

## 유기태양전지 계면 기술 동향

김기환<sup>†</sup>

경상대학교 나노신소재공학부  
(2021년 11월 05일 접수, 2021년 11월 19일 수정, 11월 21일 채택)

### Overview of Interface Engineering for Organic Solar Cells

Gi-Hwan Kim<sup>†</sup>

School of Materials Science and Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea  
(Received November 05, 2021, Revised November 19, 2021; Accepted November 21, 2021)

**요약:** 차세대 태양전지 중 유기물을 활용하는 유기 태양전지는 미래 핵심 에너지 생산 장치로, 최근 급격한 성장세와 함께 많은 주목을 보이고 있다. 유기 태양전지 효율 향상을 위해서 계면 공학 기술이 많이 응용되고 있다. 특히 양전극인 양극과 음극에 계면 공학을 활용하여 에너지 준위 조절을 통한 소자 효율 향상과, 궁극적으로 직층형 유기 태양전지에 계면 공학을 활용하여 우수한 전기적, 광학적 성능을 이끌어 내어 고성능 소자를 제작하는 방식이 널리 활용되고 있다. 본 총설에서는 유기태양전지에 활용되고 있는 계면 공학에 대하여 최근 연구 동향을 요약 및 소개하고 고성능 유기 태양전지 제작 방식에 대하여 논의하고자 한다.

**Abstract:** Among the next-generation solar cells, organic solar cells using organic materials are a key energy production device for the future energy generation devices, and have recently been receiving a lot of attention with rapid growth. To improve the efficiency of organic solar cells, interfacial engineering technology has been widely applied. In particular, it is widely used to improve device efficiency through energy level control by using interface engineering on the anode and cathode, which are positive electrodes, and to ultimately utilize interface engineering for tandem organic solar cells to derive excellent electrical and optical performance to produce high-performance devices. In this article, we will summarize and introduce recent research trends on interfacial engineering used in organic solar cells, and discuss the method of manufacturing high-performance organic solar cells.

**Keywords:** Organic solar cells, Interfaces, Anode interfaces, Cathode interface, Tandem interfaces

### 1. 서론

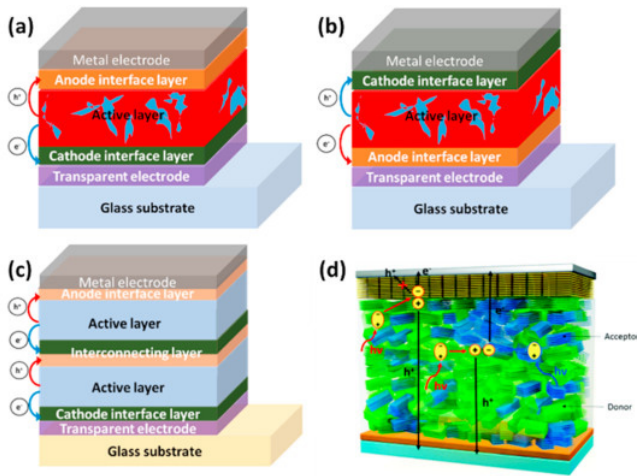
최근 개발도상 국가들의 성장에 따라서 막대한 양의 에너지가 소모되고 있고, 이에 따라 자연스럽게, 기존 에너지원들을 사용한 환경 문제가 대두되고 있다. 이에 따라서 신재생 에너지에 대한 수요가 급격히 증가하고 있다. 신재생 에너지원 중 태양에너지는 가장 널리 사용되고 있고, 현재 1세대인 실리콘 태양전지를 넘어서 3세대인 유기, 양자점, 페로브스카이트 물질을 활용한 태양전지의 개발이 눈부시게 이루어지고 있다 [1-3]. 그중 유기 물질을 사용하는 유기태양전지는 다

양한 매력적인 특성으로 경량, 유연성 및 저비용 솔루션 처리 등의 최근 가장 각광받고 있는 차세대 태양전지이다. 일반적인 유기태양전지는 벌크 이종 접합 활성층을 사용하고 전자주개 p형 공액 고분자(도너)와 전자수용체로 n형 유기반도체(억셉터)로 구성되어 있다 [5,6]. 활성층에서 정공 및 전자 추출을 용이하게 하기 위해 해당 전극에 양극/음극 계면층이 활성층과 전극 사이에 삽입한다. 지난 몇 년 동안 고성능의 광전지 재료 설계, 표면 형태 최적화, 계면 엔지니어링 및 새로운 구조 개발로 인해 유기태양전지 전력 변환의 놀라운 효율 향상이 가능하다[7,8].

이상적인 도너와 억셉터는 개발은 유기태양전지의 핵심 구성 요소이다. 일반적으로 유기 태양전지의 효

<sup>†</sup> Corresponding author: Gi-Hwan Kim (ghkim@gnu.ac.kr)



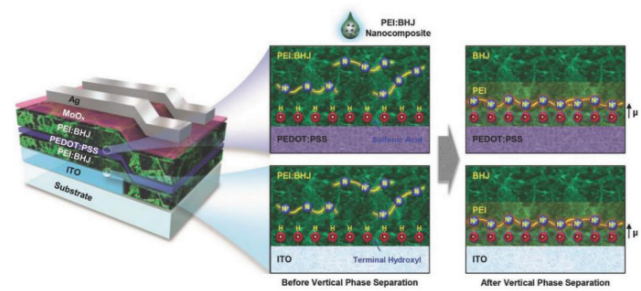


**Figure 4.** The charge transfer behavior at each interface of organic solar cells. Reproduced with permission from ref [21]. Copyright 2021 Elsevier.

## 2. 본론

### 2.1. 유기태양전지의 음극 계면 공학

음극 계면층은 음극의 일함수(WF)를 수정하고 음극과 활성층 사이의 에너지 장벽을 줄여 유기태양전지 소자 성능을 높일 수 있는 중요한 구성요소이다. 음극 계면층에 대한 많은 연구가 풀러렌 기반 유기태양전지 시대에 연구되었다. 수용성/알코올 가용성 공액 고분자는 유기태양전지에서 우수한 성능을 발휘하는 우수한 음극 계면층 물질이다. 수용성/알코올 가용성 공액 고분자는 광전 특성을 결정하는 접합된 백분과 물/알코올 용해도를 보장하는 극성이 높은 특성을 모두 가지고 있어서, 일반적인 공액 고분자는 친수성인 전자 및 정공 수송층 위에 코팅을 하는 방식이므로 둘의 계면 저항을 줄이는데 수용성/알코올 가용성 공액 고분자를 활용하여 친수성과 소수성 계면 저항을 획기적으로 줄임으로써, 유기태양전지 효율을 급격하게 증가시킬 수 있다. 한 예로 수용성/알코올 가용성 공액 고분자의 반대 이온 또는 아민 그룹은 접합된 백분을 도핑하여 전도성을 향상시킬 수 있고, 수용성/알코올 가용성 공액 고분자는 또한 유기태양전지의 대부분의 활성층 물질이 비극성 용매(예: 클로로포름, 클로로벤젠)에 용해되기 때문에 직교 용매 가공성을 위한 이상적인 인터페이스 물질로 많은 연구가 되고 있다[22-25]. 수용성/알코올 가용성 공액 고분자는 기존의 풀러렌 태양 전지에 오랫동안 사용되어 온 이상적인 계면 물질로 대표적으로 PFN/PFN-Br이 있다. 이들 물질은 금속 전극의 WF를 효과적으로 줄이고 우수한 접촉 성능을 달성하여 높은 성능의 유기태양전지 제작에 용이한 물질로 현재도 많이 사용되고 있다[26,27].



**Figure 5.** Tandem structure for organic solar cells and their charge behavior. Reproduced with permission from ref [25]. Copyright 2019 Wiley.

### 2.2. 유기태양전지의 양극 계면 공학

양극 쪽은 유기태양전지에서 정공 수송을 담당하고 있으며 가장 널리 알려진 물질은 poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) 유기 물질이다. PEDOT:PSS는 PEDOT에 PSS에 의해 p-도핑되었다. PEDOT:PSS는 높은 전도성과 높은 투명도를 가지며 유기태양전지 뿐만 아니라 다양한 전자 소자에 활용되고 있으며, 아주 효율적인 정공 수송 재료로 사용되고 있다. PEDOT:PSS는 다양한 도핑 방법을 통하여 유기태양전지 효율에 영향을 미치고, 나아가 PSS 대신 다른 p-dopant를 사용하여 전도도 증가와, 일함수를 변화시킴으로써 유기태양전지 효율을 극대화시키는 방법이 여러 차례 보고되었다. 하지만 PEDOT:PSS는 일반적으로 산성을 띄는 성질이 있어서, 소자의 안정성에 문제점을 드러내기도 하였다. 그래서 많은 연구자들은 p-형 금속 산화물인 NiO, CuO등을 활용하여 유기태양전지의 효율 상승과 더불어 안정성을 확보하는 연구가 보고되었다. 금속 산화물 특성상 수분에 강하며, 활성층인 유기 물질과도 아주 호환이 좋아서 고성능 유기 태양전지에 널리 활용되고 있다[29,30].

### 2.3. 적층형 유기태양전지의 계면 공학

최근 몇 년 동안 고성능의 도너와 비풀러렌 억셉터의 개발 등을 통하여 단일 접합 유기 유기태양전지의 광변환 효율을 급격하게 촉진시켰다. 그러나 유기 반도체의 낮은 이동도로 인해 활성층의 두께가 제한되어 효율적인 태양광 흡수에는 단일 접합으로는 불리한 형편이다. 이 문제를 해결하기 위한 전략은 가시-근적외선 범위에 걸쳐 상보적인 광 흡수를 갖는 2개의 서브셀을 적층함으로써 유기태양전지에서 광 흡수를 향상시키기 위해 2개의 태양 전지를 적층 하는 소자적인 개발에 있다[31,32]. 또한 두 서브셀 사이의 p-형 및 n-형 계면층으로 일반적으로 구성되는 캐리어 결합층이 직렬 장치의 성능을 직접적으로 결정한다는 점이 적층

형 유기태양전지 구조의 핵심 중 하나이다. 이상적인 결합층은 다음 요구 사항을 충족해야 합니다. 첫째, 결합층은 FF 및 Voc 손실 없이 효율적인 전하 재결합을 유도해야 한다. 둘째, 결합층은 광학적으로 투명해야 하며 후면 서브셀에 대한 광자를 흡수하는 데 유리해야 한다[31-33]. 마지막으로, 결합층은 후면 서브셀 활성층의 용액 처리로 인한 용해로부터 전면 서브셀에 대한 화학적 보호를 제공해야 한다. 이러한 결합층의 까다로운 조건을 만족하기 위해서 연구자들은 다양한 구조의 결합층을 개발하였다. PEDOT:PSS/금속 산화물, 유기물/금속(10 nm 이하)/금속 산화물, 유기물/유기물 등의 다양한 형태의 결합층을 개발하였고. 최근 이러한 적층형 방식을 통하여 가시광선 영역뿐만 아니라 적외선 영역까지 효율적으로 태양 빛을 흡수하는 소자 개발에 성공하였다[34,35].

### 3. 결론

본 총설에서 유기태양전지에 사용되는 다양한 계면 물질과 방식에 대해서 소개하였다. 특히 양극/음극 계면 재료 및 적층형 구조에서 활용되는 계면 물질과 방식을 최근 연구의 바탕으로 조사하였다. 다양한 분자 구조를 가진 다양한 계면 재료가 유기태양전지에서 자유 전하의 수집/수송을 개선하기 위해 양극/음극에 같이 사용되어 유기 태양전지 광전지 성능을 급격히 향상시켰다. 이러한 계면 엔지니어링은 단일 유기태양전지에서 성공을 거두었지만 대면적 유기태양전지의 인쇄에는 여전히 문제가 있다. 대면적 유기태양전지 제작을 위해서는 전도성이 높은 계면층을 고른 코팅 방식이 중요한데, 이러한 높은 전도성의 계면층은 현재 많이 연구되고 있지 않다. 하지만 현재 사용되고 있는 PEDOT:PSS 등의 유도체 개발과 함께 다양한 방향의 계면층 연구가 진행되고 있어서 근 미래에는 높은 성능의 계면층 개발과 함께 유기태양전지의 상업화를 기대해본다.

### References

- G. Yu, J. Gao, J.C. Hummelen, F. Wudl, A.J. Heeger, *Science*, **270**, 1789 (1995).
- G. Zhang, J. Zhao, P.C.Y. Chow, K. Jiang, J. Zhang, Z. Zhu, J. Zhang, F. Huang, H. Yan, *Chem. Rev.* **118**, 3447 (2018).
- J. Hou, O. Inganäs, R.H. Friend, F. Gao, *Nat. Mater.* **17**, 1198 (2018).
- N.S. Sariciftci, L. Smilowitz, A.J. Heeger, F. Wudl, *Science*, **258**, 1474 (1992).
- M. Granström, K. Petritsch, A.C. Arias, A. Lux, M.R. Andersson, R.H. Friend, *Nature*, **395**, 257 (1998).
- Y. Li, *Acc. Chem. Res.* **45**, 723 (2012).
- Q. Liu, Y. Jiang, K. Jin, J. Qin, J. Xu, W. Li, J. Xiong, J. Liu, Z. Xiao, K. Sun, S. Yang, X. Zhang, L. Ding, *Sci. Bull.* **65**, 272 (2020).
- Y. Lin, Y. Firdaus, F.H. Isikgor, M.I. Nugraha, E. Yengel, G.T. Harrison, R. Hallani, *ACS Energy Lett.* **15**, 2935 (2020).
- R. Ma, T. Liu, Z. Luo, K. Gao, K. Chen, G. Zhang, W. Gao, Y. Xiao, T.-K. Lau, *ACS Energy Lett.* **5**, 2711 (2020).
- L. Nian, Y. Kan, K. Gao, M. Zhang, N. Li, G. Zhou, S.B. Jo, X. Shi, F. Lin, Q. Rong, *Joule*, **4**, 2223 (2020).
- H. Shang, H. Fan, Y. Liu, W. Hu, Y. Li, X. Zhan, *Adv. Mater.* **23**, 1554 (2011).
- M. Zhang, X. Guo, S. Zhang, J. Hou, *Adv. Mater.* **26**, 1118-1123 (2014).
- D. Ding, J. Wang, Z. Du, F. Li, W. Chen, F. Liu, H. Li, M. Sun, R. Yang, *J. Mater. Chem.* **5**, 10430 (2017).
- C. An, Z. Zheng, J. Hou, *Chem. Commun.* **56**, 4750 (2020).
- C.-Z. Li, H.-L. Yip, A.K.Y. Jen, *J. Mater. Chem.* **22**, 4161 (2012).
- N.S. Sariciftci, D. Braun, C. Zhang, V.I. Srdanov, A.J. Heeger, G. Stucky, F. Wudl, *Appl. Phys. Lett.* **62**, 585 (1993).
- X. Liu, C. Zhang, C. Duan, M. Li, Z. Hu, J. Wang, F. Liu, N. Li, C.J. Brabec, R.A., *J. Am. Chem. Soc.* **140**, 8934 (2018).
- Q. Wei, W. Liu, M. Leclerc, J. Yuan, H. Chen, Y. Zou, *Sci, China Chem.*, **63**, 1352 (2020).
- C.-C. Chueh, C.-Z. Li, A.K.Y. Jen, *Energy Environ. Sci.* **8**, 1160 (2015).
- Y. Liu, Z.A. Page, T.P. Russell, T. Emrick, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **54**, 11485 (2015).
- L. Tian, Q. Xue, Z. Hu, F. Huang, *Organic Electron.* **93**, 106141 (2021).
- Z. Hu, K. Zhang, F. Huang, Y. Cao, *Chem. Commun.* **51**, 5572 (2015).
- Z. Hu, R. Xu, S. Dong, K. Lin, J. Liu, F. Huang, Y. Cao, *Mater. Horiz.* **4**, 88 (2017).
- Y. Tan, L. Chen, F. Wu, B. Huang, Z. Liao, Z. Yu, L. Hu, Y. Zhou, Y. Chen, *Macromolecules*, **51**, 8197 (2018).
- D. D. C. Rasi, R. A. J. Janssen, *Adv. Mater.* **31**, 1806499 (2019).
- C. Duan, K. Zhang, C. Zhong, F. Huang, Y. Cao, *Chem. Soc. Rev.* **42**, 9071 (2013).
- F. Huang, H. Wu, D. Wang, W. Yang, Y. Cao, *Chem. Mater.* **16**, 708 (2004).
- B. Walker, H. Choi, J. Y. Kim, *Current Appl.*

- Physic.* **17**, 370 (2017).
29. X. Liu, Z. Chen, R. Xu, R. Zhang, Z. Hu, F. Huang, Y. Cao, *Small Methods*, **2**, 1700407 (2018).
30. Z. Yu, B. Li, J. Ouyang, *Adv. Funct. Mater.* **28**, 1802554 (2018).
31. Y. Yang, Q. Kang, Q. Liao, Z. Zheng, C. He, B. Xu, J. Hou, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 39462 (2020).
32. H. Xu, H. Zou, D. Zhou, G. Zeng, L. Chen, X. Liao, Y. Chen, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 52028 (2020).
33. A. Hadipour, B. de Boer, P.W.M. Blom, *Adv. Funct. Mater.*, **18**, 169 (2008).
34. G. Dennler, M.C. Scharber, T. Ameri, P. Denk, K. Forberich, C. Waldauf, C.J. Brabec, *Adv. Mater.* **20**, 579 (2008).
35. L. Yang, H. Zhou, S.C. Price, W. You *J. Am., Chem. Soc.*, **134**, 5432 (2012).