하였고, 밴드구조에 의존하는 효율결과를 도출해내는 결과를 얻

을 수 있었다.³⁰⁾ XPS의 valence band spectrum 측정을 통해 S 함량에 따른 Zn(O,S) 박막의 ΔE_C 값을 구한 후, S/(O+S) 양이 0.48에서 0.61로 증가하면서 ΔE_C 값이 -에서 +값으로 변화하는 것을 관찰하였고 (Fig. 19), 클리프 형태의 밴드구조에 비해 스파이크 밴드구

Fig. 20. S/(O+S) 함량에 따른 Zn(O,S)박막의 밴드 에너지 차이에 의한 ΔE_c 값에 의존하는 태양전지 특성 파라미터 결과³⁰⁾

Fig. 21. 원자층 증착법으로 증착한 Zn(O,S)박막의 조성비에 따른 밴드 구조³¹⁾

조가 태양전지에 적합하다는 것을 확인하였다. 스퍼터링 증착법으로 제작된 Zn(O,S) 박막을 버퍼층으로 갖는 CIGS 박막 태양전지의 경우, S/(O+S) 함량 0.73, ΔE_c 값 0.26에서 가장 우수한 특성을 보였다 (Fig. 20).

5.3 원자층 증착법

원자층 증착법은 전구체가 펄스 형태로 기판에 공급되어 과잉 공급되는 기체는 더 이상 반응하지 않는 표면 제한적 반응이 주요기술이다. 전구체의 펄스비를 조절하여 조성을 결정할 수 있으며, 원자층으로 증착이 가능하여 매우 얇은 두께의 정밀한 조절이 가능하다. 또한, 스퍼터링 증착에서 발생하는 흡수층의 표면 플라즈마 손상을 배제할 수 있어, 2000년대 이후부터 CIGS 박막 태양전지의 버퍼층으로 원자층 증착법으로 제작된 Zn(O,S) 물질이 적극적으로 도입되었다.

Uppsala 대학에서는 원자층 증착법으로 제작한 Zn(O,S)를 버퍼층으로 갖는 CIGS 박막 태양전지의 경우, 공정의 재현성이 확보되지 않는 문제점이 발생하였는데, 이는 CIGS 흡수층을 완벽하게 덮지 못하

는 불완전한 Zn(O,S) 막질 특성 때문임을 알아냈다. Diethylzinc, H₂O, H₂S 전구체를 사용함으로써 원자층 증착법으로 CIGS 흡수층 표면 전영역에 균일하게 증착된 Zn(O,S)막질을 얻는데 성공하였다. 31) 원자층 증착법으로 제작한 Zn(O,S) 박막 역시, CIGS 흡수층과 S 함량에 따른 Zn(O,S)와의 접합에서의 ΔE_c 와 밴드 구조에 대한 분석이 이루어졌다 (Fig. 21). 위 연구팀은 Zn(O,S)박막을 두께와 S 함량을 조절하며 CIGS 박막 태양전지에 버퍼층으로 적용하였고, 효율과 밴드구조에서의 효율 상관관계를 도출하였다.

6. 결론

현재 대부분의 태양광을 이용한 발전은 주로 외곽에 대규모 단지를 중심으로 이루어지고 있으나, 향후 BIPV 및 도심에 설치된 태양광 모듈을 이용한 발전의 증가가 예상되고 있다. 태양광 모듈이 사람과 가까워지게 되므로 컬러 구현 등을 통해 심미적 우수성을 확보해야 함과 동시에 모듈 내에 함유되어 있는 물질이 인체에 무해한 성분이어야 한다. 컬러 태양광 기술은 태양광 모듈 구성의 각 층의 물성을 이용하여 컬러를 구현하게 된다. 다층 간섭 코팅 기술, 전면층의 광경로길이 조절 기술, 투명 회절 격자 기술, 양자점을 이용한 발광 기술 등을 활용한 CIGS 박막 태양전지의 컬러화 기술을 소개하였다. 독성 물질인 CdS 버퍼층을 대체하기 위하여 화학적 용액증착법, 스퍼터링 증착법, 원자층 증착법을 이용한 Zn 기반 버퍼층 기술 등이 활발하게 연구되고 있다. 무독성 버퍼층 적용된 CIGS 박막 태양전지의 고효율화를 위해서는 다양한 증착방법으로 형성된 Zn(O,S) 박막의 물리적/화학적 특성과 그에 따른 CIGS 박막 태양전지 특성에 대한 이해가 매우 중요하다.

7. Acknowledgement

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 기후변화대응기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2016M1A2A2936754).

REFERENCES

1. S. Cha: 'South Korea's Moon targets carbon neutrality by 2050': (2021)
2. 송종화, 이승준, and 김규진, "건물 일체형 태양광 시스템 (BIPV) 성능시험 평가기술", *E2M - 전기전자와 첨단 소재*, **27** [10] (2014)
3. 송형준, "결정질 실리콘 컬러 태양광 모듈 기술 동향", *한국태양광발전학회지*, **5** [1] 38-45 (2019)
4. Z. Muhammad Aleem, C. Sanchari, M. Kumar, C. Eun-Chel, and Y. Junsin, "Review on the Progress in Building Integrated Photovoltaic Materials and Module Technology", *신재생에너지*, **15** [4] 47-54 (2019)
5. I. J. Park, and D. H. Kim, "Organic-Inorganic Perovskite for Highly Efficient Tandem Solar Cells", *Ceramist*, **22** [2] 146-69 (2019)
6. 유형렬, and 최종민, "친환경 페로브스카이트 태양전지 최신 기술 동향", *전기화학회지 = J. Korean Electrochem. Soc.*, **22** [3] 104-11 (2019)
7. J. Palm, L. Tautenhahn, J. Weick, R. Kalio, J. Kullmann, A. Heiland, S. Grinstead, N. Schmidt, P. Borowski, and F. Karg: 'BIPV Modules: Critical Requirements and Customization in Manufacturing'. *Proc. 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)*, Waikoloa, HI, 10-15 June 2018 2018 pp. 2561-66
8. C. Ballif, L.-E. Perret-Aebi, S. Lufkin, and E. Rey, "Integrated thinking for photovoltaics in buildings", *Nat. Energy*, **3** [6] 438-42 (2018)
9. P. Sehati, I. Malmros, S. Karlsson, and P. Kovacs: 'Aesthetically pleasing PV modules for the Built Environment' (RISE Research Institutes of Sweden AB, 2019. 2019)
10. G. Eder, G. Peharz, R. Trattnig, P. Bonomo, E. Saretta, F. Frontini, C. S. P. López, H. R. Wilson, J. Eisenlohr, N. M. Chivelet, S. Karlsson, N. Jakica, and A. Zanelli: 'Coloured BIPV-Market, Research and Development': (International Energy Agency, 2019)
11. M. Song, D. Wang, S. Peana, S. Choudhury, P. Nyga, Z. A. Kudyshev, H. Yu, A. Boltasseva, V. M. Shalaev, and A. V. Kildishev, "Colors with plasmonic nanostructures: A full-spectrum review", *Appl. Phys. Rev.*, **6** [4] 041308 (2019)
12. E. Klampaftis, D. Ross, G. Kocher-Oberlehner, and

- B. S. Richards, "Integration of Color and Graphical Design for Photovoltaic Modules Using Luminescent Materials", *IEEE J. Photovolt.*, **5** [2] 584-90 (2015)
13. L. Meng, X.-G. Wu, S. Ma, L. Shi, M. Zhang, L. Wang, Y. Chen, Q. Chen, and H. Zhong, "Improving the efficiency of silicon solar cells using in situ fabricated perovskite quantum dots as luminescence downshifting materials", *Nanophotonics*, **9** [1] 93 (2020)
 14. B. G. Jeong, D. Hahm, J. W. Park, J. Y. Kim, H.-E. Song, M. G. Kang, S. Jeong, G. Kang, W. K. Bae, and H.-J. Song, "Colorful opaque photovoltaic modules with down-converting InP/ZnSe_xS_{1-x} quantum dot layers", *Nano Energy*, **77** 105169 (2020)
 15. Y.-C. Kim, H.-J. Jeong, S.-T. Kim, Y. H. Song, B. Y. Kim, J. P. Kim, B. K. Kang, J.-H. Yun, and J.-H. Jang, "Luminescent down-shifting CsPbBr₃ perovskite nanocrystals for flexible Cu(In,Ga)Se₂ solar cells", *Nanoscale*, **12** [2] 558-62 (2020)
 16. J. Halme, and P. Mäkinen, "Theoretical efficiency limits of ideal coloured opaque photovoltaics", *Energy Environ. Sci.*, **12** [4] 1274-85 (2019)
 17. M. Nakamura, K. Yamaguchi, Y. Kimoto, Y. Yasaki, T. Kato, and H. Sugimoto, "Cd-Free Cu(In,Ga)(Se,S)₂ Thin-Film Solar Cell With Record Efficiency of 23.35%", *IEEE J. Photovolt.*, **9** [6] 1863-67 (2019)
 18. D. Abou-Ras, S. Wagner, B. J. Stanbery, H.-W. Schock, R. Scheer, L. Stolt, S. Siebentritt, D. Lincot, C. Eberspacher, K. Kushiya, and A. N. Tiwari, "Innovation highway: Breakthrough milestones and key developments in chalcopyrite photovoltaics from a retrospective viewpoint", *Thin Solid Films*, **633** [Supplement C] 2-12 (2017)
 19. Y.-D. Chung, D.-H. Cho, W.-S. Han, N.-M. Park, K.-S. Lee, and J. Kim, "Incorporation of Cu in Cu(In,Ga)Se₂-based Thin-film Solar Cells", *J. Korean Phys. Soc.*, **57** [6] 1826-30 (2010)
 20. S. Lee, G. Y. Yoo, B. Kim, M. K. Kim, C. Kim, S. Y. Park, H. C. Yoon, W. Kim, B. K. Min, and Y. R. Do, "RGB-Colored Cu(In,Ga)(S,Se)₂ Thin-Film Solar Cells with Minimal Efficiency Loss Using Narrow-Bandwidth Stopband Nano-Multilayered Filters", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11** [10] 9994-10003 (2019)
 21. D.-H. Cho, W.-J. Lee, M.-E. Kim, B. Shin, and Y.-D. Chung, "Color tuning in Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cells by controlling optical interference in transparent front layers", *Prog. Photovoltaics*, **28** [8] 798-807 (2020)
 22. D.-H. Cho, S.-H. Hong, W.-J. Lee, J. Y. Kim, and Y.-D. Chung, "Colorful Solar Cells Utilizing Off-Axis Light Diffraction via Transparent Nanograting Structures", *Nano Energy*, **80**, 105550 (2021)
 23. H.-J. Jeong, Y.-C. Kim, S. K. Lee, J.-H. Yun, and J.-H. Jang, "Enhanced spectral response of CIGS solar cells with anti-reflective subwavelength structures and quantum dots", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **194** 177-83 (2019)
 24. P. Jackson, D. Hariskos, R. Wuerz, O. Kiowski, A. Bauer, T. M. Friedlmeier, and M. Powalla, "Properties of Cu(In,Ga)Se₂ solar cells with new record efficiencies up to 21.7%", *Phys. Status Solidi RRL*, **9** [1] 28-31 (2015)
 25. T. M. Friedlmeier, P. Jackson, A. Bauer, D. Hariskos, O. Kiowski, R. Wuerz, and M. Powalla, "Improved Photocurrent in Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells: From 20.8% to 21.7% Efficiency with CdS Buffer and 21.0% Cd-Free", *IEEE J. Photovolt.*, **5** [5] 1487-91 (2015)
 26. T. Feurer, P. Reinhard, E. Avancini, B. Bissig, J. Löckinger, P. Fuchs, R. Carron, T. P. Weiss, J. Perrenoud, S. Stutterheim, S. Buecheler, and A. N. Tiwari, "Progress in thin film CIGS photovoltaics - Research and development, manufacturing, and applications", *Prog. Photovoltaics*, **25** [7] 645-67 (2017)
 27. W.-J. Lee, H.-J. Yu, J.-H. Wi, D.-H. Cho, W. S. Han, J. Yoo, Y. Yi, J.-H. Song, and Y.-D. Chung, "Behavior of Photocarriers in the Light-Induced Metastable State in the p-n Heterojunction of a Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cell with CBD-ZnS Buffer Layer", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **8** [34] 22151-58 (2016)
 28. W.-J. Lee, D.-H. Cho, J. M. Bae, M. E. Kim, J. Park, and Y.-D. Chung, "Ultrafast wavelength-dependent carrier dynamics related to metastable defects in Cu(In,Ga)Se₂ solar cells with chemically deposited Zn(O,S) buffer layer", *Nano Energy*, **74** 104855 (2020)
 29. D.-H. Cho, W.-J. Lee, B. Shin, and Y.-D. Chung, "Analysis of vertical phase distribution in reactively sputtered zinc oxysulfide thin films", *Appl. Surf. Sci.*, **486** 555-60 (2019)

30. D.-H. Cho, W.-J. Lee, M. E. Kim, K. Kim, J. H. Yun, and Y.-D. Chung, "Reactively sputtered Zn(O,S) buffer layers for controlling band alignment of Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cell interface", *J. Alloys Compd.*, **842** 155986 (2020)

31. C. Platzer-Bjorkman, T. Torndahl, D. Abou-Ras, J. Malmstrom, J. Kessler, and L. Stolt, "Zn(O,S) buffer layers by atomic layer deposition in Cu(In,Ga)Se₂ based thin film solar cells: Band alignment and sulfur gradient", *J. Appl. Phys.*, **100** [4] 044506 (2006)

●● 정용덕

- 2002년 연세대학교 물리학과 박사
- 2002년-현재 한국전자통신연구원 책임연구원
- 2010년-현재 과학기술연합대학원대학교 차세대소자공학 교수
- 2008년 University of Delaware 방문연구원

●● 조대형

- 2007년 고려대학교 전기전자전파공학부 학사
- 2009년 고려대학교 전자전기공학과 석사
- 2020년 한국과학기술원 신소재공학과 박사
- 2009-현재 한국전자통신연구원 선임연구원

●● 이우정

- 2012년 연세대학교 물리학과 박사
- 2013년 연세대학교 자연과학연구소 전문연구원
- 2013-현재 한국전자통신연구원 선임연구원