

고효율 광·음극극을 이용한 이중구조 염료감응 태양전지

최근 에너지고갈에 따른 신·재생에너지에 대한 관심이 증대되면서 태양에너지를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 실리콘 태양 전지를 대체하기 위한 태양전지 중의 하나로 박막 염료감응 태양 전지(dye-sensitized solar cells, DSSC)를 뽑을 수 있다. 미세한 기공(mesopore)을 포함한 반도체 물질(semiconducting materials)을 전극으로 이용하는 DSSC는 그 재료와 공정이 저렴하다는 하다는 장점을 지니므로, 저가 태양전지용으로 그 중요성이 증대되고 있다. 전형적인 고효율 염료감응 태양전지의 경우, 빛에 의해서 들뜬 전자(excited electron)가 n-형 반도체 물질 광·양극(photoanode)으로 주입되어 광전기를 발생시키는 형태이다(n-DSSC). 반대로, 광·음극(photocathode)을 이용한 염료감응 태양전지(p-DSSC)의 경우는, 전자가 p-형 반도체 물질에서 빠르게 염료로 이동하는 역과정(inverse mode)을 이용하여 구동된다. 이중구조(tandem) 염료감응 태양전지(pn-DSSC), 즉 p-형과 n-형 반도체 물질 모두를 이용한 태양전지구조는 광·양극(photoanode)만을 이용한 염료감응 태양전지에 비하여 훨씬 높은 효율을 얻을 수 있다고 이론적으로 알려지고 있다. 그렇지만, 지금까지의 연구에서는 광·양극쪽의 태양전지(p-DSSC)에서의 성능이 좋지 않았기 때문에 전체적인 이중구조 염료감응 태양전지에서 좋은 효율을 얻기 어려웠다.

최근, 호주의 모나쉬 대학(Monash University) 재료공학과와 U. Bach와 P. Bauerle 연구팀은 광·음극에서의 광자(photon)에서 전자(electron)로의 변환 효율을 96%까지 증대시켜, 이전의 광·음극 염료감응 태양전지 연구들에 비하여 7배나 높은 효율을 보이는 염료 감응형 태양전지를 개발하였다(그림 1). 이 연구에서는 산화니켈(NiO)을 광·음극으로 사용하였으며 다양한 길이의 지닌 올리고사이오펜(oligothiophene)을 광·음극용 염료로 사용하여 빛에 의하여 발생한 전자에 의한 전하의 이동 및 분리를 조절하였다. 그 결과, 전해질에 의한 전자의 재결합 속도를 수십 배 크기만큼 줄일 수 있었고, 태양전지의 fill factor를 74%까지 증가시켰으므로, 이중구조 염료감응 태양전지의 효율 2.42%를 달성했다.

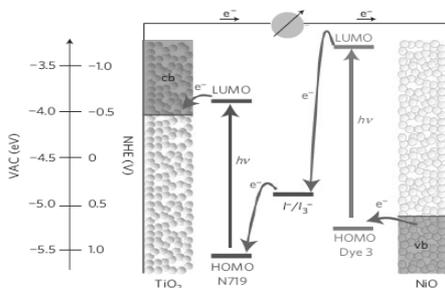


그림 1. 이중구조 염료감응 태양전지의 원리.

<Nature Mater., 31 ~ 35, 2010>

웨이퍼크기의 그래핀 페이퍼 제조 및 전사기술

그래핀은 우수한 기계적, 전기적 성질로 인해 근래에 들어 많은 주목을 받고 있다. 최근에는 화학증착법을 통하여 금속 촉매 층 위에 그

래핀을 합성하는 방법에 대한 연구가 이루어지고 있지만, 효율적인 에칭(etching) 공정과 전사(transfer) 방법의 부족으로 인해 그래핀 대량생산에 어려움이 있었다. 이에 성균관대학교 홍병희 교수 그룹에서는 니켈과 구리 필름 위에 대면적의 그래핀을 합성하고 금속 층을 에칭하며, 그래핀을 전사하는 연구에 대해 최근 발표하였다. 먼저 니켈이나 구리로 코팅된 SiO<sub>2</sub>/Si 기판을 노(furnace)안에서 1,000 °C까지 올린 후 CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar 또는 He 가스를 흘려준 뒤 상온으로 급속 냉각시키면 금속 촉매 층 위에 그래핀이 합성된다. 촉매에 따라 합성되는 그래핀의 구조의 조절이 가능한데, 니켈 촉매를 사용하였을 때는 3~8겹의 층이 형성되었고, 구리 촉매 위에서는 1~2겹의 그래핀 층이 형성되었다.

위 연구팀은 그래핀을 금속 촉매 층 위에서 합성한 후 금속 층을 에칭을 통해 제거하는 그래핀필름을 전사하는 방법도 개발하였다. 먼저 고분자 지지체를 금속 층 위에 있는 촉매에 부착시킨 다음 지지체/그래핀/금속 층을 물속에서 SiO<sub>2</sub>로부터 떼어낸 후, FeCl<sub>3</sub>로 금속 층을 제거하였다. 그리고 지지체가 부착된 그래핀을 PET 등에 기판(substrate)에 전사하였다. 이전에 웨이퍼(wafer) 사이즈의 에칭 공정은 수 일 이상의 시간이 필요했는데 반해서, 위 연구팀에서 개발한 방법은 불과 몇 분만에 금속 층을 완전히 제거할 수 있는 큰 장점이 있다.

연구팀은 위 방법을 통하여 제조된 대면적 그래핀을 투명전극, 트랜지스터, 변형 센서(strain sensor)등에 적용하였다. PET기판 위에 그래핀은 투과도 95%일 때 ~510 Ω/sq, 80%일 때 ~280 Ω/sq로 높은 투명도 대비 전기전도도를 나타내었다. 반면, 그래핀을 사용하여 트랜지스터를 제작한 경우에는 전자와 정공의 이동도가 낮은 값을 나타내었고, 위 연구팀은 이를 합성과 전사과정에서 발생한 그래핀의 결함 때문이라고 설명하였다. 그래핀으로 제작된 스트레인 센서는 금속 합금으로 제조한 경우보다 그 성능이 우수하였다.

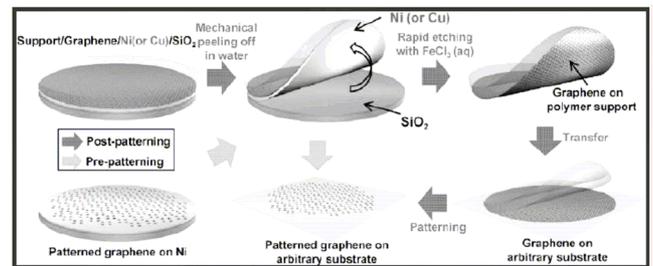


그림 2. 대면적 그래핀 필름 합성, 에칭, 전사 과정의 개략도.

<Nano Lett., DOI: 10.1021/nl903272n>

음향화학적 방법을 이용한 약물 전달용 고차 나노구조를 가지는 다공성 재료

2001년 MCM-41가 DDS로서의 우수한 물성을 가진다는 사실이 발표된 후, 이와 유사한 실리카 계통의 다공성 재료들은 그 우수한 약물 전달 물성 때문에 약물 전달체로 널리 연구되어 왔다. 일반적으로 약물의 전달/방출을 위한 다공성 재료들은 계면활성제를 이용하여 만들어지는데, 반응 후 남아있는 잔류 계면활성제들은 세포에 대해 독성을 가지거나 생체적합성을 방해하는 영향을 주로 미친다. 최근에는 이

러한 단점들을 극복하기 위해 고차형 나노구조를 지닌 다공성 구(hierarchically nanostructured mesoporous sphere, HNMS)의 구조를 가지는 칼슘 실리케이트 하이드레이트(CSH)에 대한 연구가 집중적으로 이루어졌다. 하지만, 기존의 합성법들(수열합성법, 졸겔 합성법)에 의해서는 이상적인 구조를 가지는 전달체를 만들기 어려웠으며, 잔류 계면활성제들이 문제가 되어 그 응용이 제한적이었다.

중국 Shanghai Institute of Ceramics의 Ying-Jie Zhu 연구팀은 기존에 알려진 합성법과는 다르게 음향화학적 방법을 이용하여 계면 활성제를 사용하지 않고도 손쉽게 잘 정리된 3차원 네트워크 구조를 가지는 DDS용 HNMS-CSH를 합성하는데 성공하였다. 실리콘 재공물질인 tetraethyl orthosilicate(TEOS)는 강한 초음파에 의해 칼슘이온과 반응하여 HNMS-CSH를 형성하며, ibuprofen (IBU)을 시험 약물로 사용하여 실험한 결과, 위 방법으로 합성된 HNMS-CSH가 좋은 생체활성을 보임을 확인하였다. 연구진들은 HNMS-CSH는 높은 비표면적과 다공성 및 상호 연결된 내부의 채널로 인해 약물의 전달 및 방출이 용이하다고 주장했고, 실제로 HNMS-CSH의 약물전달 특성을 알아보기 위해 서로 다른 IBU의 투약량을 가지는 HNMS-CSH를 이용하여 DDS로서의 성능을 조사하였다. 그 결과 약물 담지능력이 최고 229 wt%(HNMS-CSH 1g당 IBU 2.29g)로 기존에 보고된 MCM-41의 최고 약물 담지능력 (138 wt%)보다 66% 이상 높은 결과를 얻을 수 있었으며, 약물 담지 효율도 80% 이상으로 우수한 효율을 보였다. 또한, CSH는 약물 방출 후 모두 히드록시아파타이트로 변환될 수 있기 때문에 생체 적합성 및 생체반응성 면에서도 매우 우수함을 증명하였다.

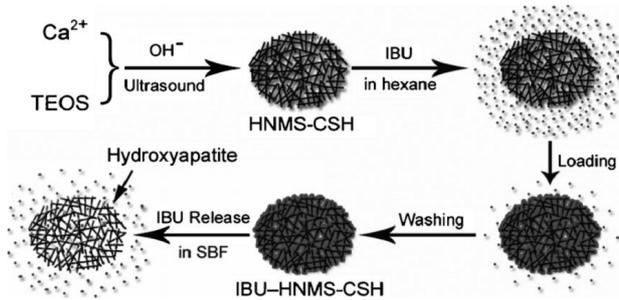


그림 3. HNMS-CSH의 약물전달 실험의 개념도.

<Adv. Mater., DOI: 10.1002/adma.200903020>

### 높은 결정성 박막 Donor 층을 이용한 고효율 유기 태양전지

태양 에너지의 효율적인 이용 가능성이 대두되면서, 저분자 혹은 공액계 고분자를 이용한 유기 태양전지가 주목 받고 있다. 최근 6% 넘는 에너지 변환 효율을 갖는 유기 태양전지가 보고되었지만, 아직도 무기 태양전지에 비해서는 많이 낮은 실정이다. 에너지 변환 효율을 좌우하는 주요 요인 중 하나가, exciton diffusion length가 광흡수 거리(optical absorption length)에 비하여 매우 짧다는 점인데, 이 문제점을 위해 소자의 구조적인 측면에서 bulk heterojunction 구조를 가진 유기 태양전지와 tandem cell 등의 구조에 대한 진보가 이루어져 왔다. 고분자 태양전지의 경우 열과 용매 등을 이용한 후처리를 통하여 보다 이상적인 bulk heterojunction을 이루게 함으로써, 전하의

이동도를 향상시킬 수 있었다. 저분자 태양전지의 경우는, 열을 가한 기관 위에 물질들을 함께 증착하는 기술을 통해 이상적인 bulk heterojunction 구조를 형성하고, 전하이동도를 증가시킬 수 있었지만, 열이 가해진 기관은 저분자로 구성된 광활성층 표면의 거칠기를 증가시키고 이로 인하여 높은 접촉 저항을 유발했다. 한편, 열처리하는 저분자 광활성층의 pinhole의 밀도를 증가시켜 소자의 생산수율을 저하시키는 문제점을 안고 있다.

최근 Chinese Academy of Sciences의 D. Yan 연구팀에서는 “weak epitaxy growth(WEG)” 기술을 이용하여, 단결정 유도층을 형성하고, 이를 통해, 고효율의 유기태양전지를 제조하는 연구를 발표하였다. 이 WEG 기술은 기존에 이미 유기트랜지스터의 제조에 사용되어, 우수한 결과를 보인 예가 보고되어 있고, 위의 연구팀은 기존의 구조에 2,5-bis(4-biphenyl)-bithiophene(BP2T)로 된 유도층(inducing layer)을 WEG 방법으로 도입함으로써, 광전변환효율 3.54%를 달성하였다. 연구팀은 높은 광전변환효율의 이유로, i) BP2T의 highest occupied molecular orbital (HOMO) 레벨이 5.3 eV 이고, ii) 버퍼층인 poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonic acid) (PEDOT/PSS)와 정공이동층인 zinc phthalocyanine (ZnPc) 사이에서 모두 Ohmic contact를 이루고 있으며, iii) BP2T 자체의 정공이동도가  $10^{-2} \text{ cm}^2 \text{Vs}^{-1}$ 로 매우 높기 때문에 소자의 series resistance 측면에서 이점이 있기 때문이라고 설명하였다. 또한, BP2T는 2.8 eV의 낮은 lowest unoccupied molecular orbital(LUMO) 레벨을 가짐으로써 전자 폐쇄층 역할도 할 수 있었다(그림 4). 이 연구는 효과적 박막 유도층의 제조기술을 통해, 유기태양전지의 효율을 증대시킬 수 있음을 보여주는 연구 결과이다.

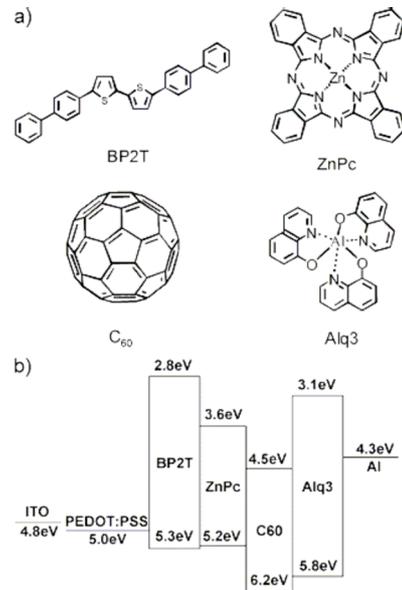


그림 4. (a) 유기 태양전지에 사용된 유기 물질들의 분자 구조. (b) Flat-band 조건에서의 energy level 도식도.

<Adv. Mater., DOI: 10.1002/adma.200903023>

### 용매이용-열처리 방법을 이용한 용액공정용 고성능 유기 트랜지스터

용매 증기를 이용한 후처리를 통한 유기 트랜지스터(OFET)의 성