유기 태양전지 연구 동향 및 실용화 전략

DOI: 10.3938/PhiT.21.004

이정용·유승협·김범준

Toward the Commercialization of Organic Photovoltaic Cells

Jung-Yong LEE, Seunghyup YOO and Bumjoon KIM

Photovoltaic technologies based on organic semiconductors are introduced, and the major issues for their successful commercialization are discussed. The concept of conjugated organic compounds are first described to elucidate how organic materials, commonly regarded as insulators, can function as semiconductors or conductors. Then, the working principle of organic photovoltaic (OPV) cells is presented in detail with emphasis on the concepts of donor-acceptor heterojunctions, excitons, charge transfer, and carrier transport. Important figures of merit, which need to be maximized to achieve highly efficient OPV cells, are discussed. In the second half of the paper, the challenges toward commercially viable OPV technologies are discussed, and the efforts being made to overcome such challenges, along with examples that include new material development, interface engineering, innovative device architecture involving optical/nanostructures,

and extension of their applications into flexible and/or see-through solar cells, are introduced.

개요

유기물질은 탄소를 포함하는 모든 화합물을 총칭하는데, 우리 주변의 유기물질은 플라스틱 병이나 바이오 물질 등 전기적인 특성과는 무관한 것들이 대부분이다. 그러나 탄소는 풀러렌(C_{60}), 그래핀이나 흑연 등에서 볼 수 있듯이, 경우에 따라 반도체 또는 도체의 특성도 지닐 수도 있는데, 탄소가 실리콘과 마찬가지로 네 개의 가전자를 갖는 것을 생각해보면 그리 놀라운 일은 아니다. 다만 여태까지는 그러한 특성을 이용한 실제 응용 분야가 배터리의 내부 전극 등 매우 제한적이었다. 최근 사람들의 생활 속에 깊이 자리잡은 스마트 폰의 일부 기종이, 특화된 화질과 빠른 동화상 처리속도를 특징으로 하는 AMOLED 디스플레이를 채용하고 있는데 바로 이 AMOLED 디스플레이는 유기물질의 반도체 특성을 활용한 대표적 예라 할 수 있다. 유기태양전지는 빛을 내는 유기반도체 소자인 유기 발광다이오드(OLED)의 정 반대 역할, 즉 빛을 흡수하여 전기를 발생하는 소자로서, 역사적으로 볼 때 OLED의 발전과 밀접하게 한 궤를 같이하여 왔다. 물론, 산업 응용 분야의 특성차에 따라 디스플레이 소자인 OLED의 산업화가 더욱 빨리 진행되어 왔으나, 이는 곧 유기태양전지도 실용화 가능성이 크다는 것으로 여겨지고 있으며, 최근 학계와 산업계에 많은 관심을 불러 모으고 있다. 본 글에서는 유기태양전지의 기본 원리를 소개하고 실용화를 위한 핵심 이슈를 정리하여, 더욱 많은 사람들이 그 발전에 기여할 수 있도록 유도하고자 한다.

저자약력

이정용 교수는 Stanford University 전자공학과 박사(2010)로서 동대학원에서 박사후 연구원을 거쳐 2010년부터 KAIST EEWS 대학원 조교수로 재직 중이다. (jungyong.lee@kaist.ac.kr)

유승협 교수는 미 Arizona 대학 박사(2005)로서 Georgia Inst. of Technology(2005-2006)를 거친 후, 2006년부터 KAIST 전기 및 전자 공학부에 재직 중이며(현 부교수) 유기반도체를 이용한 디스플레이 소자, 태양전지 소자, 플렉서블 전자소자 등에 관한 연구를 진행하고 있다. (syoo.lee@kaist.edu)

김범준 교수는 UC Santa Barbara 화학공학과 박사(2006)로서 UC Berkeley에서 박사후 연구원(2006-2008)을 거쳐 2008년부터 KAIST 생명화학공학과 조교수로 재직 중이다. (bjkim02@kaist.ac.kr)

태양전지 기술의 발전과 유기태양전지의 역할

화석에너지의 고갈 우려와 이의 남용에 따른 온난화 및 기후 변화, 그리고 원자력 에너지에 상존하는 안전 우려 등은, 지속가능한 에너지인 태양광 발전의 필요성을 그 어느 때보

Fig. 1. The classification of 1st-3rd generation solar cells technology and power generation costs according to cost and efficiency of the cells. (Power generation costs are based on solar incident radiation of 1000 W/m²)^[2]

다 높이 요구하고 있다. 태양이 지구에 평균적으로 전달해주고 있는 단위 시간당 에너지는 총 10^5 TW로서, 그 극히 일부분으로도 2020년 지구 전체가 필요로 할 것으로 예상되는 20 TW를 훨씬 상회할 정도로 풍부하다. 물론 태양으로부터의 모든 에너지가 활용될 수 있는 것은 아니지만, 상대적으로 지역편중이 덜한 특성이나 고유의 친환경적 측면 때문에, 태양광발전은 항상 가장 매력적인 신재생에너지의 하나로 손꼽혀 왔다.

특히 태양전지 기술은 빛을 전기에너지로 직접 바뀌주는 기술로서, 전기 에너지 위주의 현대적 생활 패턴과 잘 일치하는데, 그 시초는 이미 1830년대에 빛의 전기에너지 변환가능성을 이 제시한 프랑스의 물리학자 Becquerel에 기인한다.^[1] 오늘날 보통 접하는 실리콘 pn 접합 다이오드 형태의 태양전지 기술은 1950년대에 이르러 Bell Lab에서 시연된 바 있으며, 상대적으로 역사가 오래된 반도체 기술에 속한다. 그럼에도 불구하고 지금까지 상용화된 실리콘 태양전지는 애초의 그것에서 크게 변화하지 않았는데, 이는 태양전지가, 점점 소형화와 고집적화로 빠르게 발전한 여타 반도체 전자 소자 기술과 달리, 대면적 지향 소자라는 점과 제조 비용적 면에서 훨씬 더 제약을 받는 데에서 기인한다 할 수 있다. 즉 기존의 단결정 실리콘 기술에서는 위 두 가지 제약 조건을 만족하면서 변화를 꾀하는 데 있어 엔지니어링 측면에서 볼 때 시도해 볼 수 있는 기술의 폭이 좁았다고 정리해 볼 수 있다. 이에 전 세계의 많은 연구자들이 CdTe, III-V 화합물 반도체, 박막 실리콘, CIGS 등 다양한 신규 물질군을 이용한 태양전지를 개발코자 노력해 왔다. 그림 1은 지금까지 나와있는 태양전지 기술과 또는 향후 기대되는 기술을 포함하여 1-3세대의 태양전지의 셀 제작 비용과 효율의 상관관계를 나타낸 그

Fig. 2. Historical trend of power conversion efficiency of organic solar cells.^[3,4]

래프이다.^[2]

그림 1에서 볼 수 있듯이 1세대 기술은 전력변환 효율은 15~20%대로 비교적 높으나 셀 제작 비용이 200~500 \$/m²에 달하는 태양전지 기술로 전통 단결정 실리콘 pn접합 다이오드 기반의 태양전지가 이에 속한다. 반면, 2세대 기술은 1세대에 비해 약간 낮거나 유사한 효율을 가지되 그 제작 비용을 100 \$/m² 정도로 현저히 낮춘 기술에 해당하며, 여러 박막 태양전지 기술이 여기에 포함된다. 3세대 태양전지 기술은 나노 기술, 탠덤(tandem) 기술 등 가장 진보된 기술을 적용하여 그 효율을 극대화하면서도 셀 비용을 2세대와 거의 유사한 정도로 유지하는 차세대 태양전지 기술을 칭한다. 현재 전기 사용료와 경쟁 가능한 값싼 전기를 태양전지에 의해 생산하려면, 통상적으로 약 1 \$/W_p 미만, 즉 하루 중 가장 높은 ("peak") 세기의 태양광(약 1 kW/m²에 해당) 입사 조건에서 1와트를 생산하는 데 드는 셀의 비용이 1 \$ 미만이어야 한다고 받아들여지고 있다. 1세대 태양전지는, 별도의 외적인 요인 없이는 1 \$/W_p 목표를 달성하기 매우 어려울 것으로 여겨지나, 2세대는 0.5~1 \$/W_p 정도가 가능할 것으로 예상되고 있으며, 3세대의 경우는 그보다도 적은 약 0.2 \$/W_p 수준을 이룰 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] T. M. Razykov, C. S. Ferekides, D. Morel, E. Stefanakos, H. S. Ullal and H. M. Upadhyaya, Sol. Energy **85**, 1580 (2011).
- [2] G. Conibeer, Materials Today **10**, 42 (2007).
- [3] S. Yoo, "Organic solar cells based on liquid crystalline and polycrystalline thin films," Ph.D thesis (University of Arizona, Tucson, US, 2005).
- [4] M. A. Green *et al.*, Prog. Photovolt.: Res. Appl. **17**, 85 (2009).

Fig. 3. (a)-(c), (e) Various applications of organic solar cells (d) picture of a fabricated flexible organic solar cell [sources: (a) www.konarka.com (b) www.earthtechling.com (c) www.nature.com (d), (e) S. Yoo *et al.*]

유기 태양전지를 구성하는 유기 반도체는, 여타 반도체 기술에 비해 상대적으로 저온 공정으로 구현될 수 있어 고온처리 문제 가 될 수 있는 저가형 글래스나 다양한 플라스틱 기판 등과 호환될 수 있는 장점이 있다. 특히 플라스틱 기판이 쓰일 경우, 롤투롤 인쇄 공정 등의 적용도 가능하며, 이 경우 높은 단위시간당 생산량 구현을 통한 초저가형 태양전지 기술의 실현이 기대될 수 있다. 유기태양전지의 효율은 1980년대 중반 Kodak의 Tang이 진공증착을 이용한 저분자 반도체 층의 다층박막을 이용해 약 1%대를 구현한 이래 꾸준히 발전을 거듭해 왔으며, 2011년에는 독일의 벤처회사인 Heliatek이 9.8%의 효율을 발표하는 등 괄목할 만한 성장을 보여왔다.(그림 2)

학계에서 받아들여지고 있는 유기 태양전지의 현실적 효율 목표가 약 10–15% 정도인 점을 고려할 때,^[5] 상기의 공정 및 기판 장점을 최대한 살려 50 $\$/m^2$ 수준 또는 그 이하의 초저가 셀이 실현된다면, 2세대와 3세대 기술의 중간 정도인 0.2–0.5 $\$/W_p$ 의 저비용 전기 생산이 가능할 것으로 기대된다.(간혹 3세대의 정의를 초저가 영역으로 확대하여, 유기 태양전지를 3세대에 포함시키기도 함.) 이외에도, 유기 태양전지의 우수한 기계적 유연성은 플렉서블 태양전지에도 활용되어 이제껏 상상이 어려웠던 다양한 응용분야로 확대될 가능성이 클 것으로 기대된다.(그림 3) 또한 유기 반도체는 상대적으로 좁은 흡광대역을 보이므로, 시스루 태양전지 등에도 활용될 수 있어, 솔라 윈도우 등 이른바 BIPV 기술 등에도 활용이 가능할 것으로 보인다. 요컨대, 유기 태양전지는 여타 경쟁 기술과 비교할 때, 효율 10–15%대와 매우 낮은 셀 제작비용을 통한 초저비용 전기 생산을 목표로 하며, 매우 유연한 태양전지나 반투명 태양전지와 같은 특화된 응용분야를 이끌 수 있는 차세대 태양전지 기술로 정의할 수 있다.

유기 태양전지 기술의 동작 원리

1. 유기반도체 전자주개전자받개 이종접합: 유기태양전지 동작의 핵심 요소

유기태양전지를 이루는 가장 소단위 구성요소인 유기반도체는 이웃하는 탄소 간에 이중 결합과 단일 결합이 번갈아 존재하는 특징을 띠는 공액 유기화합물(conjugated organic compound)로 분류된다. 공액 유기화합물 내에 존재하는 파이(π) 전자는 한 원자에 편재되어 있지 않아 전기적 프로세스에 기여할 가능성이 크다. 특히, 공액화의 정도가 높아짐에 따라 이산된 에너지 준위에서 준연속 에너지 준위로 진화하여 마치 무기 반도체의 에너지 밴드와 유사한 구조를 띠게 되어 반도체 특성을 띌 수 있게 된다. 분자 내의 파이전자들은 낮은 에너지 준위부터 채우게 되는데, 파이전자로 채워진 가장 높은 준위를 HOMO(highest occupied molecular orbital) 준위라 하고 그 다음 높은 에너지 준위는 채워지지 않은 준위 중 가장 낮은 준위이므로 LUMO(lowest unoccupied molecular orbital) 준위라 한다. HOMO 준위와 LUMO 준위 간의 에너지 차이는 통상의 무기반도체에서의 에너지 갭과 같은 역할을 하며, 발광과장이나 흡광의 문턱(threshold) 특성을 결정하는 중요한 요인이 된다. 많은 공액 유기화합물은 1–3 eV의 HOMO-LUMO간 에너지 차이를 보여 가시광 대역에서 흡광 문턱 특성을 나타내게 된다.

이러한 유기 반도체는 어느 한 종류가 단독적으로 쓰이기 보다는, 마치 실리콘의 경우 p형과 n형이 이루는 pn 접합과 같이, 전자주개형 유기반도체와 전자받개형 유기반도체가 이루는 이종접합(donor-acceptor heterojunction)을 통해서 태양전지로의 활용이 가능하게 된다. 그림 4(a)는 유기 태양전지의 일반적인 형태를 단순화하여 나타낸 것으로서, 크게 전자주개-받개 이종접합 구조가 이층 박막형으로 존재하는 형태와 서로 무작위로 섞여 존재하는 이른바 “벌크이종접합(bulk heterojunction)” 형태로 나뉘게 된다. 두 경우 모두에서 전자주개-받개 이종접합 구조는 유기태양전지의 광전류 및 광전압 발생의 중요한 요소가 된다. 또한, 분자로 이루어진 고체는 약한 반 데르 발스(Van der Waals) 결합으로 이루어져, 심지어 결정성이 있는 경우라도, 개개 분자의 특성이 많이 남아있어 흡광대역폭이 제한적인 경우가 종종 있게 된다. 전자주개-받개 이종접합은 이러한 유기반도체의 좁은 흡광대역폭

REFERENCES

- [5] B. Kippelen and J.-L. Bredas, *Energy Environ. Sci.* **2**, 251 (2009).

Fig. 4. (a) Typical organic solar cell structures: multilayer type (up) and bulk heterojunction type (down) (b) energy diagram of electron donor-electron acceptor bilayer type (c) photo-induced charge generation process of organic solar cells.

으로 인한 문제를 해결하는 데도 효과적이다. 즉, 전자주개와 반개 각 층이 흡광영역을 배분하여 전체 셀의 유효 흡광대역을 넓혀준다. 그림 4(b)는 보통 유기태양전지에 많이 쓰이는 전자주개-반개 및 전극의 에너지 다이어그램을 나타내며, (c)는 유기태양전지에서 광전하가 발생하는 작용 기전을 보여준다. 흡광-엑시톤 생성-확산에 의해 전자주개-반개 접합위치로 엑시톤 이동-음전하/양전하로 분리-전하 수송-각 전극에 전달과 같이 요약된다. 위와 같은 전하 발생 원리를 고려할 때, 흡광정도, 엑시톤 확산거리, 접합에서의 엑시톤의 개별 전하로의 분리, 이들 분리된 개별 전하의 수송 및 전극에서의 수집 등이 중요한 역할을 하게 되며, 대부분의 고효율화 전략 역시 이들 파라미터를 중심으로 진행되게 된다.

2. 유기태양전지 효율을 결정하는 주요 요소

유기반도체가 실리콘과 같은 무기반도체와의 근본적인 차이점은 전자-정공 짝인 엑시톤의 결합에너지가 훨씬 커서 빛을 흡수했을 때 발생하는 엑시톤이 상온에서 바로 자유로운 전자와 정공으로 나누어지지 못한다는 점이다. 이런 점에서 유기태양전지는 “Excitonic solar cell”이라고도 불린다. 엑시톤을 자유로운 캐리어로 나누기 위해선 별도의 에너지가 필요한데 접합부에서의 두 물질 간 HOMO 또는 LUMO의 에너지 차이

가, 엑시톤으로부터 각각의 전하 캐리어로 나누어주는 원동력이 된다. 따라서 셀 내의 특정 지점에서 엑시톤이 발생하였을 경우 이종접합이 있는 곳까지 확산 과정에 의해 이동해야 전하캐리어가 될 수 있는데, 문제는 유기 반도체의 엑시톤 확산 거리가 통상 수~수십 나노미터로, 통상적으로 백 나노미터를 넘는 광흡수 침투길이에 비해 매우 짧다는 것이다. 이로 인해 다층 박막 태양전지의 경우는 개별 광흡수 층의 두께가 해당 층의 엑시톤 확산 거리에 의해 제한을 받게 되며, 이는 태양광의 불완전한 흡광으로 이어진다. 벌크이종접합 소자 경우는 전자주개와 전자반개 물질을 함께 한 용액에 섞어, 스펙코팅 등의 방법으로 박막을 형성함으로써, 이종접합이 흡광층 전체에 분포하게 한다. 이 경우 엑시톤이 흡광층 내 어느 지점에서 생성되든지 엑시톤 확산거리 이내에서 전하 캐리어 분리가 가능하여, 짧은 엑시톤 확산거리의 문제점을 해결할 수 있게 된다. 그러나 벌크 이종접합 소자의 경우, 전자주개와 반개가 완전 무작위로 섞이게 되면, 엑시톤의 전하로의 분리는 매우 효과적이지만 이들 분리된 전하들이 각각의 전극으로 이동할 때 재결합 가능성이 늘어나는 한계점이 발생하게 된다. 즉, 엑시톤 병목현상을 해소하면서 분리된 전하의 재결합 가능성을 최소화하는 방법의 이상적인 구조는 “섞이되 분리된,” 즉 벌크 이종접합 구조에서 주개와 반개 간의 상호작용을 하는 표면적은 높이고, 적절한 상분리에 의해 전자와 정공 각각의 수송이 보장되는 구조를 이루는 게 중요하다.

전하이동도를 높이는 것도 중요한 역할을 하는데, 특히, 전극 쪽으로 전하를 이동시킬 때, 전하의 수명 동안 이동하는 평균 거리 즉 “mean free path” ($= l_{\text{free}}$)가 전하이동도와 수명 그리고 전기장에 비례하므로 전하의 수집(collection) 효율을 높이는 데 중요하며, 또한, 셀 전압이 커지면서, 빌트인 전기장을 고려한 실제 전기장은 점점 작아져 l_{free} ($V > 0$)도 줄어들어 따라, 그 중요성은 더욱 커진다. 이러한 전하수집효율의 전압 의존성으로 말미암아, 높은 전하이동도를 갖는 물질과 구조를 사용하는 것은, 특히, 높은 fill factor(FF)와 개방전압을 유지하는 데 있어 중요하게 된다.

에너지갭, 그리고 HOMO/LUMO 레벨의 주개, 반개 간 상대적 위치 등으로 나타내지는 셀 구성층간의 에너지 구조는 상보적 흡광영역을 통한 유효 흡광영역 증대 외에도, 광개방전압을 결정하는 중요한 역할을 한다. 특히, 최대 가능한 개방전압(open-circuit voltage, V_{oc})의 경우 주개의 HOMO와 반개의 LUMO간의 차이에 순상관을 갖는다고 일반적으로 받아들여지며, 이 차이를 크게 하여 광전압을 높일 수 있다. 한편, 엑시톤의 결합에너지를 극복해줄 만한 에너지 차이가 주개-반개 접합에서 제공되어야 하며, 이를 위해 그림 4(b)와 같이 대략 적어도 0.5 eV 내외의 에너지 차이가 접합 부위에서

존재하여야 한다. 물론, 에너지 갭도 흡광대역을 고려하여 그 값이 적절한 수준을 유지해야 한다. 이를 요약하여 주개-받개 접합의 이상적 에너지 구조를 요약하면 다음과 같다.

- 전자주개-받개 접합 부위에 엑시톤의 전하분리를 이끌어 내기 충분한 에너지 오프셋이 존재할 것 (약 ~ 0.5 eV 정도)
- 전자주개 및 받개 물질의 에너지 갭이 달라 서로 다른 흡광대역이 가능토록 할 것 (특히 Near-IR 근처의 장파장 광흡수가 가능한 낮은 에너지 갭을 갖는 물질이 상대적으로 적어 그 개발 필요가 큼)
- 전자주개의 HOMO와 전자받개의 LUMO 차이가 최대한 클 것 (두 번째 조건과 함께 고려할 때, 낮은 에너지 갭을 가지면서 HOMO가 깊은 물질의 개발 필요가 큼).

위 세 가지를 동시에 모두 충족하는 일은 간단한 과제는 아니나, 유기물질의 다양성과 무엇보다도 모(母) 분자의 수정을 통한 에너지 구조 튜닝을 통한 가능성과 기회는 충분하다 할 수 있다. 예를 들어 현재 많이 쓰이고 있는 poly(3-hexylthiophene)(P3HT)와 [6,6]-phenyl-C₆₁-butyric acid methyl ester(PCBM)의 경우 LUMO 간의 에너지 차이가 필요 이상으로 크므로, 이 에너지 차이를 줄이되 나머지 특성엔 큰 변화를 주지 않는 물질을 개발하면 광전압 증대 및 효율향상에 큰 기여가 가능할 것으로 예상할 수 있다. 최근에 발표된 논문들은 이러한 노력이 매우 효과적일 수 있음을 잘 보이고 있다.^[6]

유기 태양전지 실용화를 위한 핵심 이슈

1. 고효율화

(1) 낮은 에너지갭을 갖는 유기반도체 물질 개발

현재 유기 태양전지의 활성층 내의 유기 반도체 물질은 P3HT와 전자받개 물질 PCBM이 각각 전자 주개와 전자 받개로서의 역할을 하며 약 4~5%대의 비교적 높은 광전환 효율을 보이고 있다. 하지만 약 2.0 eV 정도의 에너지갭을 가지는 P3HT는 많은 태양광을 흡수함에 있어 한계가 있으므로 광전류의 향상을 기대하기 어렵다.(그림 5)

유기 태양전지의 실용화를 위해서는 10% 이상의 광전환 효율이 요구되므로 P3HT를 대체할 새로운 유기반도체 물질의 개발이 많이 이루어지고 있다. 특히, 앞 절에서 상술하였듯이, 유기 태양전지에 흡수되는 태양광을 증가시키기 위한 낮은 에너지갭 유기반도체의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 따라서 고효율을 얻기 위한 낮은 에너지갭 유기반도체 개발에 있어 고려해야 할 조건인 J_{sc} 와 V_{oc} 두 가지를 동시에 높일 수 있는 방법과 최근에 보고된 고효율의 낮은 에너지갭 유기반도체 개발 동향을 소개하고자 한다. 첫 번째로 J_{sc} 를

Fig. 5. Molecular structures and energy levels of P3HT and PCBM.

향상시키기 위해서는 약 1.5 eV 정도인 낮은 에너지갭을 가지며 높은 흡광계수를 가지도록 고분자를 설계해야 한다. 즉, 가시광선 영역의 빛뿐만 아니라 근적외선(Near-IR) 영역의 빛까지 흡수를 하며 같은 두께에서 더 많은 빛을 흡수할 수 있도록 설계를 하는 것이다. 이러한 낮은 에너지갭 고분자는 현재 전자가 풍부한 구조(Donor)와 부족한 구조(Acceptor)가 교대로 결합된 고분자 사슬을 형성시킴으로써 합성할 수 있다. 이러한 합성 방법을 Donor-Acceptor alternating approach라 한다. 하지만 이렇게 고분자를 합성을 하면 많은 경우 고분자의 HOMO 에너지 레벨이 증가하게 되어 V_{oc} 가 감소하는 결과를 초래하게 된다. V_{oc} 는 유기 태양전지의 활성층을 구성하는 전자 주개의 HOMO 에너지 레벨과 전자 받개의 LUMO 에너지 레벨의 차에 비례하기 때문이다. 따라서 두 번째로 V_{oc} 를 높이기 위해서는 낮은 에너지갭 고분자의 HOMO 에너지 레벨을 낮추어야 한다. 이는 고분자 사슬에 전자를 당기는 치환체를 도입을 함으로써 얻을 수 있다.

위에서 언급한 두 가지의 방법을 혼합하여 낮은 에너지갭 고분자를 합성함으로써 J_{sc} 뿐만 아니라 V_{oc} 까지 향상을 시키는 많은 연구 결과가 보고되고 있다. 예를 들어 플루오린기나 에스테르기와 같은 치환체를 Donor-Acceptor alternating 고분자에 도입을 하여 7% 이상의 고효율의 유기 태양전지를 구현하였다.^[7-9](그림 6)

그러나 위와 같이 낮은 에너지갭 고분자 태양전지가 높은 효율 향상에도 불구하고, 태양전지의 성능에 직접적으로 영향을 끼치는 고분자의 분자량, 다분산성(polydispersity) 및 입

REFERENCES

- [6] Y. Liang and L. Yu, Adv. Mater. **22**, E135 (2010).
- [7] H. Zhou, L. Yang, A. C. Stuart, S. C. Price, S. Liu and W. You, Angew. Chem. Int. Ed. **50**, 2995 (2011).
- [8] S. C. Price, A. C. Stuart, L. Yang, H. Zhou and W. You, J. Am. Chem. Soc. **133**, 4625 (2011).
- [9] Y. Liang, Z. Xu, J. Xia, S.-T. Tsai, Y. Wu, G. Li, C. Ray and L. Yu, Advan. Mater. **22**, E135 (2010).

Fig. 6. Low bandgap polymers with both high J_{SC} and V_{OC} .^[7-9]

Fig. 7. Representative solution processible low bandgap small molecules

Fig. 8. Examples of morphology and surface control of active layers.^[14-17]

체 규칙성과 같은 인자들을 재현성있게 균일하게 조절하기 어렵고, 합성이나 정제 과정이 복잡할 뿐만 아니라 전자 이동도가 낮은 문제점들을 가지고 있다. 그러나 유기용매에 용해 가능한 저분자 공액 물질은 합성과정을 통하여 그들의 전기적 특성 등을 원하는 대로 쉽게 조절할 수 있고, 고분자의 구조적인 측면에서 발생하는 위와 같은 문제점들을 가지지 않으므로 최근 용해성의 전자 주개-받개(D-A) 구조의 저분자 물질을 개발하여 유기태양전지에 적용하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 올리고티오펜(Oligothiophene)은 화학적으로 안정하고, 사슬길이 변화 및 기능성기 도입을 통하여 광학 및 전기적 특성을 쉽게 조절할 수 있어 용해성 저분자 물질로 적용되고 있다. M. S. Wong 그룹은 다이시아노비닐(Dicyanovinyl)기와 같은 강한 전자 끄는기가 결합된 구조의 올리고티오펜 계열의 물질인 phN-OFOT(4)-DCN을 PCBM과 광활성층으로 적용하여 2.7%의 효율을 보고하였고,^[10] T. Q. Nguyen 그룹은 염료분자인 다이케토피롤(diketopyrrole)을 전자 받개로 적용하여 합성한 올리고티오펜계 물질인 SMDPPEH를 적용하여 3.0%의 효율을 보고하였다.^[11]

또한 몇 년 전부터는 흡광계수가 높은 염료분자를 적용한 D-A-D 형태의 용해성 저분자 물질을 개발하는 연구가 활발히

이루어지고 있다. 2008년, T. Q. Nguyen 그룹에서 염료 분자구조를 이용한 diketopyrrole 계열의 저분자인 DPP(TBFu)₂와 PC₇₀BM을 혼합하여 4.4%의 효율을 보고하였다.^[12] 최근 A. J. Heeger 그룹에서 용해성의 A-D-A 형태의 저분자 물질인 DTS(PTTh)₂와 PC₇₀BM을 혼합한 용액에 DIO를 첨가제로 사용하여 제작한 소자에서 6.7%의 효율이 달성되었음을 발표하였다.^[13] (그림 7)

(2) 모폴로지 및 계면 제어

3절에서 설명한 바와 같이, 광흡수로 생성된 엑시톤의 원활한 분리와 분리된 전하의 효과적인 수송을 위해서는 전자 주개와 받개 사이의 계면을 최대한으로 늘리되 적당한 상분리를 통해 전자 주개와 받개의 연속적 통로를 확보하는 것이 형성에 필수적이다. 실제로, 고효율을 보이는 유기 태양전지는 대부분 전자 주개와 받개가 조밀하게 10 nm 이내로 섞여 있으면서도 연속적인 통로를 지니는 이상적 벌크 이종접합 모폴로지를 가진다. 하지만 일반적으로 전자 주개와 받개는 평형상태로는 서로 잘 섞이지 않기 때문에, 뜨거운 태양열을 받는 특성상 활성층의 모폴로지가 시간에 따라 변화하게 되어 필요 이상의 상분리가 일어나고 광전환 효율이 떨어

REFERENCES

- [10] P. F. Xia, X. J. Feng, J. P. Lu, S. W. Tsang, R. Movileanu, Y. Tao and M. S. Wong, *Adv. Mater.* **20**, 4810 (2008).
- [11] A. B. Tamayo, X. D. Dang, B. Walker, J. Seo, T. Kent and T. Q. Nguyen, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 103301 (2009).
- [12] B. Walker, A. B. Tamayo, X. D. Dang, P. Zalar, J. H. Seo, A. Garcia, M. Tantiwivat and T. Q. Nguyen, *Adv. Funct. Mater.* **19**, 3063 (2009).
- [13] Y. Sun, G. C. Welch, W. L. Leong, C. J. Takacs, G. C. Bazan and A. J. Heeger, *Nature Mater.* DOI:10.1038/NMAT3160 (2011).
- [14] K. Sivula, Z. T. Ball, N. Watanabe, Y. Wu and G. Li, *Adv. Mater.* **18**, 206 (2006).
- [15] J. Peet, J. Y. Kim, N. E. Coates, W. L. Ma, D. Moses, A. J. Heeger and G. C. Bazan, *Nature Mater.* **6**, 497 (2007).
- [16] B. J. Kim, Y. Miyamoto, B. Ma and Fr W. L. Moses, *Advan. Funct. Mater.* **19**, 2273 (2009).
- [17] C. H. Woo, B. C. Thompson, B. J. Kim, M. F. Toney and J. M. Fréchet, *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 16324 (2008).
- [18] G. Li, V. Shrotriya, Y. Yao and Y. Yang, *J. Appl. Phys.* **5**, 98 (2005).
- [19] D. E. Motaung, G. F. Malgas, C. J. Arendse, S. E. Mavundla, C. J. Oliphant and D. Knoesen, *J. Mater. Sci.* **44**, 3192 (2009).

Fig. 9. The effect of solvents on film morphology and device performance.^[17]

어지는 결과를 초래하게 된다. 따라서 활성층의 모폴로지 및 계면을 제어하는 것은 유기 태양전지의 초기 효율뿐 아니라, 유기 태양전지의 열적 안정성을 향상시켜 광전환 효율을 유지하는 것에 매우 중요한 영향을 미친다. 활성층의 모폴로지 및 계면 컨트롤은 크게 상용화제(compatibilizer),^[14] 공정 첨가제(processing additive)^[15] 등의 첨가제 사용, 가교화,^[16] 공액 고분자의 분자 구조의 변화,^[17] 열처리^[18,19] 등의 방법을 통해 구현할 수 있다. (그림 8)

상용화제는 고분자와 플러렌과의 친화성을 모두 가지는 분자로 활성층에 소량 첨가를 하여 10 nm 정도로 조밀하게 상분리가 일어나도록 모폴로지를 컨트롤할 수 있다. 또한 공정 첨가제를 활성층에 도입함으로써 고분자와 플러렌 유도체의 첨가제에 대한 선택적 용해도 및 용매와 첨가제의 끓는점 차이로 유도되는 효과적인 상분리를 유도할 수 있다. 예를 들어, 1,8-octanedithiol을 PCPDTBT:PC₇₀BM 기반 태양전지 소자에 도입함으로써 광전환효율을 2.8%에서 5.5%로 향상시켰다.^[15]

또한 고분자나 플러렌을 가교화시켜 모폴로지를 고정시켜 상분리가 일어나지 않도록 할 수가 있고, 전도성 고분자의 분자 구조의 변화를 통해서도 모폴로지를 컨트롤할 수 있다. 예를 들면 P3HT의 입체규칙성(regioregularity)의 향상은 분자 간의 $\pi\pi$ 배열을 형성하는 능력을 증대시켜 전도성 고분자의 전기적 성질에 긍정적인 영향을 미치지만, 반대로 PCBM과의 혼합성에 부정적인 영향을 미쳐서 유기태양전지의 열적 안정성을 낮추는 결과를 초래하게 된다.

고분자의 입체규칙성 제어를 통한 모폴로지 향상뿐만 아니라, 고온에서의 열처리와 같은 후처리를 통해 모폴로지를 향상시킬 수 있다. 이는 고분자 사슬의 배향 및 결정화를 유도하고 활성층 표면의 거칠기를 증가시켜 전극과의 접촉이 용이하게 함으로써 효과적인 전하의 이동을 유도한다.^[18,19] P3HT:PCBM 기반

Fig. 10. Inverted organic solar cell with CPE layer. (a) device structure, (b) energy diagram and (c) device performance.^[27]

소자의 경우 열처리를 통해 효율이 3.52%에서 4.37%로 오른 사례가 보고된 바 있다.^[20] 또한 광활성층 용액의 용매의 종류와 혼합비율을 적절하게 조절함으로써 활성층의 모폴로지를 제어할 수 있다. 예를 들어, PCDTBT:PC₇₀BM 기반 광활성층 용 용매로 비점이 높은 DCB를 적용하여 효과적인 상분리를 유도함으로써 J_{sc} 를 향상시켰다.^[21] (그림 9)

마지막으로 활성층의 표면 개질을 통한 계면 제어 연구 또한 활발히 진행되고 있다. 표면 개질 방법으로 용액 공정을 통해 쌍극자를 형성하는 물질을 고분자 박막 위에 코팅하는 방법이 있으며^[22,23] 고분자나 플러렌 유도체 자체에 쌍극자를 형성하는 작용기를 달아 혼합하는 방법이 있다.^[24] 두 번째 방법에 의해 형성된 활성층 용액을 스핀코팅하면 쌍극자가 달린 고분자나 플러렌 유도체가 표면으로 응집되면서 또 하나의 층을 형성하게 되고, 이 쌍극자층은 활성층과 전극 사이나 활성층 간 사이에 형성되어 물질의 일함수를 변화시킨다. 이러한 일함수의 변화는 각 층간의 에너지 차이를 조절함으

REFERENCES

- [20] G. Li, V. Shrotriya, J. S. Huang, Y. Yao, T. Moriarty, K. Emery and Y. Yang, *Nature Mater.* **4**, 864 (2005).
- [21] S. H. Park, A. Roy, S. Beaupre, S. Cho, N. Coates, J. S. Moon, D. Moses, M. Leclerc, K. Lee and A. J. Heeger, *Nature Photonics* **3**, 297 (2009).
- [22] J. Peet, J. Y. Kim, N. E. Coates, W. L. Ma, D. Moses, A. J. Heeger and G. C. Bazan, *Nature Mater.* **6**, 497 (2007).
- [23] H. Choi, J. S. Park, E. Jeong, G. H. Kim, B. R. Lee, S. O. Kim, M. H. Song, H. Y. Woo and J. Y. Kim, *Advan. Mater.* **23**, 2759 (2011).
- [24] S. H. Oh, S. I. Na, J. Jo, B. Lim, D. Vak and D. Y. Kim, *Advan. Funct. Mater.* **20**, 1977 (2010).
- [25] J. W. Jung, J. W. Jo and H. Jo, *Advan. Mater.* **23**, 1782 (2011).
- [26] A. Tada, Y. F. Geng, Q. S. Wei, K. Hashimoto and K. Tajima, *Nature Mater.* **10**, 450 (2011).
- [27] S. I. Na, T. S. Kim, S. H. Oh, J. Kim, S. S. Kim and D. Y. Kim, *Appl. Phys. Lett.* **97**, 223305 (2010).

Fig. 11. (a) Light trapping structure with micro-lens array^[33] and (b) with CPC array.^[35]

로써 V_{oc} 를 증가시키거나 전자의 수집효율을 증가시켜 J_{sc} 의 향상을 유도하게 된다.^[25,26] 그 예로, FPQ-Br이라는 쌍극자를 형성하는 양이온성 고분자(CPE) 물질을 도입하여 TiO_x 와 활성층 간의 에너지 차이를 감소시켜 전자의 수집을 향상시킴으로써 J_{sc} 를 7.23 mA/cm^2 에서 8.85 mA/cm^2 로 증가시켰다.^[27] (그림 10)

(3) 광학을 이용한 최적화

활성층이 얇아 빛의 흡수율이 떨어지는 박막형 유기태양전지에서, 전지 내부에 빛을 가두고 빛의 유효이동거리를 늘이는 빛가둠 효과에 대한 연구는 광변환 효율을 높이고 유기태양전지의 상용화를 앞당길 수 있는 중요한 기술이다. 결정질 실리콘 태양전지의 경우 마이크로미터 규모의 텍스처링 구조를 이용하면, 빛의 이동거리가 활성층의 두께에 비해 최대 50배에 달한다는 사실이 널리 알려져 있다.^[28-32] 그러나 유기태양전지의 경우 활성층의 두께가 100 nm 안팎에 불과하기 때문에 텍스처링 구조를 적용하기가 힘들고, 따라서 이를 대체하기 위한 효과적인 광학적 빛가둠 기술에 대해 많은 연구가 이뤄지고 있다.

2008년 Tvingstedt 등은 마이크로 렌즈 배열을 이용한 빛가둠 기술을 발표했다.^[33,34] 입사광을 작은 구멍으로 투과시킨 뒤 나머지 영역을 모두 거울로 막은 이 구조는, 입사광이 들어오는 방향에서 투과도 90%, 활성층에서 반사된 빛이 들어오는 후면 방향에서 투과도 15%의 성능을 나타내며 단락전류를 약 25% 증가시키는 데 성공했다.(그림 11(a)) 2000년 Peumans 등은 이에 앞서 복합 포물형 집광기(compound parabolic concentrator, CPC)를 이용한 유사한 방식의 아이

Fig. 12. V-shape light trapping structure.^[36]

Fig. 13. Induced electric field by metal grid with nanometer-sized period.^[39]

디어를 발표했으나, 실제로 구현되지는 못했다.^[35] (그림 11(b)) 이 같은 집광기 배열 형태의 빛가둠 기술들은 입사방향과 반사방향의 비대칭적 투과도를 이용한 이상적인 빛가둠 효과를 구현할 수 있지만, 빛의 입사각 변화에 매우 민감하기 때문에 항상 태양광을 정면으로 받아들여야 하는 단점이 있으며, 이에 필요한 태양 추적 시스템의 비용 문제가 뒤따른다.

2007년 Tvingstedt 등과 Rim 등은 각각 V자형 빛가둠 구조를 발표하기도 했다.^[36,37] V자형 구조의 경우 입사각의 변화에 비교적 덜 민감하고 두 전지 사이에서의 반복적인 반사로 인해 높은 효율 증가를 얻을 수 있다. 또한 양쪽의 전지를 각각 흡수 스펙트럼이 다른 물질로 구현함으로써 보다 넓은 대역의 빛을 흡수하는 탠덤형 유기태양전지를 구현할 수도 있다. 그러나 구조의 특성상 물질 및 기판의 재료 소모가 많고, 무게나 두께, 유연성 등 유기태양전지가 가지는 장점들을 상당부분 포기해야 하는 문제가 있다.(그림 12)

나노미터 규모의 구조에서 나타나는 빛의 파동성은 기하광

REFERENCES

- [28] A. Goetzberger, "Optical confinement in thin Si-solar cells by diffuse back reflectors," in Fifteenth IEEE Photovoltaic Specialists Conference (1981), pp. 867-870.
- [29] E. Yablonovitch, J. Optic. Soc. Am. **72**, 899 (1982).
- [30] P. Campbell and M. A. Green, IEEE Trans. Electron Devices **33**, 234 (1986).
- [31] P. Campbell and M. A. Green, J. Appl. Phys. **62**, 243 (1987).
- [32] M. A. Green, Progress in Photovoltaics **10**, 235 (2002).
- [33] K. Tvingstedt, S. Dal Zilio, O. Inganäs and M. Tormen, Optics Express **16**, 21608 (2008).
- [34] S. Dal Zilio, K. Tvingstedt, O. Inganäs and M. Tormen, Microelectronic Engineering **86**, 1150 (2009).
- [35] P. Peumans, V. Bulovic and S. R. Forrest, Appl. Phys. Lett. **76**, 2650 (2000).
- [36] S. B. Rim, S. Zhao, S. R. Scully, M. D. McGehee and P. Peumans, Appl. Phys. Lett. **91**, 243501 (2007).
- [37] K. Tvingstedt, V. Andersson, F. Zhang and O. Inganäs, Appl. Phys. Lett. **91**, 123514 (2007).

Fig. 14. Device structure and mechanism of organic solar cell with Au nanoparticles incorporated into PEDOT:PSS layer.^[40]

학으로는 불가능한 많은 일을 가능하게 해주며, 특히 금속과 유전물질 사이에서 전자의 움직임과 빛의 전자기파가 같은 주파수로 공명을 일으키는 표면 플라즈몬 현상은 최근 들어 광학 분야에서 많은 관심을 받고 있다. 유기 태양전지에서도 나노미터 주기의 금속 격자 구조물을 이용하여 표면 플라즈몬 현상을 유도하고, 이 격자 구조물 사이에 강력한 전자기장을 유도하여 빛의 흡수를 높이는 연구가 진행 중에 있다.^[38,39] (그림 13) 금속 격자 구조물을 이용한 연구는 최근 들어 관심이 빠르게 증가하고 있으며, 활성층의 전기적 성능을 떨어뜨리지 않는 효율적인 소자의 제작과 그 성능의 확인 등이 앞으로의 과제로 남아있다.

(4) 탠덤셀 및 플라즈몬 기술을 응용

유기태양전지 내의 빛을 흡수하는 유기물들이 태양광의 폭 넓은 스펙트럼을 흡수하지 못하고 좁은 파장 영역을 상대적으로 강하게 흡수할 뿐만 아니라 빛 흡수를 증가시키기 위해 활성층 두께를 증가시키면 내부양자효율이 떨어지기 때문에 두께를 증가시키면 오히려 효율이 크게 떨어지게 된다. 이런 문제는 앞서 논의한 금속나노입자의 국소적 표면 플라즈몬 공명현상(Localized Surface Plasmon Polariton Resonance)의 도입과^[40-52] 다양한 흡수 스펙트럼을 가진 유기물을 적층해 탠덤 구조의 적용과^[53,54] 같은 방법으로 해결할 수 있다.

금과 은 같은 금속나노입자는 입사하는 빛을 강하게 산란시키고 표면 플라즈몬 공명 현상으로 인해 금속나노입자 표면 근처에 강한 전자기장을 형성시킨다. 이런 특성은 유기박막태양전지의 낮은 흡수를 증가시킨다는 연구결과가 나오면서 다양한 방식으로 나노입자를 이용한 태양전지가 활발하게 연구되고 있다. 금나노입자를 정공이동층(PEDOT:PSS)에 도입하여 주위 활성층(P3HT:PCBM)의 빛 흡수를 증가시킨 연구가 보고되었다.^[40] (그림 14) 이 보고에 의하면 금나노입자를 도입했을 때 기준셀 대비 16% 증가했고, 최근에 발표한 논문에는 정공이동층 및 활성층 두 층에 금 나노입자를 도입해 최대 22%의 효율이 향상되었다.^[52]

또한, 유기물의 좁은 흡수 파장대역을 보하기 위해 다양한 흡수 스펙트럼을 가지는 유기물을 적층한 탠덤구조도 많은 연구가 진행되고 있다. 여러 흡수 층을 가진 다양한 유기물을

Fig. 15. Tandem device structure using P3HT and PCDTBT as donor materials and absorption spectra of the active layers.^[55]

코팅하면 보다 넓은 영역의 태양광 스펙트럼을 흡수할 수 있기 때문에 효율을 증가시킬 수 있다. 그림 15는 가시광 영역을 강하게 흡수하는 P3HT와 근적외선 영역을 강하게 흡수하는 PCPDTBT를 이용해 탠덤구조로 만든 사례이다.^[55] 4.7%의 P3HT:PC₇₀BM과 3.0%의 PCPDTBT:PCBM을 탠덤구조로 만들어 좁은 흡수영역을 확장시켜 효율을 6.5%까지 향상시켰

REFERENCES

- [38] C. J. Min, J. Li, G. Veronis, J. Y. Lee, S. H. Fan and P. Peumans, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 133301 (2010).
- [39] A. Abass, H. H. Shen, P. Bienstman and B. Maes, *J. Appl. Phys.* **109**, 7 (2011).
- [40] H. A. Atwater and A. Polman, *Nature Mater.* **9**, 205 (2010).
- [41] F. C. Chen, *Appl. Phys. Lett.* **95**, 013305 (2009).
- [42] V. E. Ferry, J. N. Munday and H. A. Atwater, *Advan. Mater.* **22**, 4794 (2010).
- [43] D. D. S. Fung, *J. Mater. Chem.* **21**, 16349 (2011).
- [44] K. L. Kelly, E. Coronado, L. L. Zhao and G. C. Schatz, *J. Phys. Chem. B* **107**, 668 (2003).
- [45] S. S. Kim, S. I. Na, J. Jo, D. Y. Kim and Y. C. Nah, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 073307 (2008).
- [46] A. P. Kulkarni, K. M. Noone, K. Munechika, S. R. Guyer and D. S. Ginger, *Nano Lett.* **10**, 1501 (2010).
- [47] X. M. Lu, M. Rycenga, S. E. Skrabalak, B. Wiley, Y. N. Xia and Y. N. Annu. *Rev. Phys. Chem.* **60**, 167 (2009).
- [48] D. M. Schaadt, B. Feng and E. T. Yu, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 063106 (2005).
- [49] M. Stavytska-Barba, M. Salvador, A. Kulkarni, D. S. Ginger and A. M. Kelley, *J. Phys. Chem. C*, **115**, 20788 (2011).
- [50] J. L. Wu, *ACS Nano* **5**, 959 (2011).
- [51] J. F. Zhu, *Appl. Phys. Lett.* **98**, 151110 (2011).
- [52] F. X. Xie, F. X. W. C. H. Choy, C. C. D. Wang, W. E. I. Sha and D. D. S. Fung, *Appl. Phys. Lett.* **99**, 153304 (2011).
- [53] C. H. Chou, W. L. Kwan, Z. R. Hong, L. M. Chen, Y. Yang, *Advan. Mater.* **23**, 1282 (2011).
- [54] G. Dennler, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 073502 (2006).
- [55] J. Y. Kim, *Science* **317**, 222,1141711 (2007).
- [56] G. Namkoong, P. Boland, K. Lee and J. Dean, *J. Appl. Phys.* **107**, 124515 (2010).
- [57] J. G. Xue, S. Uchida, B. P. Rand and S. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 5757 (2004).

Fig. 16. Tandem device structure using P3HT and PSBTBT as donor materials and morphology of PEDOT:Au layer.^[58]

다.(그림 15)

최근엔 이런 나노입자와 탠덤구조를 동시에 이용한 유기태양전지도 보고되었다. 그림 16은 최근에 발표된 새로운 탠덤 구조로 두 활성층 사이의 연결 층에 금속나노입자를 도입함으로써 연결층의 역할뿐만 아니라 나노 입자에 의한 산란효과까지 동시에 얻을 수 있다.^[58] 이 구조로 금속나노입자가 없을 때 5.22%, 나노입자가 있을 때 최대 6.24%까지 향상시켰다.(그림 16)

최근 독일의 Heliateg에선 탠덤구조를 이용해 9.8%를 구현하였고, 단위셀에서 7~8% 이상의 효율을 보고한 사례들이 많이 보고되고 있다.^[59,60] 이는 단일 활성층으로는 태양광의 넓은 영역을 모두 흡수할 수 없는 한계를 고효율의 단위셀들을 적용한 탠덤구조를 통해 극복함으로써, 고효율의 유기태양전지 개발을 가능함을 시사한다.

2. 차별화 및 저비용 대면적 호환 공정의 개발과 신뢰성 확보

(1) 신개념 저비용 전극 기술 개발 및 저가형 공정 기술 개발 동향

투명전극

박막형 디스플레이 장치와 태양전지에는 빛을 통과시키면서도 전류를 통하게 하는 투명전극이 필요하다. 원하는 파장대역의 빛을 최대한 많이 효과적으로 투과시키면서, 동시에 뛰어난 전도성을 갖는 투명전극은 높은 효율의 소자 제작에 있어 필수적인 요소이다. 이러한 투명전극 중 지금까지 가장 널리 쓰이고 있는 물질은 산화 인듐-주석(Indium tin oxide, ITO)으로, 가시광 영역에서 보통 85 % 이상의 높은 투과도와 15 ohm/sq 이하의 낮은 면저항 값을 보여준다.^[61,62]

그러나 ITO가 갖는 수급의 불안정성과 산화물의 기계적 특성 때문에 유연 기판 위에 응용이 어려운 문제점으로 인해, 이를 대체하기 위한 활발한 연구가 진행되고 있으며,^[63,64] 지금까지는 유연 기판에 사용 가능한 탄소 나노 튜브(CNT), 그래핀 등에 대한 연구가 많이 진행되었다. 탄소 나노 튜브의 경우는 그림 17에서 볼 수 있듯이 동일 저항 대비 투과도가

Fig. 17. Solar photon flux-weighted transmissivity vs. sheet resistance for various transparent electrodes.^[65]

ITO에 미치지 못하고 있지만,^[65] 그래핀 모노레이어(mono layer)의 전기적, 광학적 특성은 ITO에 근접한 성능을 보이고 있어 ITO의 대체 물질로 많은 관심을 받고 있다.^[66,67] 또한, 최근에는 ITO에 버금가는 높은 투과도와 낮은 면저항을 보이면서도 유연 기판에 적용 가능한 은나노선(silver nanowire)에 대한 많은 연구 결과가 발표되고 있다.^[65,68,69]

플렉서블 유기태양전지 및 저가형 공정

플렉서블 유기 태양전지는 유연한 기판 위에 상대적으로 간편한 공정을 사용하여 유기 태양전지를 제조함으로써, 디바

REFERENCES

- [58] J. Yang, J. Acs Nano **5**, 6210 (2011).
- [59] Y. Y. Liang, Advan. Mater. **22**, E135, (2010).
- [60] Z. C. He, Advan. Mater. **23**, 4636 (2011).
- [61] S. E. Shaheen, C. J. Brabec, N. S. Sariciftci, F. Padinger, T. Fromherz and J. C. Hummelen, Appl. Phys. Lett. **78**, 841 (2001).
- [62] Y. B. Yuan, Y. Bi and J. S. Huang, Appl. Phys. Lett. **98**, 063306 (2011).
- [63] D. S. Hecht, L. B. Hu and G. Irvin, Advan. Mater. **23**, 1482 (2011).
- [64] M. W. Rowell, M. A. Topinka, M. D. McGehee, H. J. Prall, G. Dennler, N. Sariciftci, L. B. Hu and G. Gruner, Appl. Phys. Lett. **88**, 233506 (2006).
- [65] J. Y. Lee, S. T. Connor, Y. Cui and P. Peumans, Nano Lett. **8**, 689 (2008).
- [66] K. S. Kim, Y. Zhao, H. Jang, S. Y. Lee, J. M. Kim, J. H. Ahn, P. Kim, J. Y. Choi and B. H. Hong, Nature **706**, 7230 (2009).
- [67] S. Bae, H. Kim, Y. Lee, X. F. Xu, J. S. Park, Y. Zheng, J. Balakrishnan, T. Lei, H. R. Kim, Y. I. Song, Y. J. Kim and K. S. Kim, Nature Nanotechnology **5**, 574 (2010).
- [68] S. De, T. M. Higgins, P. E. Lyons, E. M. Doherty, P. N. Nirmalraj, W. J. Blau, J. J. Boland and J. N. Coleman, Acs Nano **3**, 1767 (2009).
- [69] L. B. Hu, H. S. Kim, J. Y. Lee, P. Peumans and Y. Cui, Acs Nano **4**, 2955 (2010).

이스의 제조 가격을 낮출 수 있을 뿐 아니라 유연한 특성으로 인해 태양전지의 적용 분야 또한 확대될 수 있다.^[70] Zimmermann *et al.*은 slot die 코팅 방식을 이용하여 간단한 공정으로 64 %의 FF를 보이는 플렉서블 유기 태양전지에 관한 연구를 진행하였으며,^[71] Hauch *et al.*은 플렉서블 유기 태양전지가 외부 환경에 노출된 상황에서 매우 안정된 충진률 특성을 보이는 것을 밝혀냈다.^[72] 유연 기판 위에 제조한 플렉서블 유기 태양전지는 또한 실리콘 태양전지에 비해 가벼운 무게를 갖기 때문에, 하중을 많이 받는 건물의 벽면 및 지붕 위에 좀 더 안정적으로 사용할 수 있으며, 유연한 특징을 바탕으로 굴곡이 있는 형상에도 무리 없이 적용될 수 있다는 장점을 갖는다.^[73]

건물 일체형 태양전지 (BIPV)

최근 건물 일체형 태양광 발전(Building integrated photovoltaic, BIPV) 시스템에 대한 관심이 높아지면서, 건물의 외벽면 아니라 창문을 태양전지로 이용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 창으로 이용하기 위해서는 빛을 일부 투과시켜야 하는데, 빛 흡수 층의 두께가 얇고, 모듈의 무게가 상대적으로 가벼운 유기 태양전지가 매우 적합한 후보로 판단된다. Han *et al.*은 금속막을 포함하는 다층박막 투명전극을 사용하여 반투명 태양전지의 비대칭 흡광 구조를 활용하여, 건물의 창이나 자동차의 창에 쓰이는 틴트 유리(tinted glass)의 통상적 투과율인 약 30%의 투과율을 보이면서도 그 효율은 일반 불투명 유기태양전지의 80–90%에 해당하는 시스루 타입의 유기 태양전지를 구현하는 연구를 진행하였으며,^[74] Hwang *et al.*은 간단한 라미네이션 공정을 사용함과 동시에 전극의 한 부분에 Cs_2CO_3 를 버퍼 층으로 삽입하여 변환 효율의 향상을 시도하였다.^[75] 최근 단분자 증착 방식을 이용한 탠덤 구조의 반투명 유기 태양전지에 관한 연구 결과가 발표되었으며, 4.9%의 높은 변환 효율을 보였다.^[76](그림 18)

결 론

유기태양전지는 저가 생산이 가능하고, 가볍고 유연한 특성 때문에 차세대의 태양전지로 각광받고 있다. 유기발광다이오드의 성공적인 상업화로 인해 유기태양전지의 성공 가능성 역시 높게 평가받고 있지만, 다른 종류의 태양전지에 비해서 상대적으로 낮은 광전환 효율은 개선되어야만 한다. 효율 개선을 위해서 다양한 물질 개발, 특히 현재 잘 알려진 물질들보다 낮은 에너지갭을 갖는 유기 반도체 개발을 통해서 보다 넓은 영역에서의 광흡수를 통한 단락전류의 증가와 동시에

Fig. 18. Tandem transparent organic solar cell with 24% of transmittance and 4.9% of power conversion efficiency.^[76]

개방전압 역시 높이려는 연구가 진행되고 있다. 표면 개질을 통해 에너지 레벨의 조절을 통해서도 효율의 증대가 많이 보고되고 있다. 탠덤 구조를 통해서 효율을 높이려는 연구가 활발하게 진행되고 있고, 다양한 광학적 특성을 이용하여 주어진 태양전지의 광흡수를 증가시키려는 노력도 필요하다. 박막형 광전자소자에 필수 소재인 투명전극의 유연성 개선 및 가격 경쟁력 확보 또한 중요한 연구 주제이다. 유연하고 저렴한 투명전극이 개발되면 플렉서블 태양전지나 건물 일체형 태양전지같이 유기태양전지 고유의 특성을 잘 살린 응용분야에 있어서 미래가 매우 밝을 것으로 기대된다. 유기태양전지가 갖고 있는 잠재적 가능성을 현실화하기 위해서는 물리학의 역할이 매우 중요한 시점이다.

REFERENCES

- [70] M. Al-Ibrahim, H. K. Roth, U. Zhokhavets, G. Gobsch and S. Sensfuss, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **85**, 13 (2005).
- [71] B. Zimmermann, H. F. Schleiermacher, M. Niggemann and U. Würfel, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **95**, 1587 (2011).
- [72] J. A. Hauch, P. Schilinsky, S. A. Choulis, R. Childers, M. Biele and C. J. Brabec, *Solar Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **92**, 727 (2008).
- [73] S. I. Na, S. S. Kim, J. Jo and D. Y. Kim, *Advan. Mater.* **20**, 4061 (2008).
- [74] D. Han, H. Kim, S. Lee, M. Seo and S. Yoo, *Optics Express* **18**, A513 (2010).
- [75] J. S. Huang, G. Li and Y. Yang, *Advan. Mater.* **20**, 415 (2008).
- [76] J. Meiss, T. Menke, K. Leo, C. Uhrich, W. M. Gnehr, S. Sonntag, M. Pfeiffer and M. Riede, *Appl. Phys. Lett.* **99**, 044301 (2011).