

유기박막 태양전지의 현재와 미래

신백균<인하대학교 전기공학부 교수>

1 서론

유기 태양전지(Organic Solar Cell)는 크게 염료감응(Dye-Sensitized)형과 유기박막(Organic Thin Film)형으로 분류된다. 태양광을 흡수하여 생성된 전하 캐리어(Charge Carrier)의 흐름에 기여하여 외부에 전류를 출력함으로써 전력을 생산하는 활성층(Active Layer)이 유기물질을 기반으로 하는 점에서는 이 두 가지가 공통점을 가지고 있으나, 활성층의 구성 재료, 광전변환의 메커니즘 및 소자 구조의 면에서는 전혀 다르다. 따라서 염료감응 태양전지와 유기박막 태양전지는 서로 독립적으로 제안되고 연구개발 되어왔으며, 염료감응형의 경우에는 최근 상용화 전 단계에까지 이르고 있다. 염료감응형의 상용화는 현재 액체 전해질의 문제와 그로 인한 장기안정성의 관점에서 큰 벽에 부딪힌 상태이며, 유기 박막형은 낮은 전력변환효율(Power Conversion Efficiency: PCE)의 문제를 서서히 해결하여 온 끝에, 상용화 가능성을 논할 수 있는 기준인 10% 전력변환효율의 달성을 목전에 두고 있다 [1]. 본 논고에서는 다양한 관점에서 그 미래가 기대되는 유기박막 태양전지의 지향점을 먼저 논하고, 대표적 유기박막 태양전지의 구조와 전력변환효율 결정요인을 개략적으로 소개한 후, 실용화를 위해 해결하

여야 할 기술적 과제와 종합적 관점에서 바라본 미래 전망을 기술하고자 한다.

2. 유기박막 태양전지의 지향점

현재 상용화가 완결되어 본격적인 응용과 시장 확대에 나서고 있는 태양전지는 단결정 실리콘, 다결정 실리콘, 박막형 실리콘 태양전지 및 화합물 반도체 기반 박막형 태양전지 등이다. 이들의 공통점은 모두 단단하지만 깨어지기 쉽고, 구부리거나 휘 수 없는 무기재료를 이용하고 있다는 것이며, 전력변환 효율이 20% 수준으로 높다는 장점을 가지고 있다. 태양전지의 효율은 입력된 태양광 에너지 대비 출력된 전력 에너지의 비율의 관점에서든 평가될 수 있지만, 경제성을 주목한다면, 1W의 전력을 생산하기 위해 얼마의 총 비용(\$)이 소요되었느냐는 ‘watts per dollar: w/\$’의 기준이 보다 타당하다 할 수 있다. 실제로 다양한 태양광 발전기술의 경제성은 이 ‘w/\$’를 기준으로 수력/화력/원자력발전 등 기존 전력생산기술은 물론 풍력/조력/지력발전 등 여타 신재생에너지 기술과 비교·평가되고 있다. 경제성의 관점을 총 생산비용 대비 출력가능 초기 전력이 아니라, 설치비용, 운영비용 및 장기안정성·유지보수 비용으로까지 확대해 본다면, 현재의 모든 태양전지

기술래설

기술이 실질적으로 당면하고 있는 문제는 보다 더 심각하고, 그에 따른 해결 과제는 매우 복잡하고도 난해한 실정이다.

2000년대 중반부터 본격화된 유비쿼터스(Ubiquitous) 혁명은 현 산업의 전반과 일상생활은 물론 향후 인류문명에 큰 영향을 미칠 것으로 전망되고 있으며, 그 대표적인 상용화 제품으로 이동성(Mobile) 혹은 휴대성(Portable)에 주목한 스마트폰을 예로 들 수 있다. 향후의 모든 전자기기와 관련 제품은 이동성 혹은 휴대성을 목적으로 하는 독립적인 시장을 지향할 것으로 예상되며, 그 흐름(Trend)은 해를 거듭할수록 점점 더 폭발적으로 강력해지고, 그 영향범위도 더욱 더 확대될 것으로 전망된다. 유비쿼터스 혁명의 궁극적인 실현을 위해 주목하여야 할 또 하나의 관점은 사용자 편의성 및 부착 가능성이며, '구부리거나 휘 수 있고, '접었다 펼 수 있어야 하는 것이 그 한 방향이라 할 수 있다. 최근에 상용화가 시작된 '휘어진' 디스플레이 기반 스마트폰이 그 시작이며, 향후에는 모든 제품에서 그러한 '기능(Function)' 및 '융합화(Convergence)'가 화두가 될 것이 예상된다. 이는 궁극적으로 '입을 수 있는(Wearable)' 태양전지를 지향하고 있다.

유기박막 태양전지는 상기의 관점에서 볼 때 미래 전망이 매우 밝은 기술이라 할 수 있다. 현재 비교적 낮은 전력변환효율이 큰 단점이고 향후에도 획기적인 기술적 개선과 발전에 이르기까지 많은 시간과 비용이 소요될 것이라 예상되지만, 인쇄공정을 기반으로 저비용화가 가능한 생산단가면의 장점과 구부리고 휘고 접을 수 있는 유기물질 고유의 특성을 적극적으로 활용하여 유비쿼터스 혁명에 본격적인 실현에 기여할 수 있는 장점을 내재하고 있는 점들이 향후 유기 태양전지의 미래를 결정짓는 핵심 요인이 될 것이다 [2-4]. 다음 그림1과 2는 유기박막 태양전지가 왜 필요하며, 어떻게 응용될 것인가를 극명하게 보여주고 있다. 그림 1과 2는 실리콘 태양전지 응용의 틈새시

장(Niche Market)을 개척하는 실제 사례들이지만, 쉽게 깨지고 휘 수 없으며, 곡면화된 표면에 부착할 수 없는 무기재료 기반 태양전지가 아니라 유기박막 태양전지가 적용되어야 할 것이다. 향후에도 상당 기간 대규모 전력생산의 관점에서는 실리콘 기반 태양전지가 선두 주자일 것이 거의 확실하지만, 날로 확대되고 있는 휴대용 전자기기의 전방위적 확산과 의류와 가방 등에 부착하여 활용될 수 있는 개인용(Personal) 전력생산기기의 관점에서, 우수한 경제성과 사용자 편의성 및 부착 가능성을 보유한 유기박막 태양전지의 미래를 긍정적으로 바라볼 수 있을 것이다.



그림 1. 비키니형 태양전지



그림 2. 태양전지장착 가방

3. 대표적 유기박막 태양전지의 구조와 전력 변환효율 결정 요인

그림 3은 최근 유기박막 태양전지의 비약적인 특성 향상에 기여한 벌크 헤테로 정크션(Bulk Hetero Junction: BHJ) 구조의 개략도 이다. 초기에 제안된 유기박막 태양전지는 무기 태양전지와 유사한 pn 접합구조의 활성층을 기반으로 하고 있으며, 유기박막 태양전지의 경우에는 전자주개(Electron-Donor) 층과 전자받개(Electron-Acceptor)층의 이중접합 구조가 활성층 역할을 수행한다. 태양전지의 특성 향상은 크게 2가지 관점에서 논의할 수 있으며, 첫째로 태양광 중 광전자(Photon)를 최대한 많이 흡수하여야 하며, 둘째로 흡수된 광전자를 통해 최대한 많은 전하(charge carrier)를 생성하여야 한다. 광전자의 흡수를 고려할 경우 유기 활성층의 두께는 최소한 100nm 이상이어야 하지만, 유기 반도체 내에서 전하 생성을 좌우하는 여기자(Exciton)의 최대 확산길이 $10\sim 20\text{nm}$ 인 점을 고려하면 반대로 활성층의 두께가 가능한 한 얇아야 한다. 따라서 이중접합 구조에 기반한 유기박막 태양전지의 전력변환효율은 상기와 같은 상호적으로 반대되는 요구조건의 제약으로 최대 5%의 벽을 넘을 수가 없었다 [5]. 그 제약을 단숨에 뛰어넘어 10% 이상의 전력변환효율 달성을 가시화한 것이 그림 3에 보여지는 BHJ 구조 기반 유기박막 태양전지이다. BHJ로 전자주개와 전자받개가 접합된 활성층의 두께는 보통 100nm로 광전자의 흡수량을 최대화하기에 적합하면서도, 전자주개와 전자받개가 상호침투하는 계면(Inter-penetrating Interface)을 형성됨으로 인하여, 생성된 여기자(Exciton)가 소멸 거리 이전에 계면에 도달하여 분리되면서 결과적으로 전하 생성량도 극대화 될 수 있다[7-9]. 그림 4는 그러한 BHJ 구조 기반 유기 반도체 활성층의 계면을 형상화한 개략도이다. 또한, 전자주개와 전자받개 물질 고유의 태양광 스펙트럼 중 특

정 파장영역 흡광영역 특성은 일반적으로 무기 반도체에 비해 좁은 흡광영역을 보이는 유기 반도체의 단점을 극복하는 요인으로도 작용하며, 전자주개 및 전자받개 물질의 선택에서 중요한 요인 중 하나이다. 한편, 전자주개형 유기반도체의 HOMO(Highest Occupied Molecular Orbital) 준위와 전자받개형 유기반도체의 LUMO(Lowest Unoccupied Molecular Orbital) 준위의 차이는 유기박막 태양전지의 핵심 성능인자인 개방전압(Open-Circuit Voltage: V_{oc})을 결정하는 요인으로, 역시 유기반도체 물질 선택 시 중요하다. 개방전압이 크면 클수록 이중접합된 유기반도체 계면에 형성된 내부전압(Built-in Potential)이 크게 되어 그 계면에 도달하는 여기자의 전하분리가 보다 활성화될 수 있다.

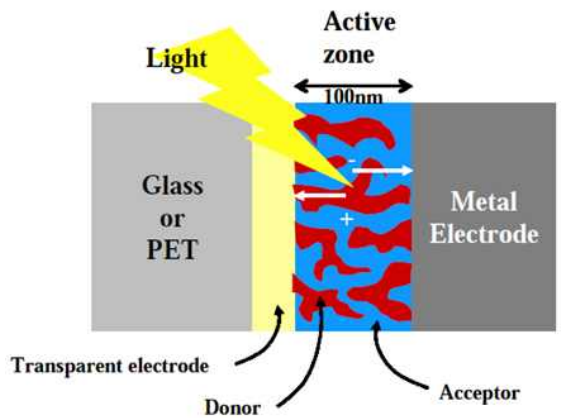


그림 3. 벌크 헤테로 정크션 구조 유기박막 태양전지

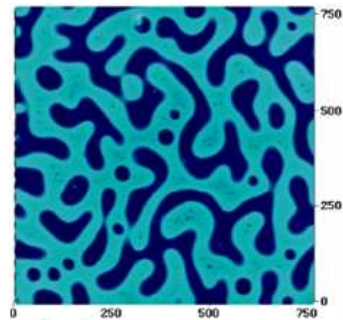


그림 4. 벌크 헤테로 정크션 구조

유기 반도체 활성층과 접하는 양극(Anode) 및 음극(Cathode) 전극의 전기적 특성 역시 유기박막 태양전지 특성에 크게 영향을 미치며, 기본적으로 전자 주개형 유기반도체의 HOMO 준위와 유사하도록 비교적 큰 일함수(Work Function)를 갖는 물질이 양극으로 선택되고, 음극의 경우에는 전자받개형 유기반도체의 LUMO 준위와 유사하도록 비교적 작은 일함수를 갖는 물질을 선택한다. 각 전극과 유기반도체 계면에서의 전자손실을 최소화하기 위해 별도로 양극 쪽에 정공수송층(Hole Transfer Layer)역할을 하는 유기박막을 삽입하고, 음극 쪽에는 전자수송층(Electron Transfer Layer)역할을 하는 유기박막을 삽입함으로써, 유기반도체 활성층 계면에서 분리되어 생성된 정공과 전자가 가능한 한 많이 전극으로 전달되도록 하고 있다. 유기박막 태양전지에서도 단락전류(Short-Circuit Current: I_{sc})가 매우 중요하고, 단락전류를 향상시키기 위해 유기반도체 내 전자와 정공의 이동도를 높이는 것이 관건이며, 정공수송층과 전자수송층이 전극과 유기반도체 계면 사이의 에너지 장벽을 낮추는 것도 그 방안의 하나이다. 태양전지의 전력변환효율을 결정짓는 또 다른 성능인자는 Fill Factor(FF)로서, 태양전지의 실질적 최대전압(V_{max})과 최대전류(I_{max})가 각각 개방전압(V_{oc})과 단락전류(I_{sc})보다 작아지는 것을 평가하는 인자이며, 이것을 향상시키는 요인으로서는 계면의 접촉저항을 줄이고 계면에서 전하가 포획되는 것을 최소화하는 방안 등이 알려지고 있다.

4. 유기박막 태양전지의 해결과제와 향후전망

실리콘 기반 태양전지의 전력변환효율을 향상시키는 것도 매우 어려운 과제이지만, 유기박막 태양전지의 경우에는 그 보다 훨씬 더 어려운 과제들이 산재해 있다. 그림 5는 유기박막 태양전지의 광전변환과 전하생성 과정을 단계별로 보여주고 있으며, 각 과정 마

다 해결되어야 할 문제점들도 제시하고 있다. 태양광이 유기박막 태양전지에 입사하는 과정에서는 활성층 내로 입사되지 않고 반사되는 문제와 입사된 태양광도 그 일부만 흡수되는 문제가 있으며, 흡수된 태양광에 의해 생성된 여기자가 전하생성에 기여하지 못하고 재결합하거나, 생성된 전하가 재결합하는 문제 등 많은 제약요인들이 있음을 볼 수 있다. 그림 6은 그 전체 과정의 개념도이다.

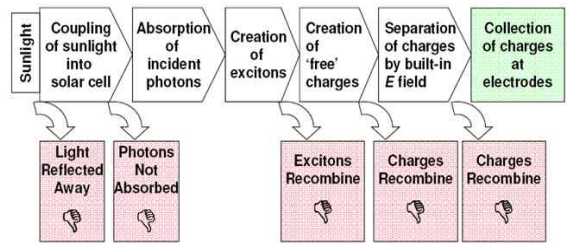


그림 5. 유기박막 태양전지의 동작 단계 및 단계별 해결 과제

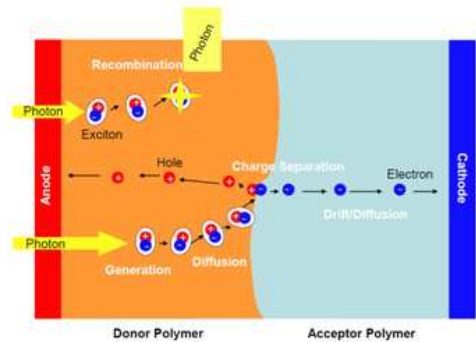


그림 6. 유기박막 태양전지의 동작원리

최근 유기박막 태양전지의 연구개발 방향은 이미 그 우수성이 확인된 벌크 헤테로 정크션 구조의 활성층의 최적화[10], 낮은 밴드갭 고분자 활성층의 활용[11], 정공수송층의 도입에 의한 양극/유기반도체 계면의 최적화[12] 및 전자수송층 도입에 의한 유기반도체/음극 계면의 최적화[13] 등을 예로 들 수 있다. 또한 실리콘 기반 태양전지에서와 마찬가지로 복

수개의 태양전지를 결합한 탠덤 구조를 통해 태양광의 흡수 파장 영역을 확대한 유기박막 태양전지의 연구도 진행되고 있으며, 유기박막 태양전지로서는 최초로 10.6%의 전력변환효율이 달성되었다[1]. 전력변환 효율의 향상 과제와 별개로 향후 유기박막 태양전지가 주력하여야 할 연구개발 방향은 유기재료의 경량성, 저비용 공정 가능성 및 자유로이 구부릴 수 있는 장점을 실제로 구현할 수 있는 공정의 개발이다[2-4]. 대면적화에 의한 저비용 공정의 개발은 주로 습식 스프레이 코팅의 활용 또는 기존 인쇄공정의 활용을 지향하고 있다. 그림 7과 8은 각각 스프레이 코팅 공정 [13] 및 Roll-to-Roll 인쇄공정의 개략도이다.

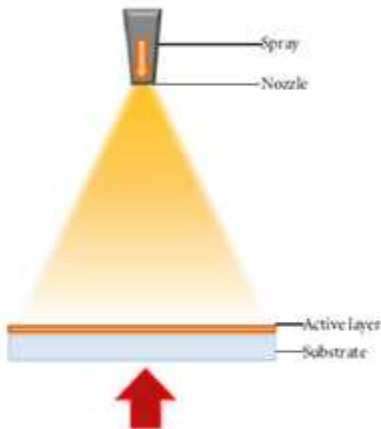


그림 7. 스프레이 코팅 공정

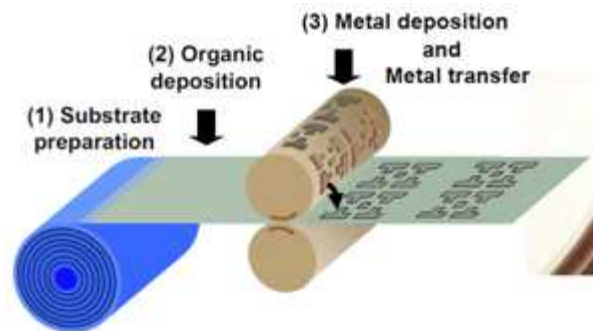


그림 8. Roll-to-Roll 인쇄공정[Konarka社]

유기박막 태양전지의 상용화는 전술한 바와 같이 대용량의 전력생산 분야 보다는 유비쿼터스 혁명의 실현화를 위한 소용량·이동형 전력생산 분야를 지향하고 있으며, 상기와 같은 성능개선 및 저비용화에 더불어 플렉시블 태양전지의 실현과 그에 최적화된 봉지재료 및 공정의 개발에 의한 신뢰성 향상이 필수적으로 선행되어야 한다. 상용화용 시제품에서의 액체 전해질의 신뢰성 문제로 인한 염료감응형 유기 태양전지의 전례에서도 볼 수 있듯이, 신뢰성의 확보가 없는 성능개선의 무용성(無用性)도 유기박막 태양전지가 향후에 반드시 거쳐야 할 ‘통과의례’가 될 전망이다. 플렉시블 소자의 구현은 ‘휨 수 있고, 투명하면서도 금속 수준의 전기전도성을 가지는’ 기판 또는 전극의 개발이 먼저 선행되어야 하지만, 궁극적으로는 플렉시블 소자의 구현을 위한 봉지재료의 개발이 시급하다. 최근 시장에 진입하기 시작한 플렉시블 AMOLED 디스플레이와 마찬가지로 외부에서 침투되는 수분과 산소에 대한 취약성은 유기반도체 재료 기반 소자의 숙명과도 같으며, 유기박막 태양전지 역시 당면하고 있는 난제(難題)이다. 현재 전세계 태양전지 시장과 생산업체가 직면하고 있는 단가하락, 수익성 확보문제, 시장의 일시적 교란 등 상용화 초기 과정의 ‘성장통’은 유기박막 태양전지의 관점에서 보면 위기가자 기회이기도 하다. 태양전지 시장의 확대가 답보상태에 머물고 있는 점에서는 유기박막 태양전지 등 신기술에 대한 투자 및 연구개발이 위촉되는 위기요인이 될 수도 있겠으나, 유기박막 태양전지만의 독보적인 가능성 및 장점은 오히려 연구개발은 물론 상용화에 박차를 가할 수 있는 기회요인으로 작용되기를 기대한다 하겠다.

참고문헌

[1] Jingbi You¹, Letian Dou¹, Ken Yoshimura, Takehito Kato, Kenichiro Ohya, Tom Moriarty, Keith Emery, Chun-Chao Chen, Jing Gao, Gang Li and Yang Yang, NATURE COMMUNICATIONS (2013) 1.

[2] J. Yang, W. Chen, B. Yu, H. Wang, and D. Yan, Organic Electronics 13 (2012) 1018.
[3] Y. M. Nam, J. Huh, and W. H. Jo, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 94 (2010) 1118.
[4] H. Ohkita and S. Ito, Polymer 52 (2011) 4397.
[5] C. W. Tang, Appl. Phys. Lett. 48 (1986) 183.
[6] G. Dennler, M. C. Scharber, and C. J. Brabec, Adv. Mater. 21 (2009) 323.
[7] C. Deibel, and V. Dyakonov, Rep. Prog. Phys. 73 (2010) 096401.
[8] C. Deibel, V. Dyakonov, C. J. Brabec, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 16 (2010) 1517.
[9] S. Kannappan, P. Kummar, J. Tatsugi, P.-K. Shin, and S. Ochiai, J. Mater. Sci. 48 (2013) 2308.
[10] P. Kumar, S. Kannappan, S. Ochiai, and P.-K. Shin, J. K. Phy. Soc. 62 (2013) 1169.
[11] S. Ochiai, P. Kumar, K. Santhakumar, and P.-K. Shin, Electron. Mater. Lett. 9 (2013) 399.
[12] I.-J. No, P.-K. Shin, S. Kannappan, P. Kummar, and S. Ochiai, Intl. J. Photoenergy 2013 (2013) 202467.

◇ 저 자 소개 ◇



신백균(申白均)

1967년 1월 16일생. 1990년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1992년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 독일 Friedrich - Alexander Univ. Erlangen-Nuernberg 대학원 전기전자공학부 졸업(박사). 1992~2000년 독일 FhG-IISB 연구소 객원연구원. 2002~2004년 일본 Kumamoto Univ. 외국인 방문연구원. 2004년~현재 인하대학교 전기공학부 교수. 2008~2010년 인하대학교 IT공과대학 부학장. 2008~2011년 한국조명전기설비학회 평의원. 2012년~현재 한국조명·전기설비학회 이사.