

특집 ■ Quantum Dot

양자점 나노 입자 기반 발광형 태양광 집광기

송형준*

집광형 태양전지 (Concentrator photovoltaic)는 태양광을 작은 면적의 태양전지에 집광시켜 광 변환 효율을 극대화 하는 기술이다. 집광형 태양전지는 고가의 태양전지 면적을 줄이면서도 많은 양의 에너지를 확보 가능하여, 태양전지의 가격 경쟁력 확보 및 시장 확대가 가능한 기술로 주목받고 있다. 특히 다중접합 태양전지와 추적장치를 이용하는 경우 태양광을 300배 이상으로 집광이 가능하며, 2015년에만 300 MW 이상의 집광형 태양전지가 설치되었다 [1]. 하지만 렌즈를 이용한 집광형 태양전지의 경우 태양광과 렌즈의 각도에 따라 태양전지 효율이 급하게 변화하는 특성이 있어서, 효율 최적화를 위한 고가의 추적 장치가 필요하다. 또한 대면적의 렌즈 제작 과정에서 생산 가격의 상승이 유발되어 가격 경쟁력 확보에 어려움이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서 추적 장치가 없는 발광형 태양광 집광기 (Luminescent solar concentrator, LSC)가 제안되었다. LSC는 그림 1(a)과 같이 집광기 내부에 발광체가 (fluorophore) 태양광을 흡수하여 Photoluminescence (PL) 를 발광하고, 이를 Waveguide를 이용하여 LSC 한쪽 면에 붙어 있는 태양전지로 태양광을 집중하는 구조이다 [2]. 간단한 용액공정으로 발광체를 유리 혹은 고분자 막과 같이 Waveguide가 가능한 막에 결합이 가능하고, 추적장치 및 복잡한 광학구조가 필요 없어서 기존 집광형 태양전지 대비 가격 경쟁력 측면에서

장점이 있다. 현재 LSC는 도로 주변 방음벽이나 건물에 유리창에 적용하는 분야를 중심으로 그 응용 분야가 연구되고 있다 [3]. 열역학 법칙 기반으로 LSC를 이용해 얻을 수 있는 이론적 최대 집광도 (C_{max})는 아래와 같이 정의할 수 있다 [4].

$$C_{max} = \frac{e_2^3}{e_1^3} \exp[(e_1 - e_2)/KT]$$

(e_1, e_2 : 발광 및 흡수 파장에서의 Photon energy,
K: Boltzman 상수, T: 온도)

위에 식과 같이 LSC의 효율을 극대화하기 위해서는 흡수 파장과 발광 파장의 차이인 Stoke shift가 큰 발광체를 적용하는 것이 매우 중요하다. Stoke shift가 큰 경우 발광체에서 발생한 PL이 재흡수로 인한 손실 없이 태양전지까지 전달될 수 있다. 또한 발광체의 PL 양자효율이 높은 경우 비 발광 손실(Non-radiative decay) 없이 태양광이 PL로 변환 가능하다. 한편 광학적 측면에서는 발광된 PL이 태양전지에 손실 없이 전달되기 위해서 집광기 내부에서 Waveguide 효율을 높이는 것이 필요하다. LSC를 구성하는 물질의 굴절률이 높은 경우 공기와 집광기 계면에서 특정 각도 이상의 빛에서 전반사가 발생하여, 집적도 (Concentration)를 높일 수 있다.

* Chemistry Division, Los Alamos National Laboratory

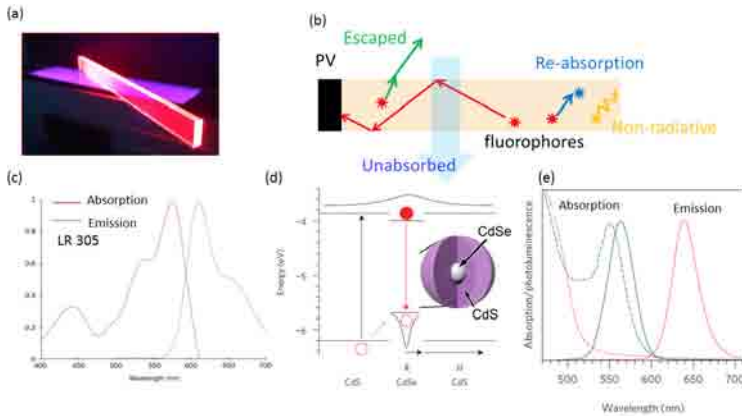
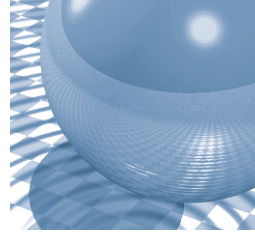


그림 1. (a) 양자점 기반 발광형 태양광 집중기[7], (b) 발광형 태양광 집중기 내부에서 광 손실 (c) LR 305의 흡수 및 발광 스펙트럼 (d) CdSe/CdS 양자점 입자의 에너지 다이어그램 및 (e) 흡수 발광 스펙트럼. Core만으로 구성된 청색 그래프 대비 core/shell 구조에서 stoke shift가 증가된 것이 뚜렷하게 나타남 [7].

이러한 특성들을 고려할 때 가장 많은 연구가 이루어진 물질은 유기물 기반 Lumogen Red (LR) 305이다. LR 305의 경우 PL 양자 효율이 높고 (~90%), 500 - 600 nm에서 빛 흡수가 높은 장점이 있다. 최근 MIT의 Swager와 Bawendi 그룹은 굴절률이 높은 Waveguide 구조체에 ($n=1.7$) LR 305를 적용하여 80 이상의 광 집적도를 얻은 결과가 보고하였다 [5]. 하지만 유기물의 경우 그림 1(c)와 같이 빛이 흡수되는 에너지 영역과 PL이 발광되는 영역사이에서 상당한 부분이 겹쳐져서 재흡수에 의한 효율 저하 문제점이 발생한다. 이러한 재흡수로 손실로 인해, 집광기 면적 대비 태양전지의 면적의 비가 (Geometric factor) 큰 경우 PL의 손실이 급증하는 문제점이 발생한다.

다양한 대체 발광체 물질 중에서 양자점 나노 입자 (Quantum dots Nanocrystal)는 강한 Exciton confinement 효과로 인해 PL의 반치폭이 (Full width half maximum) 수십 nm 이하로 발광체의 흡수파장과 발광파장의 중첩을 줄일 수 있는 특징이 있다. 또한 양자점 구조체의 크기 변환에 따라 흡수 및 발광 파장 제어가 가능해서, 특정 태양전지에 최적화된 맞춤형 구조 개발이 가능하다 [6]. 마지막으로 양자점의 경우 용액 공정 기반으로 소자 제작이 가능하고 고분자내에 분산이 용이함으로 LSC의 가격 경쟁력을 극대화 할 수 있는 기술로 주목받고 있다.

최초의 양자점 기반 LSC는 2014년 이탈리아 Milano-Bicocca 대학 S. Broveli 그룹과 미국 Los Alamos National Lab의 V. Klimov 그룹에 의해 제안되었다. [7] 이 연구에

서는 재흡수에 의한 효율 저하를 억제하기 위해 CdSe/CdS 기반 Core/shell 구조의 양자점 나노 입자를 발광체를 이용하였다. 흡수는 주로 두꺼운 CdS shell에서 이루어지는 반면, PL 발광은 (양자효율 ~60%) core(CdSe)에서 발광하여 stoke shift를 극대화 하였다 (그림 1 (d),(e)). 레이저를 이용한 분광학적 분석에 의하면 이 발광체가 결합된 PMMA (polymethylmethacrylate) 막에서 재흡수에 의한 손실이 없어 수십 cm 거리까지 발광된 PL이 전달되는 것이 관찰되었다. 이를 기반으로 투명

하면서도 광 집적 효율이 10%, 광 집적도가 4인 (Geometric factor = 40:1) 태양광 집광기를 구현하였다. 한편 미국 Washington 주립대의 Gamelin 그룹에서는 stoke shift를 극대화하기 위해서 ZnCdSe/ZnS 로 구성되어 있는 양자점 나노 입자에 소량의 Mn을 도핑한 나노 입자를 LSC에 적용하였다. [8]. 이 경우 소량의 Mn이 새로운 에너지 레벨을 형성하여 PL과 흡수의 에너지 차이를 증가시킨다. 더욱이 양자점의 농도를 높이는 경우에도 재흡수에 의한 손실이 거의 나타나지 않았다. 실험 결

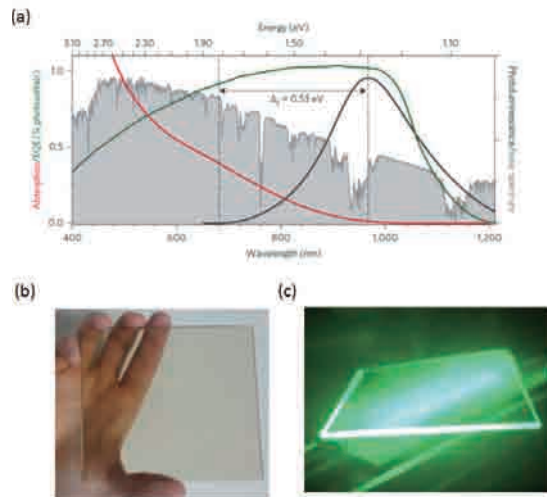


그림 2. (a) $CuInSe_xS_{2-x}$ 양자점 나노 입자의 흡수 및 PL 스펙트럼. $CuInSe_xS_{2-x}$ 양자점은 가시광선 대부분 영역을 흡수하고 실리콘 태양전지가 흡수 가능한 800-1200 nm 의 적외선을 발광함 (b) $CuInSe_xS_{2-x}$ 양자점 나노 입자로 만든 투명 LSC. (c) 적외선 카메라로 촬영한 $CuInSe_xS_{2-x}$ LSC [9].

양자점 나노 입자 기반 발광형 태양광 집광기

과를 기반으로 예측한 결과 Mn이 도핑된 양자점을 발광체로 12 cm×12 cm 크기의 LSC를 제작 할 경우 집적도를 8.6 이상까지 높일 수 있을 것으로 예상하였다.

위에서 소개된 Cd 기반 양자점 나노 입자의 경우 PL 효율이 높고 재흡수로 인한 손실을 줄일 수 있는 구조 구현의 장점들이 있지만, 물질 자체의 독성문제로 인한 환경적 문제가 존재한다. 또한 가시광 중 에너지가 높은 청색 혹은 녹색 영역의 태양광만 흡수하는 문제점이 있다. 가장 많이 사용되는 실리콘 기반 태양전지의 경우 1.1 eV의 에너지를 가지는 빛($\lambda \sim 1100$ nm)까지 전력으로 변환 할 수 있기에 가시광 전 영역을 흡수하여 근 적외선 영역의 PL을 발광하는 발광체를 LSC에 적용할 경우 더 많은 광 집적도를 얻을 수 있다. 이러한 관점들을 고려하여 새롭게 제안된 $\text{CuInSe}_x\text{S}_{2-x}/\text{ZnS}$ 를 이용한 LSC의 경우 가시광을 흡수해서 이를 적외선 파장의 PL로 발광하여 입사 태양광 이용을 극대화 하였다. [9] 이 양자점 나노 입자에서는 위에서 소개된 Mn이 도핑된 입자와 비슷하게 Cu로 인해 형성된 밴드갭 보다 작은 새로운 에너지 레벨에서 대부분의 PL이 발광되어 Stoke shift가 500 meV 이상인 특징이 있다. 특히 이 양자점이 발광하는 빛이 적외선 파장이어서 그림 2(b)에 나타난 것 같이 LSC가 특정한 색을 지니지 않고 투명한 특징을 가지고 있다. 또한 환경에 유해한 Cd를 포함하지 않기에, 향후 투명 LSC 같은 형태로 적용 가능할 것으로 예상된다.

하지만 아직 양자 효율(~40%)이 Cd 기반 양자점 대비 낮은 문제점이 있어서, 양자 효율 개선을 위한 다양한 연구가 필요하다.

한편 양자점 물질의 구성을 변경하는 재료적 측면에서의 접근뿐만 아니라, 발생된 PL들이 태양전지까지 손실 없이 전달되기 위해서 LSC에 Cavity 구조와 선택적 반사가 가능한 Bragg reflector를 이용한 방법도 제안되었다 [10]. 캘리포니아 주립대학의 Alivisatos 그룹의 최근 연구에 따르면, 양자점으로 구성된 LSC를 높은 반사도를 나타내는 Teflon (반사도: ~90%)으로 구성된 cavity 구조 안에 넣은 경우 태양전지 이외의 부분으로 나가는 photon 들을 막아 광집적도 상승을 얻을 수 있다. 그리고 전면에는 그림 3(b)와 같이 양자점 입자가 흡수 가능한 청/녹색 파장에서는 투과도가 높고 PL 파장에서는 반사도가 높은 선택적 반사막을 (selective reflector) 이용하면, 광 손실 없이 많은 양의 Photon을 태양전지로 집적시킬 수 있다. 이러한 구조체에 양자효율이 60% 인 CdSe/CdS 로 구성된 Core/shell 구조 양자점 물질을 결합한 경우 집광도 30을 달성하였다. 이는 현재 양자점 기반 LSC에서 보고된 최고의 효율이다. 이 연구에서는 전면 선택적 반사막으로 Bragg reflector를 사용하였으나, cholesteric 액정으로 형성된 반사막 또한 이와 유사한 성능을 나타내는 것으로 보고되었다[11]. 하지만 두 반사막 모두 입사각의 각도에 따라 투과 및 반사 스펙트럼이 변화하는 문제점이 있기에 차후 다른 형태의 반사막의 제안이 필요하다.

앞에서 소개된 바와 같이 양자점 나노 입자는 stoke shift가 커서 발광형 태양광 집광기에 적용할 경우 재흡수로 인한 효율 저하를 막을 수 있는 장점이 있다. 또한 다양한 친환경 물질들을 이용하여 가시광선 전체 영역을 흡수하고 적외선 영역에서 PL 발광이 가능하기에 고효율 투명 LSC 제작이 가능할 것으로 예상된다. 현재 까지 보고된 최고 집적도는 광학 구조물을 이용한 CdSe/CdS 양자점 나노입자가 결합된 소자에서 30으로 기록하였다.

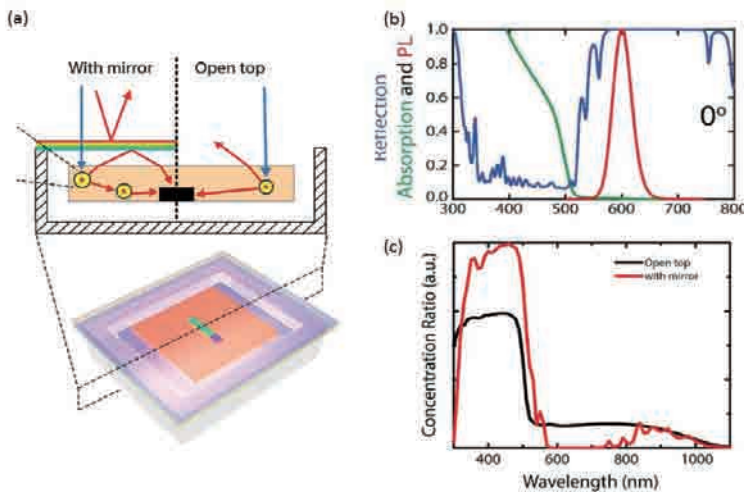
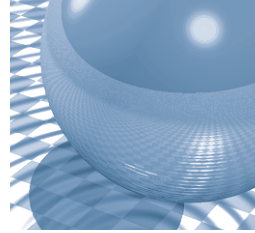


그림 3. (a) Cavity 와 Bragg reflector 가 결합된 양자점 나노 입자 기반 LSC 개념도 (b) Bragg reflector 의 투과/반사 및 양자점 나노 입자의 흡수 및 발광 스펙트럼 (c) 파장에 따른 양자점 기반 LSC의 광 집적도, Bragg reflector 가 들어간 경우 300~500 nm 파장에서 집적도의 상승이 나타남 [10].



향후 친환경 물질로 구성된 고효율 양자점 나노 입자들을 발광된 PL들이 LSC 내부에서 포집될 수 있는 광학 구조 내에 만든다면, 고효율/저가격 발광형 태양광 집광기의 실현 및 이를 기반으로 에너지 생산이 가능한 유리창 혹은 건물 외벽의 구현이 가능해질 것으로 예상된다.

참고문헌

[1] Current status of concentrator photovoltaic (CPV) Technology, Fraunhofer ISE and NREL (2016)
 [2] W. H. Weber, J. Lambe, Appl. Optics 15, 2299 (1976)
 [3] Y. Zhao, R. Lunt, Adv. Energy Mat. 3, 1143 (2012)
 [4] E. Yablonovitch, J. Opt. Soc. Am. 70, 1362 (1980)
 [5] G. D. Guitierrez, I. Coropceanu, M. G. Bawendi, T. M. Swager, Adv. Mater. 28, 497 (2016)
 [6] Q. Lin, N. S. Makarov, W.-K. Koh, K. Velizhanin, C. M. Cirloganu, H. Luo, V. I. Klimov, J. M. Pietryga, ACS Nano 9, 539 (2015)
 [7] F. Meinardi, A. Colombo, K. A. Velizhanin, R. Simonutti, M. Lorenzon, L. Beverina, R. Viswanatha, V. I. Klimov, S. Brovelli, Nature Photon. 8, 392 (2014)
 [8] L. R. Bradshaw, K. E. Knowles, S. McDowall, D. R. Gamelin, Nano Lett. 15, 1315 (2015)

[9] F. Meinardi, H. McDaniel, F. Carulli, A. Colombo, K. A. Velizhanin, N. S. Makarov, R. Simonutti, V. I. Klimov, S. Brovelli, Nature Nanotechnol. 10, 878 (2015)
 [10] N. D. Bronstein, Y. Yao, L. Xu, E. O'Brien, A. S. Powers, V. E. Ferry, A. P. Alivisatos, R. G. Nuzzo, ACS Photonics 2, 1576 (2015)
 [11] M. G. Debije, M.-P. Van, P. P. C. Verbunt, M. J. Kastelijn, R. H. L. van der Blom, D. J. Broer, C. W. M. Bastiaansen, Appl. Opt. 49, 745 (2010)

약력

송형준



송형준 박사는 2015년 서울대학교에서 전기·컴퓨터 공학부에서 박사학위를 취득하였고, 현재 미국 Los Alamos National Lab에서 박사후 연구원 과정으로 양자점 나노 입자 기반 소자 및 응용 분야에 관한 연구를 진행하고 있다.

E.mail : hyung-jun@lanl.gov