

# 발광형 태양광 집광기 최신 연구 동향

송형준<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 안전공학과, 조교수

## Recent Progress and Prospect of Luminescent Solar Concentrator

Song Hyung-Jun<sup>†</sup>

Department of Safety Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Assistant Professor

<sup>†</sup>Corresponding author: [hj.song@seoultech.ac.kr](mailto:hj.song@seoultech.ac.kr)

### Abstract

Luminescent solar concentrator (LSC), consisting of luminophore included glass or substrate with edge-mounted photovoltaic cell, is semi-transparent, energy harvesting devices. The luminophore absorbs incident solar light and re-emit photons, while the waveguide plate allows re-emitted photons to reach edge or bottom mounted photovoltaic cells with reduced losses. If the area of LSC is much larger than that of photovoltaic cell, this system can effectively concentrate solar light. In order to improve the performance of LSC, new materials and optical structures have been suggested by many research groups. For decreasing re-absorption losses, it is essential to minimize the overlap between absorption and photoluminescence solar spectrum of luminophore. Moreover, the combination of selective top reflector and reflective optical cavity structure significantly boosts the waveguide efficiency in the LSC. As a result of many efforts, commercially available LSCs have been demonstrated and verified in the outdoor. Also, it is expected to generate electricity in buildings by replacing conventional glass to LSCs.

**Keywords:** 발광형 태양광 집광기(Luminescent solar concentrator), 태양전지(Photovoltaic cell), 건물일체형 태양광(Building integrated photovoltaic), 발광체(Luminophore), 도파관(Waveguide)

### 1. 서론

태양전지 및 모듈을 이용한 전기 생산이 전 세계적으로 빠른 속도로 증가하고 있다. 2018년 기준으로 태양광 발전 시스템의 누적 설치량이 500 GW를 능가하였고, 매년 100 GW 이상 설치 용량이 증가하고 있다<sup>1)</sup>. 태양광 발전 시스템은 현재 대규모 발전 단지를 기반으로 설치 용량이 급증하고 있으며, 도심에서는 건물의 에너지 효율 상승 및 송배전 거리 최소화를 위한 건물 일체형 태양광 발전 시스템(Building integrated photovoltaic)에 대한 수요가 급증하고 있다. 건물일체형 태양광 발전 시스템은 건물과 어울리는 색상을 가진 태양광 모듈을 건물의 벽면이나 옥상에 배치하여 태양광을 전기로 변환시키는 방

 OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society  
Vol.39, No.4, pp.25-39, August 2019  
<https://doi.org/10.7836/kses.2019.39.4.025>

pISSN: 1598-6411

eISSN: 2508-3562

Received: 09 July 2019

Revised: 12 July 2019

Accepted: 13 July 2019

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

법이다. 태양광 모듈은 빛을 흡수해서 전기로 변환시키기에 색상이 불투명한 단점이 있어, 투명한 유리창 부분을 대체할 수 있는 태양광 시스템에 대한 필요성이 대두되고 있다. 여러 가지 제안된 방법 중 하나는 반투명 태양전지를 이용하는 방식이다. 태양전지에 들어가는 광 흡수층을 얇게 형성하고, 투명한 전극들을 이용하면 반투명 태양광 시스템 구현이 가능하다<sup>2,3)</sup>. 하지만 이 방식의 경우 주로 사용되는 박막 태양광 모듈의 수명 문제로 건물에서 요구하는 유리창 규격에 맞지 않는 단점들이 지적되고 있다. 또한 가격이 비싸서 시장 확대에 한계가 지적되고 있다. 이를 극복하기 위해 공정이 단순하고, 가격 경쟁력 확보가 가능한 창문형 태양광 발전 시스템에 대한 방법들이 제시되고 있다. 그 중 한 방법이 발광형 태양광 집광기(Luminescent solar concentrator)이다. 발광형 태양광 집광기는 용액 공정으로 일반 유리창에 제작이 가능하고, 태양광 시장의 90% 이상을 차지하는 실리콘 태양전지와 결합이 용이하기에 향후 건물의 창문을 이용한 태양광 발전에 널리 사용될 것으로 예상된다. 또한 수명 측면에서도 이미 검증된 발광체(Luminophore)들과 결정질 실리콘 태양전지를 사용하기에 장시간 운영에도 큰 문제 없이 사용할 수 있다. 본 논문에서는 발광형 태양광 집광기의 현재까지의 연구 동향과 상업화를 방안에 대해 논의하고자 한다.

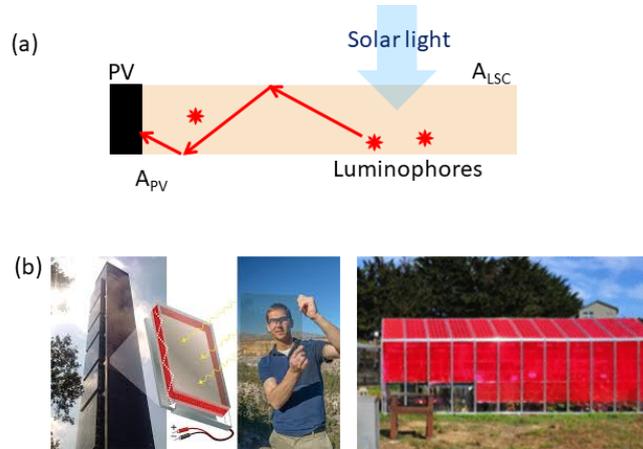
## 2. 발광형 태양광 집광기

발광형 태양광 집광기는 Fig. 1과 같이 가시광선 혹은 적외선을 발광할 수 있는 발광체를 유리창 혹은 플라스틱 막에 배열하고, 입사하는 태양광을 발광체가 흡수하여 낮은 에너지의 빛으로 재발광(Photoluminescence, PL) 한다. 이때 발광체로 발광된 빛은 공기와 유리 혹은 플라스틱 기판의 굴절률 차이로 인해 발광된 빛이 전반사하여 기판을 따라서 도파(Waveguide) 하게 된다. 도파관을 따라 이동하는 빛은 기판 바닥 혹은 옆면에 붙어 있는 태양전지로 집광되어 전기로 변환할 수 있다. 이때 발광형 태양광 집광기의 면적( $A_{LSC}$ )이 태양전지 면적( $A_{PV}$ )대비 매우 큰 경우 같은 면적의 태양전지가 설치된 경우 대비 더 높은 전기 생산이 가능한 장점이 있다. 이때 얻을 수 있는 최대 집광도( $C_{Max}$ )는 다음과 같이 정의 가능하다.

$$C_{Max} = \frac{A_{LSC}}{A_{PV}} \times \eta_{WG} \quad (1)$$

( $\eta_{WG}$ : 발광형 태양광 집광기의 도파관 효율)

예를 들어, 태양전지 보다 100배 큰 면적의 발광형 집광기를 적용하고, 도파관 효율이 25%인 경우 단위면적에 태양전지 대비 25배의 전력 생산이 가능하다.



**Fig. 1** (a) Schematic diagram of Luminescent solar concentrator. Here ALSC is the area of luminescent solar concentrator, while  $A_{PV}$  is the area covered by photovoltaic cell. (b) Examples of luminescent solar concentrator installed in skyscraper<sup>4)</sup> and greenhouse<sup>5)</sup> Reproduced with permission [4,5]. Copyright 2018 American Chemical Society and 2016 AIP publishing LLC, respectively

발광형 태양광 집광기는 입사되는 태양광의 일부를 흡수하여 재 발광한 빛을 전기로 변환하고, 흡수되지 않은 나머지의 빛은 투과될 수 있기에 유리창으로 응용이 가능하다. 특히 가시광선에 대한 투과도를 높이면, 투명한 유리창에서도 전기를 생산할 수 있다. 또한 복잡한 광학기기가 필요 없기에, 저 가격으로 설치가 가능하다. Fig. 1에 제시된 것처럼 고층 건물의 유리창 혹은 농업용 온실(Greenhouse) 등에 적용 가능할 것으로 예상된다<sup>4,5)</sup>.

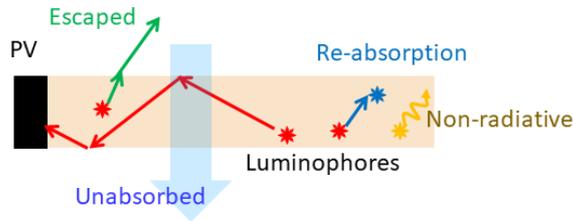
### 3. 발광형 태양광 집광기 이론적 집광도 및 손실 분석

발광형 태양광 집광기의 효율개선 및 한계에 대한 여러 가지 이론적 연구들이 이제까지 진행되었다. 최초로 제안된 결과는 열역학 법칙을 기반으로 발광형 태양광 집광기의 이론적 최대 집광도를 아래와 같이 정의하였다<sup>6)</sup>.

$$C_{\max} = \frac{e_2^3}{e_1^3} \exp[(e_1 - e_2)/KT] \times A_{LSC}/A_{PV} \quad (2)$$

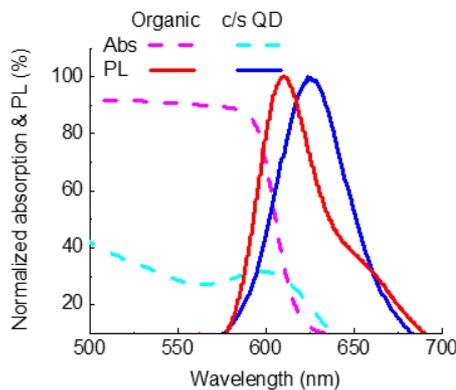
( $e_1$ ,  $e_2$ : 발광 및 흡수 파장에서의 광자 에너지, K: Boltzmann 상수, T: 온도)

제안된 식(2)에 의하면 발광체의 흡수와 발광의 스펙트럼 차이가 적고, 집광기의 면적이 태양전지 대비 큰 경우 매우 높은 집광도 달성이 가능하다. 하지만 현재까지 보고된 발광형 집광기의 효율은 50% 이하로 이론적 한계치 대비 매우 낮은 수준이다. 그 이유는 Fig. 2와 같은 발광형 태양광 집광기의 광학적 손실 때문이다.



**Fig. 2** Schematic diagram of loss mechanism in luminescent solar concentrator

발광체는 발광체의 밴드 갭보다 에너지가 높은 빛(단파장)만 흡수할 수 있기에, 다수의 빛이 발광체에 의해 흡수되지 않고 투과하게 된다(Unabsorbed). 또한 발광체의 농도가 너무 낮은 경우 밴드 갭보다 큰 에너지의 빛들도 흡수 되지 못하는 경우들이 발생한다. 두 번째로는 발광체에 의해 흡수된 태양광이 발광체의 PL 효율이 100%가 되지 않기 때문에, 흡수된 모든 광자가 재 발광 하지 못 한다(Non-radiative loss). 그리고 발광체에서 빛을 흡수하여 성공적으로 발광하였다고 하여도, 기판 가장자리에 붙어 있는 태양전지까지 전달과정 중 손실이 발생한다. Fig. 3은 발광형 태양광 집광기에 많이 사용되는 core/shell 구조의 양자점 발광체와 유기물의 흡수 및 발광 스펙트럼이다. 발광체의 흡수와 발광 스펙트럼의 중첩으로 인해 발광된 빛의 일부가 발광체에 다시 흡수 되는 재흡수(re-absorption) 손실이 발생한다. 발광체에 PL 효율이 100%에 가까운 경우 발광체에 의해 재 흡수된 광자(photon)는 다시 발광할 수 있지만, 발광형 태양광 모듈에 사용되는 대부분의 염료는 PL 효율이 100%가 아니기에 재흡수에 의한 손실이 발생한다. 또한 발광된 빛이 태양전지까지 이동하는 과정에서 공기로 다시 나가는 경우가 발생한다. 많이 사용되는 기판인 유리의 경우 굴절률(refractive index)이 약 1.5이다. 유리 와 공기의 계면에서는 유리로부터 나오는 빛의 각도가  $42^\circ (= \arcsin 1.5/1)$  보다 작은 경우 전반사(total internal reflection)가 일어나지 않고 공기층으로 탈출하게 된다. 대면적의 집광기로 갈수록 도파관을 따라 이동 중 광학적 손실이 많이 발생하고, 작은 면적에서는 발광체의 특성에 따라 효율이 결정되는 경향이 있다.



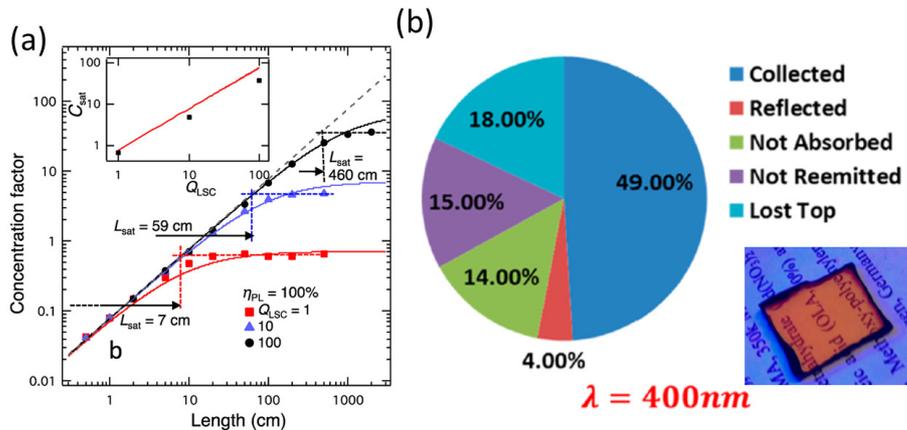
**Fig. 3** Normalized absorption and photoluminescence spectrum of organic dye (LR 305) and core/shell quantum dot (InP/ZnS). The overlap between absorption and photoluminescence of dyes leads to the re-absorption losses during waveguide in luminescent solar concentrator

집광기 내부에서 발생하는 손실들을 고려하여 현재까지 알려진 발광형 태양광 집광기의 이론적 집광도(C)는 아래 수식과 같이 정의 할 수 있다<sup>7)</sup>.

$$C = \frac{(1 - e^{-\alpha_1 d}) \eta_{PL} \eta_{WG}}{1 + \beta \alpha_2 L (1 - \eta_{PL} \eta_{WG})} \frac{A_{LSC}}{A_{PV}} \quad (3)$$

( $\alpha_1, \alpha_2$ : 흡수 및 PL 스펙트럼에서 발광체의 흡광계수,  $\beta$ : 집광기 구조에 따른 상수,  $\eta_{PL}, \eta_{WG}$ : 발광체의 PL 및 집광기의 도파관 효율, d: 발광형 태양광 집광기의 두께)

식(3)에 나타난 것처럼 흡수와 PL 스펙트럼 사이에 중첩이 최소화된 PL 효율이 높은 발광체를 적용하고, 도파관을 따라 이동 도중 손실 없이 빛이 잘 태양전지로 전달하게 설계하면 고효율 발광형 태양광 집광기를 구현할 수 있다. 하지만 현실적으로 이러한 발광체와 도파관 구조를 구현하는 것이 불가능하기에, 현재 구현된 발광형 태양광 집광기는 태양전지 면적 대비 집광기의 비(Geometric gain)를 아무리 늘려도, 결국에는 Fig. 4a처럼 특정 값 이상을 구현하는 것이 불가능하다. 흡수와 PL 스펙트럼의 겹치는 부분이 아주 작은 양자점 기반 발광체를 이용한 작은 크기( $20 \times 20 \times 2 \text{ mm}^3$ )의 태양광 집광기에서 손실을 분석한 결과 입사되는 빛의 50%는 손실된다는 것을 실험적으로 보여주었다<sup>8)</sup>.



**Fig. 4** (a) Concentration factor-geometric gain characteristics of core/shell type quantum dot based luminescent solar concentrator<sup>7)</sup>. (b) Analysis of loss in quantum dot based luminescent solar concentrator under 400 nm light. Here the geometric gain of luminescent solar concentrator is approximately (3) Only 50% of incident photons are collected in the edge mounted PV cell<sup>8)</sup>. Reprinted with permission from [7,8]. Copyright 2014, 2016 American Chemical Society

#### 4. 발광체 재료 연구 동향

3장에서 제안한 것과 같이 고효율 발광형 태양광 집광기를 구현하기 위해서는 발광체는 PL 효율이 높고, 흡수와 발광 파장 사이의 중첩이 적을수록 유리하다. 또한 유리 기판에 박막을 형성하기 위해서 용액 공정이 가능

하거나 고분자와 잘 섞일 수 있는 분말 재료들이 공정 측면에서 유리하다. 이런 특성들을 고려하여 현재까지 제안된 발광체 재료로는 Table 1에 제시된 것처럼 core/shell 구조의 양자점(Quantum dot), 유기물(organic) 등이다. 먼저 core/shell 구조의 양자점의 경우 밴드 갭이 큰 shell 영역에서 입사광을 흡수하고 내부 에너지 전달을 통해 core에서 발광하는 시스템이다. 이 경우 shell 물질과 core 물질의 밴드갭이 다르기 때문에, 흡수와 PL 발광의 중첩을 줄일 수 있는 장점이 있다. Cd 기반의 core/shell 구조 양자점의 경우 PL 효율이 매우 높은 장점이 있기에, 가장 많은 연구가 진행되고 있다<sup>8,9</sup>. 집광기의 크기가 커짐에 따라 도파관을 따라서 이동 과정에서 손실이 증가함에도 불구하고, 집광도(concentration)가 4 정도로 수렴하는 결과를 얻을 수 있었다<sup>8,10-12</sup>.

하지만 Cd 계열의 양자점의 경우 독성과 환경에 미치는 영향이 매우 커서 비 카드뮴 계열 양자점을 이용한 발광형 태양광 집광기에 대한 연구도 꾸준히 이루어지고 있다. 구리(Cu), 인듐(In), 아연(Zn), 셀레늄(Se) 등의 화합물로 구성된 나노 입자의 경우 흡수와 발광 사이의 에너지 밴드 갭 차이가 커서 재흡수에 의한 손실을 효과적으로 줄일 수 있다. 또한 core 의 밴드 갭이 작아서 발광체의 흡수 파장이 가시광선 전 영역으로 확대되어, 특정색상이 나타나지 않는(color-less) 발광형 태양광 집광기도 가능하다<sup>13</sup>. 그리고 물질 구성 성분비를 조정하여 밴드 갭 조절도 용이한 장점도 있다<sup>14,15</sup>. 하지만 재발광 과정에서 PL 효율이 기존 Cd 대비 좋지 않은 단점이 지속적으로 지적되어 왔다. 최근 나노 입자의 PL 효율을 개선하는 방식들이 제안되고 있어, 이를 기반으로 비 카드뮴계 물질을 이용한 연구가 활발하게 이루어지고 있다<sup>4,13-15</sup>. 미국 Ubiqd 사에서는 CuInS<sub>2</sub>를 이용한 양자점의 PL 효율을 90% 이상으로 개선하였고, 이를 기반으로 100 cm<sup>2</sup> 이상 되는 집광기에 대해서 제시하였다. Ubiqd사의 예상에 의하면 고층 건물에 유리창으로 적용 시(건물 외벽의 20%가 설치된 상황) 뉴욕의 고층건물 기준으로 매년 250 MWh의 전기 생산이 가능하다고 제안하였다<sup>4</sup>.

**Table 1** Reported efficiency of luminescent solar concentrator

Luminophore	Size (cm <sup>2</sup> )	Optical efficiency (%)	Concentration	Ref
Cd based quantum dots	2.0 × 2.0	49%	1.2	8
	10.2 × 10.2	31%	3.1	10
	21.5 × 1.3	10.2%	4.4	11
	1.5 × 7.0	15%	3.4	12
Chalcogenide (CuInS <sub>2</sub> ) quantum dots	12.0 × 12.0	16.5%	1.7	13
	15.2 × 15.2	18.2%	4.3	4
	10.0 × 10.0	8.1%	5.8	14
Earth abundant (Perovskite, Si and carbon) quantum dot	1.3 × 9.0	5%	2.3	15
	12.0 × 12.0	30%	3.6	16
	1.5 × 9.0	2.6%	1.2	17
Organic dyes	1.2 × 1.2	78%	2.3	19
	5.0 × 5.0	23%	2.3	20
	5.0 × 5.0	14.4%	1.4	21
	2.5 × 5.0*	6%	0.6	22

\*Data from transparent luminescent solar concentrator (Transmittance of visible light is over 80%)

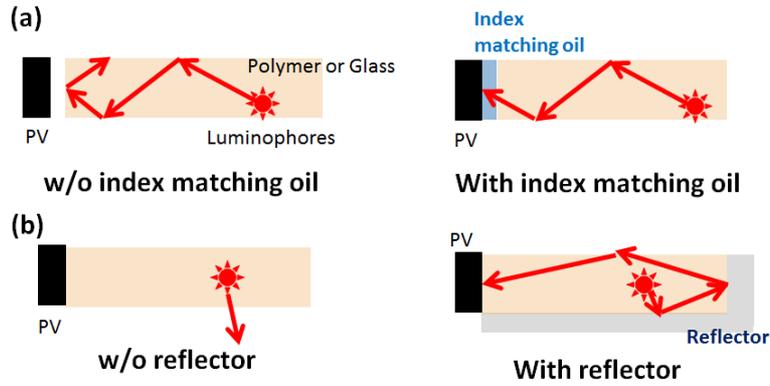
한편 지구상에 많이 있는 원소들이 유기물 및 복합체 기반 발광체에 대한 연구들도 지속적으로 진행되고 있다. 지구상에 많이 있는 원소인 실리콘(Si), 탄소(Carbon, C) 등과 같이 다양한 물질들을 이용한 양자점을 합성하고, 이를 발광형 태양광 집광기에 적용하였다<sup>15-17</sup>. 입자 크기에 따라 발광체의 밴드 갭 조절이 가능하므로, Perovskite 기반으로 한 양자점도 발광형 태양광 집광기에서 연구가 이루어지고 있다<sup>15</sup>. 이 물질들의 경우 일장에서 쉽게 구할 수 있는 재료들을 사용하기에, 가격측면에서 유리하고, 공해 물질도 적게 나오는 장점들이 있다. 특히 Si 양자점의 경우 합성이 쉽고, 기존의 산업에서 많이 사용되는 재료를 그대로 사용하기에 집광기의 발광체로 적용 시 장점이 있을 것으로 예상된다<sup>18</sup>. 향후 이러한 물질들의 열 및 자외선에 대한 안정성이 증가될 경우, 집광기의 발광체로 사용할 가능성이 매우 높다고 예상된다<sup>17</sup>.

마지막으로 가장 먼저 발광체로 제안되었고, 대면적화를 통해 시제품 까지 적용한 유기 계열 염료이다<sup>5,19-22</sup>. 유기 염료의 chain 혹은 functional group을 변화시킴에 따라 에너지 밴드갭 조절이 용이하고, 다양한 합성법으로 재료를 만들 수 있는 장점이 있다. 그리고 용매를 이용하여 쉽게 용액 공정에 적용할 수 있는 장점도 있다. 이로 인해 1970년대부터 유기물을 이용하여 태양광을 집광하는 연구들이 제안되었다<sup>23</sup>. 현재는 유기물 발광체를 적용한 대면적 발광형 태양광 집광기를 건물 혹은 비닐하우스 같은 곳에 설치하여, 그 가능성을 평가하고 있는 단계이다<sup>5</sup>. 주로 사용되는 Dye는 Perylene, Coumarine, Lumogen 계열 같이 흡수와 발광 스펙트럼의 중첩이 적은 재료들을 중심으로 발광형 집광기가 제안되고 있다<sup>19-25</sup>. 특히 유기물의 구성을 적절하게 개선하고 흡수하는 염료와 발광하는 염료 사이에 에너지 전달이 가능한 물질을 적용할 경우 투명한 발광형 태양광 집광기(가시광선 투과율 80% 이상)도 구현이 가능해 유리창 적용의 가능성이 매우 높다<sup>22</sup>. 더욱이 유기물의 경우 안정성 측면에서 고온이나 자외선에 강한 특성을 보여 향후 시장에서 많이 사용될 수 있을 것으로 예측된다<sup>26</sup>. 최근에는 고효율 태양광 집광기를 구현하기 위해 유기물의 쌍극자(dipole)를 특정 방향으로 배향 시켜서, 발광되는 빛이 집광기 외부로 나가는 광학적 손실을 최소화하는데 집중하고 있다<sup>19,24</sup>. 향후 발광체에 대한 지속적인 연구를 통해 공정성과 안정성이 뛰어나면서도, 효율과 흡수 발광 스펙트럼 개선을 통해 재흡수 손실이 적은 물질을 개발하는 것이 태양광 집광기 경제성 확보에 필수적인 것으로 예상된다.

## 5. 광학구조 개선을 통한 발광형 집광기 효율 개선

한편 발광된 빛이 태양전지 까지 손실 없게 전달되게 위해서 여러 가지 광학 구조들을 도입하여 효율을 개선하는 것도 필요하다. 먼저 집광기 한쪽 면에 부착된 태양전지와 집광기 사이의 집광된 빛을 원활하게 전달하기 위해 index matching oil을 적용하고 있다. 발광형 태양광 집광기는 발광체가 있는 굴절율이 높은 고분자 혹은 유리기판과 공기 계면에서 특정 각도 이상의 빛이 반사되는 전반사 현상을 이용해서 빛을 모으고 있다. 이러한 현상은 태양전지와 집광기 사이에 공기층이 있는 경우에도 원하지 않는 전반사 현상이 발생하게 된다. 이 경우 도파관을 통해 태양전지와 맞닿아 있는 계면까지 도달하여도, 다수의 빛이 태양전지로 들어가지 못하고 다시 집광기 내부로 돌아가는 전반사로 인해 집광기의 효율이 떨어지는 문제점이 대두되고 있다. 따라서, 집광기와

집광기 가장자리에 부착된 태양전지 사이에 기판과 굴절율이 동일한( $n=1.5$ ) index matching oil을 적용한다. Fig. 5에 나타난 것처럼, silicone grease나 광통신에 사용되는 index matching epoxy를 적용한 경우 태양전지와 집광기 계면에 적용한 경우 태양광에 집광되는 빛이 약 2배 이상 증가된다<sup>27,28</sup>).



**Fig. 5** The effect of (a) index matching oil and (b) reflector on the efficiency of luminiscant solar concentrator. The index matching oil allows more photons to reach edge mounted PV cell by reducing total internal reflection at the interface between glass and PV. On the other hand, reflectors recycle escaping photons

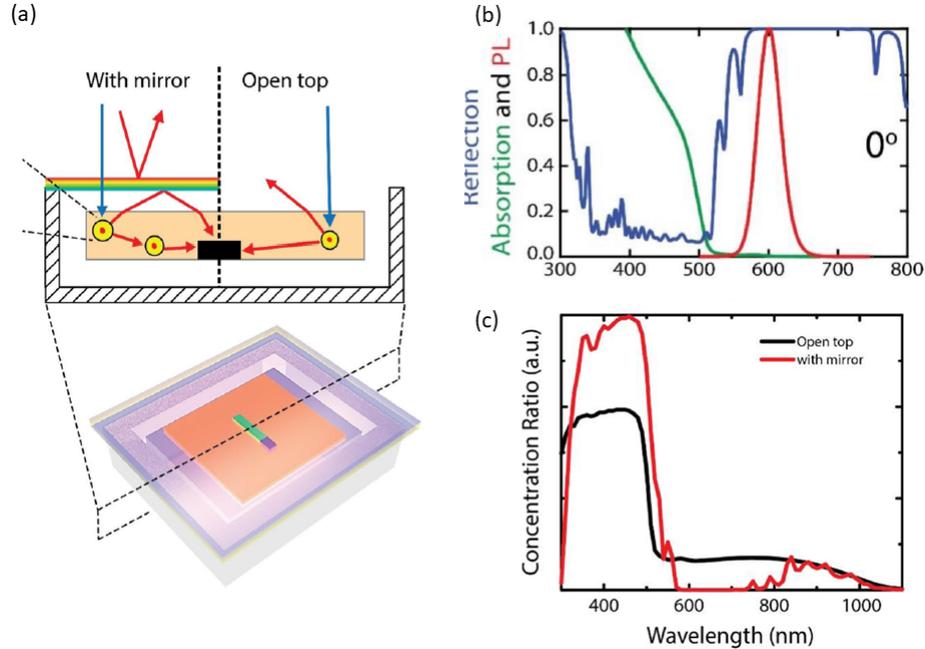
한편 태양전지가 부착되지 않은 면으로 도파관을 따라 이동 중 일어나는 손실은 발광체가 들어가 있는 고분자 층의 굴절률 개선 및 반사막을 통해 줄일 수 있다. 집광기를 구성하는 고분자 혹은 유리의 굴절률이 증가하는 경우 유리-공기 계면에서 전반사가 일어날 수 있는 각도가 늘어난다. 일반적으로 전반사가 일어나는 Brewster angle 은 집광기를 구성하는 물질의 굴절률을  $n$  이라고 할 때  $\arcsin(1/n)$ 의 값으로 정의된다. 집광기를 구성하는 기판의 굴절률이 1.5에서 1.7로 증가할 경우 전반사가 일어나는 임계각은 42도에서 36도로 감소한다. 이 경우 공기-집광기 계면에서 전반사가 일어날 확률은  $79\% (=1 - (42/90)^2)$ 에서  $85\% (=1 - (36/90)^2)$ 로 증가된다. 실제로 굴절률이 1.7인 물질로 집광기를 구성한 경우 많이 사용되는 Poly(methyl methacrylate) (PMMA, 굴절률 1.5) 기반 집광기 보다 12% 많은 빛이 태양전지로 전달되었다<sup>29</sup>). 또한 굴절률 증가를 통해 집광기의 효율을 26% 이상 개선하는 연구들도 제시되었다<sup>30</sup>). 하지만 이런 고 굴절률 기판의 경우 아직 수요가 적어서 그 가격이 PMMA 나 유리 대비 많이 비싸고, 빛이 집광기로 입사하는 계면에서 표면 반사를 증가시키는 단점이 있어 널리 사용되지 않고는 있다. 하지만 고층 건물의 유리창에 사용할 만큼 집광기의 면적이 커질 경우, 집광 효율 개선 효과가 일반 유리 대비 훨씬 높을 수 있기에 지속적인 연구들이 진행되고 있다.

제시된 다른 방법은 반사도가 매우 높고, 투과도가 낮은 금속 혹은 반사막을 발광형 태양광 집광기에 적용하여 태양전지에 더 많은 빛을 모으는 방법이다<sup>31</sup>). 반사막이 적용된 경우 Fig. 5와 같이 전반사 각도보다 작은 각으로 계면으로 입사되어 외부로 나가는 빛이 다시 집광기 내부로 들어오게 되고, 이로 인해 더 많은 빛들이 태양전지로 전달될 수 있다. 태양광이 입사하는 전면을 제외하고, 나머지 면에 반사필름(반사도 97% 이상)을 적용한

경우 광 이용효율 향상으로 인해 집광도가 약 1.2배 이상 개선이 가능하다는 결과들이 제시되었다<sup>31)</sup>. 또한 집광기 계면에서 조금 떨어져서 공기층을 두고 반사판을 설치할 경우, 집광기 외부의 빛들도 반사판을 통해 집광기 내부로 다시 들어 올수 있어서 집광기의 효율을 54% 이상 개선할 수 있었다<sup>32)</sup>. 따라서 유리창을 이용해 발광형 태양광 집광기를 설치할 경우 실내에 반사판을 적용으로 집광 효율을 크게 향상시킬 수 있다는 것을 암시해 준다. 한편 반사막의 반사 특성에 따라서 집광기의 성능이 크게 변화 할 수 있다는 연구도 진행되었다. 반사는 들어오는 빛이 각도를 유지한 채 반사하는 거울과 같은 경면반사(Specular reflection)와 종어와 같이 빛을 다양한 방향으로 난반사 하는 확산반사(Diffusive reflection)로 구분된다. 확산반사막으로 발광형 태양광 집광기를 둘러서 쥘으면, 반사막에 입사되는 빛의 각도가 반사막을 만날 때마다 변경된다. 이 경우 일부 광경로가 변경되어 집광기의 전면창을 통해 외부로 빛이 나갈 확률이 증가하게 된다. 반대로 경면반사막의 경우 입사각의 반대 방향으로 반사 각도가 형성되어서 태양전지까지 빛이 도달하는 도파관 효율이 증가할 수 있다. 두 반사막을 비교한 결과 경면반사를 이용한 경우 확산반사판 대비 18.6% 높은 집광도를 얻을 수 있었다<sup>33)</sup>.

반사도가 높은 반사막이 적용된 경우 집광기의 집광도를 높일 수 있는 장점은 있으나 집광기의 전면에서 설치하는 것은 거의 불가능하다. 집광기 전면에서 고 반사의 반사막을 적용할 경우 태양광이 대부분 반사되어 발광체에서 흡수되는 태양광의 양이 매우 줄어드는 문제점이 발생한다. 따라서 발광체가 흡수할 수 있는 파장의 빛은 투과하고, 발광된 빛은 반사할 수 있는 선택적 반사막이 필요하다<sup>33-37)</sup>. 제안된 집광기 전면에서 적용 가능한 선택적 반사막은 Fig. 6에서 나타난 것과 같이 Distributed Bragg reflector(DBR)이다. 다층의 굴절률이 다른 박막을 적층하는 경우, Fig. 6과 같이 굴절률 차이와 막 두께에 따라 특정 파장만 반사하고, 나머지 파장은 손실 없이 투과하는 것이 가능하다. 발광체의 PL 스펙트럼에서만 반사가 이루어지고 높은 에너지의 파장은 투과하는 구조의 선택적 반사막을 발광형 태양광 집광기의 전면에서 적용할 경우, 집광기 전면에서 입사되는 빛은 광 손실 없이 발광체가 흡수 하여 재 발광시킬 수 있고, 재발광 된 빛은 집광기 내부에 갇혀서 부착된 태양전지에 전달되는 빛의 양을 증가시킬 수 있다. 또한 기판의 크기가 커질수록 반사막에 의한 도파관 효율 증가 효과가 뚜렷해져서, 대면적 집광기에서 효율 상승효과가 더 크게 나타난다<sup>33-35)</sup>. 최근 연구에 따르면, DBR 선택적 반사막의 반사 파장 최적화에 따라 최대 20% 이상 집광도를 향상시킬 수 있다는 것을 제안하였다<sup>34)</sup>. 현재까지 보고된 최대 집광도 결과 역시 DBR을 이용한 선택적 반사막을 이용한 결과에서 얻어졌다. 미국 Univ. of Berkeley 에서는 작은 크기( $\sim \text{um}^2$ )의 태양전지와 CdSe core/shell 구조의 양자점을 이용하여, 30배의 집광도를 도달하였고, 미국 Los alamos national lab 에서는 고효율 발광체를 이용하여 특정 파장에서 100 이상의 집광도를 구현하였다<sup>33,35)</sup>. 하지만 nm 단위의 박막 적층해야 하는 공정 특성상 가격이 매우 비싸서 DBR을 이용한 집광기의 상용화는 매우 어렵고, 발광체의 흡수와 PL 스펙트럼 사이의 중첩 이 큰 경우 적용하지 못하는 단점이 있다. 따라서 가격 측면에서 더 유리한 액정 기반의 선택적 반사막에 대한 연구가 진행되고 있다<sup>36,37)</sup>. 판상구조를 가지고 있는 Cholesteric 액정도 DBR과 비슷한 기능을 구현할 수 있기에, 집광기의 적용 시 도파관 효율을 개선할 수 있다. 아직 까지 두 선택적 반사막 모두 각도 의존성과 대면적 공정의 어려움이 존재한다. 따라서 향후 대면적이 가능

한 선택적 반사판에 대한 개발 및 응용방안에 대한 연구들이 진행될 것으로 예상되며, 향후 결과에 따라 대면적 발광형 태양광 집광기의 집광도는 더욱더 향상 될 수 있을 것으로 예측된다.

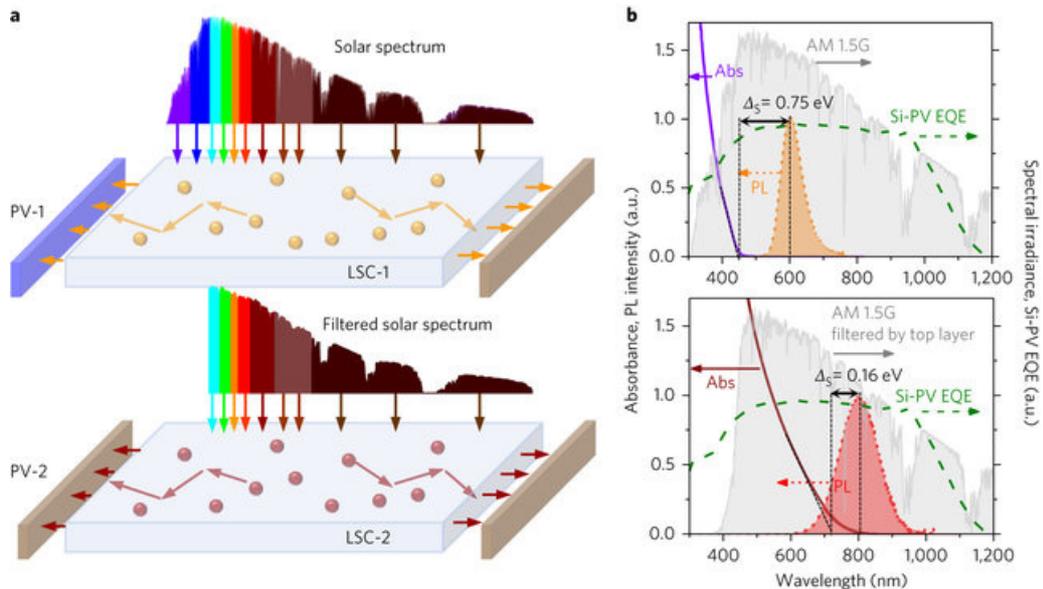


**Fig. 6** (a) A comparison of optical path of re-emitted light in the luminescent solar concentrators with and without a Bragg reflector, (b) Transmittance and reflection spectra of Bragg reflector for luminescent solar concentrator with absorption and photoluminescence of luminophore (CdSe quantum dot). (c) Enhanced spectral response of luminescent solar concentrator by employing Bragg reflector. Reprinted with permission from [35]. Copyright 2015 American Chemical Society

## 6. 발광형 태양광 집광기의 상업화 현황

발광형 태양광 집광기가 처음 제안된 1970년대 후반에는 단위 출력당 태양전지의 가격이 2019년 대비 약 200배 이상 비싸기 때문에, 발광형 태양광 집광기의 상업성이 매우 높았다. 하지만 지난 40년간 태양광 모듈 기술 개발로 공정 혁신을 통해 실리콘 태양광 모듈 가격이 Watt 당 \$ 0.2 이하로 내려가서, 대면적 발전소에서 발광형 태양광 집광기를 이용해 가격 경쟁력을 확보하는 것은 매우 힘든 상황이다. 따라서 현재의 발광형 집광기의 연구 방안은 집광 효과 보다는 기존 태양전지와 결합하여 태양전지 성능 향상 소재로 적용하거나 기능성을 가진 특수 목적용 제품에 응용으로 집중되고 있다. 먼저 고효율 측면에서는 GaAs와 같은 고가의 태양전지의 활용도를 높이는데 사용된다. 여러 가지 박막 태양전지 중 GaAs 태양전지의 경우 출력 특성은 우수하나, 가격 측면에서 결정질 실리콘 대비 높은 가격을 보인다. 따라서 GaAs 태양전지와 발광형 태양광 집광기를 결합하여, 대면적에서 빛을 효율적으로 전기로 변환하여 가격 경쟁력을 확보하는 방안에 대해 연구가 진행되고 있다<sup>38-40</sup>. 미국의 Caltech 연구 그룹은 시장에서 많이 사용되는 결정질 실리콘 태양전지의 상부에 GaAs 혹은 III-V 족 태

양전지와 발광형 태양광 집광기로 구성된 구조들을 결합한 Tandem 방식의 태양전지를 제안하였다<sup>39)</sup>. 환경적인 영향으로 볼 때 발광형 태양광 집광기와 결정질 실리콘으로 구성된 Tandem 구조의 태양전지가 일반 결정질 실리콘 태양전지 대비 환경적인 측면에서 훨씬 유리하다는 연구결과도 제시되었다<sup>40)</sup>. 따라서, 집광기가 결합된 Tandem 구조 태양전지에 대한 연구들과 제품화가 지속적으로 진행될 것으로 예측된다.



**Fig. 7** Tandem Luminescent solar concentrator with core/shell quantum dots and their corresponding absorption and emission spectra. Reprinted with permission from [14]. Copyright 2018 Nature Publishing Group

한편 태양광을 이용하여 더 많은 빛을 집광하여 태양전지로 전달하기 위해서 에너지 밴드 갭이 다른 다층으로 구성된 Tandem 구조의 집광기 구조도 제안되었다. Fig. 7과 같이 밴드 갭이 다른 두층으로 Tandem 구조의 집광기를 구현할 경우, 윗 층에서는 높은 에너지를 가진 광을 GaAs 나 CdTe 같이 밴드 갭이 큰 태양전지를 이용하여 전기로 변환시킬 수 있고, 아래층에는 윗층보다 밴드 갭이 작은 발광체를 적용하여 첫 번째 집광기에서 흡수하지 못하는 낮은 에너지의 광자들을 전기로 전환시킬 수 있다. 서로 다른 유기물 재료 혹은 Mn이 도핑된 CdZnS와 CuInSe 기반 양자점을 이용하여 Tandem 구조의 집광기를 구현할 경우, 효과적으로 태양광을 집광할 수 있다<sup>14,41)</sup>. 대부분의 건물용 유리창이 2중창 구조로 되어 있기에, Tandem 구조의 집광기를 건물에 적용할 수 있는 가능성은 매우 높다. 또한 건물의 유리창 이외에도, 도로의 방음벽, 비닐하우스와 같은 농사 시설 등에도 많이 사용될 수 있을 것으로 예측되고 있고, 실제적으로 효과를 검증하고 있다<sup>5,42,43)</sup>. 이러한 연구들이 성공적으로 진행된다면, 건물의 심미성을 고려하여 약 25% 정도의 건물 외부에 발광형 집광기가 설치될 경우 전력 생산도 가능하면서, 건물의 미적 요소까지 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다<sup>5,44)</sup>.

## 7. 결론

발광형 태양광 집광기는 빛을 집광하는 도광판과 그 가장자리에 붙어 있는 태양전지로 구성된다. 넓은 면적에 설치된 도광판이 효율적으로 태양광을 좁은 면적의 태양전지로 전달하면, 태양광이 집광되는 효과가 발생하여 같은 단위면적의 태양전지 보다 높은 효율을 구현할 수 있다. 현재까지 발광형 태양광 집광기의 연구 동향은 아래와 같다.

- (1) 발광형 태양광 집광기의 발광체는 입사하는 빛의 일부를 흡수하여 Photoluminescence를 이용하여 재발광하고, 재발광 된 빛은 공기와 집광기 물질의 굴절률 차이로 인한 전반사를 통해 가장자리에 부착된 태양전지로 전달된다. 실제 소자에서는 태양광을 흡수하여 재 발광하는 과정에서 손실이 발생하고, 태양전지로 도파관을 따라 이동 중 집광기 외부로 나가는 문제들이 발생한다. 이를 해결하기 위해 재료적 측면, 광학구조 측면에서 개선에 대한 많은 연구가 진행 중이다.
- (2) 발광재료 측면에서는 더 많은 태양광을 흡수하고 발광된 빛을 손실 없이 전달되게 하기 위해서, 발광효율이 좋으면서도 흡수와 PL 스펙트럼의 중첩이 적은 발광자 개발에 대한 연구가 주로 이루어지고 있다. 많이 사용되는 재료들은 core/shell 구조의 양자점, Si 혹은 탄소 기반 양자점, 유기물 등이 많이 사용되고 있다.
- (3) 광학적 측면에서는 발광체에 의해 발광된 빛들이 효율적으로 태양전지로 전달하기 위해, 반사도가 높은 반사판을 측면 및 후면에 설치하는 방법들이 제안되었다. 또한 전면에서 발광체가 흡수하는 빛은 선택적으로 투과하고, 발광한 빛은 반사할 수 있는 선택적 반사막에 대한 연구를 통해 집광도를 향상하는 방법도 제안되었다. 향후 대면적에 적용 가능한 저가의 선택적 반사막에 대한 추가적인 연구가 필요하다.
- (4) 발광형 태양광 집광기를 유리창, 방음벽, 건물 외벽, 농업 시설 등에 적용하는 방안에 대해 제시되었다. 현재 일부 시제품들을 설치하여 그 효과를 검증 중에 있다. 이뿐만 아니라, 발전시장의 대부분을 차지하는 결정질 실리콘 태양전지와 결합한 Tandem 구조에 대해서도 활발하게 연구되고 있다.

## 후기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

1. REN 21, Renewables 2019, Global Status Report 2019.
2. Fu, F., Feurer, T., Weiss, T. P., Pisoni, S., Avancini, E., Andres, C., Buecheler, S., and Tiwari. A. N., High-efficiency Inverted Semi-transparent Planar Perovskite Solar Cells in Substrate Configuration, Nature Energy Vol. 2, p. 16190, 2016.
3. Lunt, R. R. and Bulovic, V., Transparent, Near-infrared Organic Photovoltaic Solar Cells for Window and Energy-scavenging Applications, Applied Physics Letters, Vol. 98, p. 113305, 2011.

4. Bergren, M. R., Makarov, N. S., Ramasamy, K., Jackson, A., Guglielmetti, R., and McDaniel, H., High-performance CuInS<sub>2</sub> Quantum Dot Laminated Glass Luminescent Solar Concentrators for Windows, *ACS Energy Letter*, Vol. 3, No. 3, pp. 520-525, 2018.
5. Corrado, C., Leow, S. W., Osborn, M., Carbone, I., Hellier, K., Short, M., Alers, G., and Carter, S. A., Power Generation Study of Luminescent Solar Concentrator Greenhouse, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 8, p. 43502, 2016.
6. Yablonoitch, E., Thermodynamics of the Fluorescent Planar Concentrator, *Journal of Optical Society of America*, Vol. 70, No. 11, pp. 1362-1363, 1980.
7. Klimov, V. I., Baker, T. A., Lim, J., Velizhanin, K. A., and McDaniel, H., Quality Factor of Luminescent Solar Concentrators and Practical Concentration Limits Attainable with Semiconductor Quantum Dots, *ACS Photonics*, Vol. 3, No. 6, pp. 1138-1148, 2016.
8. Coropceanu, I. and Bawendi, M. G., Core/Shell Quantum Dot Based Luminescent Solar Concentrators with Reduced Reabsorption and Enhanced Efficiency, *Nano Letters*, Vol. 14, pp. 4097-4101, 2014.
9. Jeong, B. G., Park, Y. S., Chang, J. H., Cho, I., Kim, J. K., Kim, H., Char, K., Cho, J., Klimov, V. I., Park, P., Lee, D. C., and Bae, W. K., Colloidal Spherical Quantum Wells with Near-unity Photoluminescence Quantum Yield and Suppressed Blinking, *ACS Nano*, Vol. 10, pp. 9297-9305, 2016.
10. Li, H., Wu, K., Lim, J., Song, H.-J., and Klimov, V. I., Doctor-blade Deposition of Quantum Dots Onto Standard Window Glass for Low-loss Large-area Luminescent Solar Concentrators, *Nature Energy*, Vol. 1, p. 16157, 2016.
11. Meinardi, F., Colombo, A., Velizhanin, K. A., Simonutti, R., Lorenzon, M., Beverina, L., Viswanatha, R., Klimov, V. I., and Brovelli, S., Large-area Luminescent Solar Concentrators Based on 'Stokes-shift-engineered' Nanocrystals in a Mass-polymerized PMMA Matrix, *Nature Photonics*, Vol. 8, pp. 392-399, 2014.
12. Zhao, H. G., Benetti, D., Jin, L., Zhou, Y. F., Rosei, F., and Vomiero, A., Absorption Enhancement in "Giant" Core/alloyed-shell Quantum Dots for Luminescent Solar Concentrator, *Small*, Vol. 12, No. 38, pp. 5354-5365, 2016.
13. Meinardi, F., McDaniel H., Carulli, F., Colombo, A., Velizhanin, K. A., Makarov, N. S., Simonutti, R., Klimov, V. I., and Brovelli, S., Highly Efficient Large-area Colourless Luminescent Solar Concentrators Using Heavy-metal-free Colloidal Quantum Dots, *Nature Nanotechnology*, Vol. 10, pp. 878-885, 2015.
14. Wu, K., Li, H. and Klimov, V. I., Tandem Luminescent Solar Concentrators Based on Engineered Quantum Dots. *Nature Photonics*, Vol. 12, p. 105, 2018.
15. Zhao, H. G., Zhou, Y. F., Benetti, D., Ma, D. L., and Rosei, F., Perovskite Quantum Dots Integrated in Large-area Luminescent Solar Concentrators, *Nano Energy*, Vol. 37, pp. 214-223, 2017.
16. Meinardi, F., Ehrenberg, S., Dharmo, L., Carulli, F., Mauri, M., Bruni, F., Simonutti, R., Kortshagen U., and Brovelli, S., Highly Efficient Luminescent Solar Concentrators Based on Earth-abundant Indirect-bandgap Silicon Quantum Dots, *Nature Photonics*, Vol. 11, pp. 177-185, 2017.
17. Zhou, Y. F., Benetti, D., Tong, X., Jin, L., Wang, Z. M., Ma, D. L., Zhao, H. G., and Rosei, F., Colloidal Carbon Dots Based Highly Stable Luminescent Solar Concentrators, *Nano Energy*, Vol. 44, pp. 378-387, 2018.
18. Wu, J., Dai, J., Shao, Y., and Sun, Y., One-step Synthesis of Fluorescent Silicon Quantum Dots (Si-QDs) and Their Application for Cell Imaging, *RSC Advances*, Vol. 5, No. 102, pp. 83581-83587, 2015.
19. Zhang, B., Gao, C., Soleimaninejad, H., White, J. M., Smith, T. A., Jones, D. J., Ghiggino, K. P., and Wong, W. W. H., Highly Efficient Luminescent Solar Concentrators by Selective Alignment of Donor-emitter Fluorophores, *Chemistry of Materials*, Vol. 31, No. 8, pp. 3001-3008, 2019.
20. Slooff, L. H., Bende, E. E., Burgers, A. R., Budel, T., Pravettoni, M., Kenny, R. P., Dunlop, E. D., and

- Büchtemann, A., A Luminescent Solar Concentrator with 7.1% Power Conversion Efficiency, *Physica Status Solidi-Rapid Research Letters*, Vol. 2, No. 6, pp. 257-259, 2008.
21. Chou, C. -H., Hsu, M. -H., and Chen, F. -C., Flexible Luminescent Waveguiding Photovoltaics Exhibiting Strong Scattering Effects from the Dye Aggregation, *Nano Energy*, Vol. 15, pp. 729-736, 2015.
  22. Zhao, Y., Meek, G., Levine, B., and Lunt, R. R., Near-infrared Harvesting Transparent Luminescent Solar Concentrators, *Advance Optical Materials*, Vol. 2, pp. 606-611, 2014.
  23. Levitt, J. A. and Weber, W. H., Materials for Luminescent Greenhouse Solar Collectors, *Applied Optics*, Vol. 16, No. 10, pp. 2684-2689, 1977.
  24. Benjamin, W. E., Veit, D. R., Perkins, M. J., Bain, E., Scharnhorst, K., McDowall, S., Patrick, D. L., and Gilbertson, J. D., Sterically Engineered Perylene Dyes for High Efficiency Oriented Fluorophore Luminescent Solar Concentrators, *Chemistry of Materials*, Vol. 26, No. 3, pp. 1291-1293, 2014.
  25. Batchelder, J., Zewail, A., and Cole, T., Luminescent Solar Concentrators. 2: Experimental and Theoretical Analysis of Their Possible Efficiencies, *Applied Optics*, Vol. 20, pp. 3733-3754, 1980.
  26. Seybold, G. and Wagenblast, G., New Perylene and Violanthrone Dye-stuffs for Fluorescent Collectors, *Dyes Pigments*, Vol. 11, pp. 303-317, 1989.
  27. Dienel, T., Bauer, C., Dolamic, I., and Brühwiler, D., Spectral-based Analysis of Thin Film Luminescent Solar Concentrators. *Solar Energy*, Vol. 84, No. 4, pp. 1366-1369, 2010.
  28. Correia, S. F. H., Lima, P. P., André, P. S., Sá Ferreira, M. R., and Carlos, L. A. D., High-efficiency Luminescent Solar Concentrators for Flexible Waveguiding Photovoltaics, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 138, pp. 51-57, 2015.
  29. Polishuk, P., Plastic Optical Fibers Branch Out, *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 140, 2006.
  30. Reisfeld, R., New Developments in Luminescence for Solar Energy Utilization, *Optical Materials*, Vol. 32, No. 9, pp. 850-856, 2010.
  31. Slooff, L. H., Kinderman, R., Burgers, A. R., Büchtemann, A., Danz, R., Meyer, T. B., Chatten, A. J., Farrell, D., Barnham, K. W. J., and Van Roosmalen, J. A. M., The Luminescent Concentrator Illuminated, *Proceedings of SPIE*, Vol. 6197, pp. 1-8, 2006.
  32. Schrecengost, J. R., Bowser, S. D., Weible, S. W., Solomon, J. M., Minner, L. J., Gresh, J. T., and Wittmershaus, B. P., Increasing the Area of A White Scattering Background Can Increase the Power Output of a Luminescent Solar Concentrator, *Solar Energy*, Vol. 170, pp. 132-137, 2018.
  33. Song, H.-J., Jeong, B. G., Lim, J., Lee, D. C., Bae, W. K., and Klimov, V. I., Performance Limits of Luminescent Solar Concentrators Tested with Seed/Quantum-well Quantum Dots in a Selective Reflector-based Optical Cavity, *Nano Letters*, Vol. 18, pp. 395-404, 2017.
  34. Xu, L., Yao, Y., Bronstein, N. D., Li, L., Alivisatos, A. P., and Nuzzo, R. G., Enhanced Photon Collection in Luminescent Solar Concentrators with Distributed Bragg Reflectors, *ACS Photonics*, Vol. 3, No. 2, pp. 278-285, 2016.
  35. Bronstein, N. D., Yao, Y., Xu, L., O'Brien, E., Powers, A. S., Ferry, V. E., Alivisatos, A. P., and Nuzzo, R. G., Quantum Dot Luminescent Concentrator Cavity Exhibiting 30-fold Concentration, *ACS Photonics*, Vol. 2, No. 11, pp. 1576-1583, 2015.
  36. Debije, M. G., Van, M. -P., Verbunt, P. P. C., Kastelijm, M. J., van der Blom, R. H. L., Broer, D. J., and Bastiaansen, C. W. M., Effect on the Output of a Luminescent Solar Concentrator on Application of Organic Wavelength-selective Mirrors, *Applied Optics*, Vol. 49, No. 4, pp. 745-751, 2010.
  37. Verbunt, P. P. C., Tsoi, S., Debije, M. G., Boer, D. J., Bastiaansen, C. W. M., Lin, C.-W., and de Boer, D. K. G., Increased Efficiency of Luminescent Solar Concentrators After Application of Organic Wavelength Selective

Mirrors, *Optics Express*, Vol. 20, No. S5, pp. A655-A668, 2012.

38. Needell, D. R., Ilic, O., Bukowsky, C. R., Nett, Z., Xu, L., He, J., Bauser, H., Lee, B. G., Geisz, J. F., Nuzzo, R. G., Alivisatos, A. P., and Atwater, H. A., Design Criteria for Micro-optical Tandem Luminescent Solar Concentrators, *IEEE Journal of Photovoltaics.*, Vol. 8, No. 6, pp. 1560-1567, 2018.
39. Kosten, E. D., Kayes, B. M., and Atwater, H. A., Experimental Demonstration of Enhanced Photon Recycling in Angle-restricted GaAs Solar Cells, *Energy and Environmental Science*, Vol. 7, pp. 1907-1912, 2014.
40. Lunardi, M. M., Needell, D. R., Bauser, H., Phelan, M., Atwater, H. A., and Corkish, R., Lifetime Assessment of tandem LSC-Si devices, *Energy*, Vol. 181, pp. 1-10, 2019.
41. Currie, M. J., Mapel, J. K., Heidel, T. D., Goffri, S., and Baldo, M. A., High-Efficiency Organic Solar Concentrators for Photovoltaics, *Science*, Vol. 321, No. 5886, pp. 226-228, 2008.
42. Kanellis, M., de Jong, M. M., Slooff, L., and Debije, M. G., The Solar Noise Barrier Project: 1. Effect of Incident Light Orientation on the Performance of a Large-scale Luminescent Solar Concentrator Noise Barrier, *Renewable Energy*, Vol. 103, pp. 647-652, 2017.
43. Lamnatou, C. and Chemisana, D., Solar Radiation Manipulations and Their Role in Greenhouse Claddings: Fluorescent Solar Concentrators, Photoselective and Other Materials, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 27, pp. 175-190, 2013.
44. Vossen, F. M., Aarts, M. P. G., and Debije, M. G., Visual Performance of Red Luminescent Solar Concentrating Windows in An Office Environment, *Energy and Buildings*, Vol. 113, pp. 123-132, 2016.