

나노패턴 응용 유기태양전지 연구동향 I

최근 들어 전세계적으로 에너지 부족 문제 및 그 해결방안에 대한 연구가 관심을 받고 있으며, 국내 또한 예외일 수는 없다. 국내에서도 이미 정부 주도하에 민간 및 국공립 대학, 연구소에서 많은 연구가 진행 중이다. 최근 화석연료의 고갈에 따른 에너지 문제를 해결하기 위해, 대체 에너지원으로 태양전지에 관한 연구 열기가 뜨겁다. 태양전지는 청정 녹색 에너지원으로 에너지 자원이 무한하고 환경문제가 없다는 것이 가장 큰 장점으로 인식되고 있다. 태양전지 분야 중 실용화에 근접한 기술로 실리콘 태양전지와 염료감응 태양전지를 들 수 있으며, 카드뮴 텔루리드(CdTe)와 같은 화합물 반도체는 우주선 및 위성 등 특수용도용으로 각광을 받고 있다. 하지만, 유기태양전지는 아직 실험실 수준에서 제작이 이루어지고 있으며 대면적화/고효율화에 대한 문제가 여전히 상용화를 위한 숙제로 남아있다. 본 사업에서는 나노 소재 및 나노패터닝 기술을 이용한 나노-융합 태양전지 연구 동향을 소개하고자 한다. 특히, 최근 이슈가 되고 있는 제 3세대 태양전지의 하나인 유기태양전지 고효율화를 위한 나노 패턴 적용 연구 동향 및 초고효율 태양전지를 위한 양자점 태양전지 연구동향을 중심으로 연구정보를 제공하고자 한다.

그 첫번째로 본 글에서는 간단히 유기 태양전지 역사와 원리 그리고 나노패턴 응용 유기태양전지 연구동향을 소개하고자 한다.

1. 유기 태양전지 연구의 필요성

2009년 2월 13일자 Environmental Science & Technology에 보고된 분석 결과에 의하면 태양 전지의 양산 및 실용화에 있어서 가장 많이 보도된 문제는 생산 가격 및 자원의 풍부성 문제이다. 의심할 여지 없이 실리콘 태양전지가 실용화된 태양전지의 대부분을 차지함에도 불구하고 실리콘 자원의 부족은 계속해서 문제로 남아있으며, 여전히 전세계 인구의 30%는 신뢰적이고 효율적인 전기에너지 혜택을 받지 못하고 있다고 한다. 실리콘을 대체하는 못하더라도 부족한 에너지의 생산을 위한 새로운 물질로의 접근방식이 필요한 이유중의 하나라고 할 수 있겠다. 최근 미국의 오바마 대통령 취임식에서 청정 에너지를 미래의 수종 사업으로 지목한 것에서 알 수 있듯이 식량 문제와 더불어 에너지 문제가 인류의 가장 큰 도전 과제 중의 하나임은 부정할 수 없을 것이다. 국내에서는 주로 실리콘기반 가정용 및 건물용 태양전지가 주를 이루고 있으며, 최근 태양광 충전이 가능한 친환경 휴대폰을 공개해 MWC 2009에 출품한 예가 있다. 이 휴대폰은 10분 충전하면 3분간 통화가 가능하다고 한다. (아래 삼성전자와 LG 전자의 '블루어스' 폰과 LG전자의 '에코프렌들리' 폰 그림 참고.)

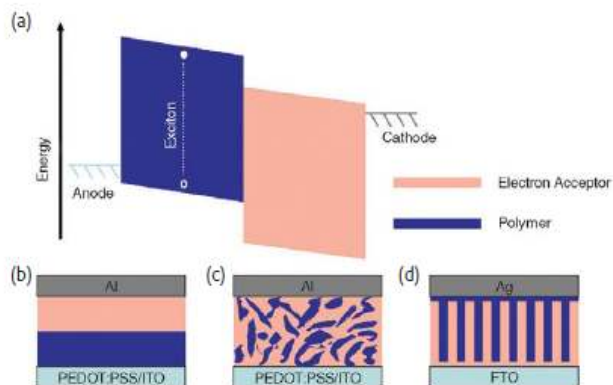


<그림1. 출처 2009.02.13일 E-Daily>

유기태양전지는 폴리머를 기반으로 하기 때문에 유연하다는 장점이 있어서 유연 디스플레이 혹은 군사용으로 적합하나 아직 효율이 낮아서 실용화 하기는 힘들다. 또한, 장시간 사용에 따른 소자의 안정성 문제 또한 해결해야 할 또 하나의 과제이다. 하지만, 장기적으로 효율 증대 기술의 발전과 함께 실리콘의 고갈에 따른 가격 문제에 따라 그 응용 폭이 넓어질 수 있지 않을까 추측해 본다. 효율 문제만 해결된다면 용액공정 기반으로 하는 롤투롤 연속 공정이 가능해 공정 가격 및 대량 생산 측면에서 다른 공정보다 확실한 장점을 가지고 있다.

2. 유기 태양전지 원리 및 나노패턴 필요성

2.1. 유기 태양전지 원리



<그림2. McGehee et al, Materialstoday 2007>

유기 태양전지의 원리를 간단히 설명하면, 활성층(Active layer)으로 사용되는 전도성 고분자(현재까지 P3HT(poly(3-hexylthiophene))가 효율이 가장 높은 것으로 보고됨)에서 빛을 흡수해 전자와 정공이 짝을 이룬 exciton이 형성되고 이 exciton이 확산되어 전자수용체(electron acceptor)와 만나면 전자와 정공이 분리되어서 전자는 cathode로 이동하고 정공은 anode로 이동해서 원하는 전기를 생산하는 메커니즘이다. 여기서 전자 수용체 물질의 전자 친화도는 활성층 고분자보다는 커야 하지만 이온화 포텐셜 보다는 작다는 요건이 만족되면 된다. 다시 한번 메커니즘을 요약하면,

- 1) light absorption exciton generation
 - 2) exciton diffusion
 - 3) exciton dissociation and charge formation
 - 4) charge transport and charge collection
- 과 같은 순서가 된다.

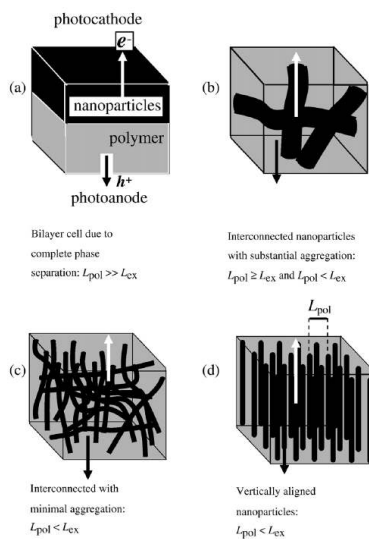
2.2. 나노패턴 필요성

그런데 여기서 문제는 생성된 exciton의 exciton diffusion length가 약 10nm 미만이라는 것이다. 다시 말하면, 분리된 전자와 정공이 다시 결합하지 않고 전극으로 잘 이동하기 위해서는 10nm 급으로 잘 분산되어 있어야 한다. 만약 그렇지 않다면 생성된 전자와 정공은 전극으로 이동도중에 다시 결합하거나 생성된 exciton이 소멸해 버려서 전기생산에 도움이 되지 못하게 되는 것이다. 이것이 태양전지에 있어서 나노 패턴이 필요한 하나의 이유라고 할 수 있다. 지금까지 가장 활발히 그리고 손쉽게 이용하는 방법은 위 그림 c와 같이 전자 수용체와 전도성 고분자를 용액중에서 혼합해서 스핀코팅하여 BHJ (bulk heterojunction) 이라는 잘 분산된 무정형 구조로 만들어 주는 것이었다. 현재 이러한 방법을 통해서 P3HT와 PCBM([6,6]-Phenyl C61 butyric acid methyl ester) 조합으로 약 4-6%의 효율이 세계적인 연구의 결과이다. 하지만 이런 방법으로는 실용화에 필요한 셀효율 15% (모듈 효율 10%)에는 많이 부족하고 현실적으로 한계가 있다고 알려져 있다. 그래서 제시된 방법이 그림 2d와 같이 나노 급으로 규칙적인 패턴을 만들어 주어 생성된 exciton의 소멸을 최소화하고 효율을 극대화 하는 방법이 하나의 해결책으로 제시되고 있다. 아래 그림 3d 에서와 같이 그 형태가 랜덤 보다는 수직인 방향으로 정렬될 때가 가장 이상적이라고 할 수 있다.

참고로 현재 까지 보고된 P3HT이용 BHJ 관련 유기 태양전지 관련 논문의 역사는 다음과 같다.

1. 2003 - P3HT:PCBM(1:4), $\eta=0.2\%$, J.C. Hummelen *et al*, *Synthetic Metal*, 2003, 138, 299
2. 2003 - P3HT:PCBM (1:1), $\eta=3.5\%$, F. Padingger *et al*, *Adv. Funct. Mater.*, 2003, 13, 85
3. 2004 - P3HT:PCBM (1:1), $\eta=5\%$, Christoph J. Brabec (SIEMENS)

4. 2005 – P3HT:PCBM (1:0.6), $\eta=5.2\%$, Marisol Reyes-Reyes *et al*, *Org. Lett.*, 2005, 7, 5749
5. 2005 – P3HT:PCBM (1:2), $\eta=4.4\%$, Y. Yang *et al*, *Nature Mater.*, 2005, 4, 864,
6. 2005 – P3HT:PCBM (1:0.8), $\eta=4.9\%$, K. Kim *et al*, *App. Phys. Lett.*, 2005, 87
7. 2006 – P3HT:PCBM (1:1), $\eta=4.4\%$, Youngkyoo Kim *et al*, *Nature Mater.*, 2006, 5, 197
8. 2006 – P3HT:PCBM (1:1), $\eta=5\%$, P. Schilinsky *et al*, *Adv. Funct. Mater.*, 2006, 16, 1669
9. 2006 – P3HT:PCBM (1:0.8), $\eta=5\%$, K. Lee *et al*, *Adv. Mater.*, 2006, 18, 572
10. 2007 – PCPDTBT:PC71BM (1:2), $\eta=5.5\%$, G.C. Bazan *et al*, *Nature Mater.*, 2007, 6, 1
11. 2007 – P3HT:PCBM (1:0.8)/PCPDTBT:PC71BM, $\eta>6\%$, TiO_x optical spacer, andem K. Lee *et al*, *Science*, 2007, 317, 222



<그림3. Advances in Colloid and Interface Science 138 (2008) 1–23>

3. 나노 패턴 유기 태양 전지 연구동향

현재 세계적으로 나노 패턴을 이용한 유기 태양전지의 효율 증대 연구는 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 1) 활성층의 직접적 나노 패턴을 이용한 효율 증대 연구
- 2) BHJ의 나노 패턴을 통한 활성층에서의 빛 흡수량 증대 연구
- 3) 반사방지 나노 패턴을 이용한 빛 흡수량 증대 연구.

1) 활성층 연구의 경우 동일한 빛 흡수량에 대해서 최대한 내부 에너지 변환효율을 높이는 일로 분류할 수 있으며, 2) BHJ 패턴 연구의 경우는 일단 투명기판을 통과한 빛 에너지 흡수량을 최대화 하는 연구라 할 수 있다. 3) 반사방지막 패턴 연구는 빛이 소자외부에서 내부로 전달될 때 기판 반사에 의한 광 에너지 손실을 최소화 하는 연구라 보면 되겠다. 다음 글에서는 위 각각의 연구 동향에 대해서 좀 더 자세히 최근 논문을 위주로 연구동향을 살펴보고자 한다. ¹

¹ 작성자: 최대근 (한국기계연구원 나노공정장비연구실), 문의: lamcdg@kimm.re.kr