

Quantum dot luminescent solar concentrator

태양전지 개요

한철중(전자부품연구원, 디스플레이소재부품연구센터)

1. 서론

양자점(quantum dot)은 반도체의 나노미터 크기 결정으로 그 크기가 화합물의 Bohr radius보다 작아 exciton이 confinement되는 현상을 보이는 소재를 의미한다. 광학 소재로서의 양자점은 기존 건식 제조공정의 낮은 생산성을 극복할 수 있는 습식 제조공정의 등장으로 탄력을 받게 되었다. 화합물 반도체를 구성할 수 있는 II-VI족 혹은 III-V족 전구체의 용액 상 반응을 조절하여 양자점의 크기, 성분 및 구조를 자유롭게 바꿀 수 있는 기술이 최근 15년 사이에 급속하게 발전하였다. 이러한 나노양자점은 다양한 조성, 크기 및 특징을 지녀 디스플레이, 바이오마커, 태양전지, 용액공정형 TFT 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 특히 최근 들어서는 디스플레이 분야에서 산업화 및 제품 적용이 이루어지고 있어 관련 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그 결과 양자점의 톤 규모 양산이 가능해지고 가격이 저렴해져 양자점을 적용한 광학 소재 및 소자가 시장에 등장하기 시작하였다.

디스플레이 산업분야에서 양자점 연구가 활발하게 이루어짐에 따라, 추가적인 응용이 가능해지고 있다. 대표적인 예로 투명 광농축 태양전지(luminescent solar concentrator, LSC)기술을 들 수 있다. 투명 광농축 태양전지란 투명 도광판 내에 분산되어 있는 형광체를 엷지

부분에 태양전지를 부착함으로써, 투명태양전지를 제조하는 기술이다. 이러한 투명 광농축 태양전지는 그동안 적절한 파장 매칭성 및 신뢰성을 갖는 형광체의 부재로 연구가 답보해 왔으나 최근 등장한 양자점 형광체의 등장으로 새로운 기술개발이 지속적으로 증가하고 있다.^[1]

본고에서는 양자점을 이용한 새로운 응용분야로서 최근 활발하게 연구가 진행되고 있는 광농축 태양전지(Quantum dot-luminescent solar concentrator)에 대해 소개하고 관련 연구 동향에 대해 기술해 보고자 한다.

2. 광농축 태양전지 소개 및 장점

2.1. Luminescent solar concentration

현상의 이해

일반적인 투명 소재의 경우, 외부에서 투과하는 빛의 대부분은 기재 표면에서의 프레넬 반사와 일부 흡광되는 광량을 제외하고 대부분 투과하게 된다. 반면 형광체가 분산되어있는 투명 소재의 경우, 형광체에 의해 흡광된 빛은 모든 방향으로(omni direction) 빛이 방사되기 때문에 투명 소재와 공기의 굴절률 차이로 인한 탈출각(escaping cone)을 기준으로 하여 일부 밖으로 투과하거나, 내부전반사 되어 투명 소재의 가장자리 부분으로 모이게 된다.(그림 1) 이러한 현상을 Edge glow 현상으로도 부르고 있다.(그림 2)

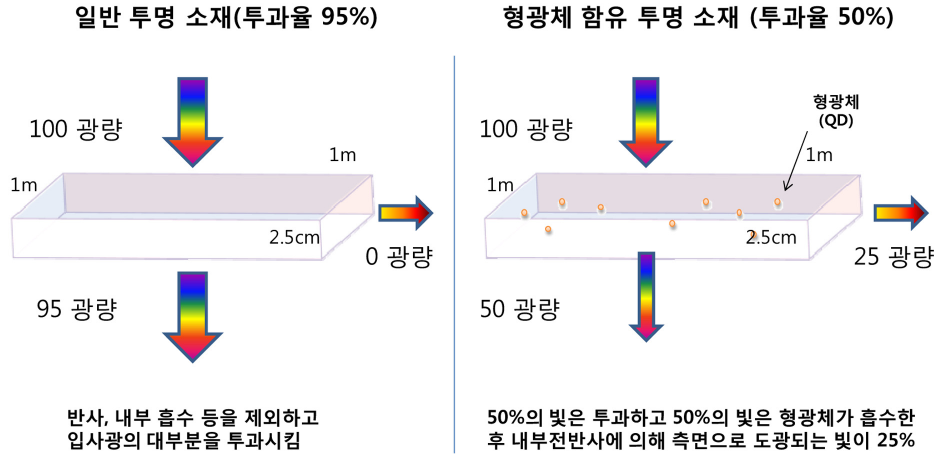


그림 1. 일반 투명소재와 형광체 함유 투명소재의 측면 도광 비율 비교

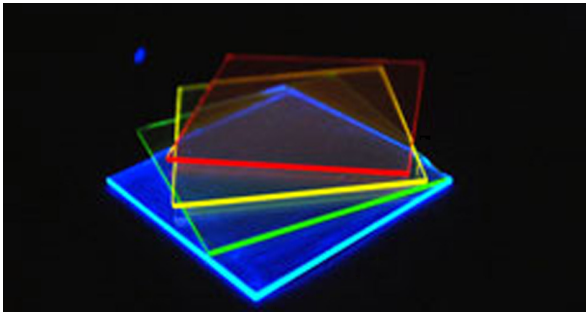


그림 2. 형광체가 함유된 투명 소재의 Edge glow 현상

이때 우측 형광체 함유 투명 소재의 경우, 100개의 광량 중 50개의 광량은 투과하고 25광량만 가장자리에 모이게 되지만, 단위 면적당 광량인 optical flux는 100 Photon/m²에서 25Photon/0.1m²로, 즉 250Photon/m²로 2.5배의 농도가 상승되어 이를 luminescent solar concentration으로 일컫는다.

이러한 형광체가 분산되어 있는 투명 기판의 가장자리에 태양전지를 설치하게 되면, (1) 일반적인 광량보다 높은 광량에서 발전이 가능하고 (2) 더 적은 면적만을 사용할 수 있어 W/\$가 상승하는 장점을 갖는다. 때문에 보다 높은 단가를 갖는 고성능 태양전지를 사용할 수 있어 전체적인 성능 향상을 기대할 수 있다.

2.2. 양자점 형광체 적용 LSC 기술

LSC에 적용하는 형광체의 경우 연구 초기에는 유기형광체등을 사용해 왔다. 그러나 유기형광체의 경우 태양광에 대한 신뢰성 문제가 있어 점차 무기형광체, 유

무기 복합 형광체로 연구개발 방향이 옮겨져 왔다. 그러나 LSC의 효율 및 응용성을 극대화하기 위해서는 양자점 형광체의 적용이 요구되고 있으며 관련 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

양자점 형광체가 적용된 QD-LSC의 경우, (1) 50nm 이하 크기로 산란이 억제되어 haze 최소화 가능 (2) 흡수파장 영역과 발광파장 영역의 자유로운 tailoring 가능 (3) 유기형광체 대비 높은 신뢰성 등의 장점을 가지고 활발하게 연구되고 있다.

이 중 흡수파장 영역과 발광파장 영역의 조절기능은 양자점의 고유 특성으로, 특히 가시광영역을 모두 흡광하여 Near IR을 방사하는 양자점의 경우 무색투명한 특성을 유지하면서도 높은 효율을 유지할 수 있어 주목받고 있는 분야이다.

2.3. 핵심 응용 분야별 장점

LSC는 효율은 낮지만 투명한 특성으로 인해 단독 태양전지로서 기능하기 보다는 Building integrated PV, Device integrated PV, Vehicle integrated PV 등 각종 통합형 PV에 최적화된 특성을 갖는다. 특히 주목할 만 한 점은 투명 태양전지로서 기능성이다. 투명한 태양전지는 광량을 일정부분 투과시켜야 하기 때문에 태양전지로서 성능을 극대화 할 수 없는 근원적인 한계를 지닌 기술로써 그동안 소규모 연구만이 이루어져 왔다. 하지만 태양광을 100% 차단하여 태양광 패널 뒤쪽에서는 전혀 태양광을 활용할 수 없는 일반 태양전지

기술보다는, 일부라도 태양광을 투과하여 조명, 식물성장, 외부 관찰, AR 등을 구현할 수 있는 기능성 태양전지의 필요성이 최근 들어 높아지고 있다.

BIPV(Building integrated PV)의 경우, 가장 높은 태양광 발전 효율을 보이는 남쪽 방향에 보다 넓은 면적의 태양전지를 배치하고자 하나, 그렇게 되면 빌딩 외관 훼손 및 주간 태양광 도입문제, 시야 확보문제 등이 발생하고 있다. 즉 한정된 “남향”이라는 공간을 두고 태양전지와 창호가 서로 경쟁하고 있는 상황으로써 이러한 상황을 해소하기 위한 기능성 투명 태양전지의 도입이 필요한 상황이다.

BIPV 분야에서는 창호로 사용가능해야 하기 때문에 창호로서의 기본 특성인 높은 투과도, 헤이즈나 모아레 현상 없음, 무색 투명 특성 등을 만족해야 한다. 더 나아가 단위 소자에서는 위의 특성을 만족한다 하더라도, 태양전지가 대형화 하며 발생하는 전류 추출용 도선 혹

은 배선이 시야를 가리는 현상이 억제되어야 하기 때문에, 전하가 아닌 광자를 투명패널 가장자리로 보내는 QD-LSC 기술은 창호용 태양전지에 가장 적합한 기술로 여겨지고 있다.

더 나아가 DIPV, VIPV 등에서는 가벼운 무게와 자유로운 폼팩터가 요구되고 있는데 상대적으로 박형 구조를 가지면서 동시에 flexible 하거나 stretchable 한 특성을 갖는 QD-LCD는 향후 다양한 에너지를 요구하는 시스템의 구동시간을 증가시키는데 일조할 것으로 기대되고 있다.^[2]

3. QD-LSC 기술의 향후 개발 방향

상술한 바와 같이 다양한 장점을 지니고 있는 QD-LSC 이고 30년 이상의 개발 역사를 가지고 있지만, 아직 상용화되지 못하고 있는 이유는 크게 4가지로 들 수 있다. (1) 낮은 효율, (2) 낮은 투명도, (3) 대면적화 어려움, (4) 낮은 신뢰성 등 핵심 성능에 대한 개선이 이루어져야 한다.

3.1. 효율 개선

3.1.1. 낮은 효율

LSC의 효율은 투명 소자를 기준으로 할 경우 현재 세계 최고 수준이 4% 수준으로 형성되어 있다. 이렇게 효율이 낮은 이유는 (가) 내부 전반사 임계각을 벗어난 파장 생성, (나) 발광 파장의 형광체에 의한 재흡수, (다) 광자를 흡수 못하는 형광체, (라) 형광체의 degradation, (마) 낮은 양자효율 형광체, (바) 태양전지에 대한 광추출 감소, (사) 도광판 표면 반사 및 산란 등 다양한 이유가 있고 이들 문제점들에 대한 해결이 동시에 이루어져야 고효율을 달성할 수 있다.

위 문제들 중 현재 가장 시급하게 개선이 이루어져야 하는 부분은 양자점 형광체의 낮은 양자효율이다. 형광체 자체의 높은 양자효율도 중요하지만 고분자 복합체를 형성하고 난 이후에도 높은 양자효율을 유지하는 것이 난제로써 아직 충분한 양자효율을 달성하지 못하고 있는 상황이다.

또한 양자점에 의해 생성된 발광 파장에 최적화된 고효율 태양전지가 요구되고 있으나, 대표적인 실리콘 태양전지는 LSC용으로 적용하기 위해 좁고 얇은 형태의 strip



그림 3. 투명 태양전지 대표 적용 분야

가공이 어려운 단점을 지니고 있다. 때문에 플렉서블하면 서도 좁고 얇게 가공이 가능한 III-V족 태양전지의 적용이 검토되고 있으나 고가인 단점을 극복하기 위한 양산기술 및 기관재사용 등 단가 인하 기술개발이 요구되고 있다.

3.1.2. 낮은 투명도

QD-LSC의 낮은 투명도는 전체 투명도 뿐 만 아니라 파장별 투명도 또한 의미한다. 파장별 투명도가 낮아짐 에 따라 QD-LSC는 독특한 색상을 지닐 수 있어 다양 한 색상을 지니는 태양전지로 사용될 수 도 있으나, 기 본적으로는 무채색의 색상을 지니는 것이 창호용 투명 전지로서는 요구되고 있다.^[3]

전체 투명도 중 문제가 되는 것은 특히 산란에 의한 헤이즈 현상이다. 이론상으로 50nm이하의 크기를 갖는 나노입자는 가시광선 영역에서 산란이 없어야 하나, 나노 입자 간 뭉침 및 주변 분산 매질과의 클로스터 형성으로 광학적 크기가 상승하여 산란 현상을 발생하게 된다. 때문 에 완벽한 나노분산을 통한 헤이즈가 없는 양자점 복합체 를 제조하는 기술개발이 요구되고 있으며 일부 형광체 복 합체에 대해서는 관련 기술 개발이 보고되고 있다.

3.3.3. 대면적화 어려움

LSC가 대면적 창호에 적용되기 위해서는 1m × 1m 급 대형화가 필수적인 요소이다. 그러나 현재까지 개발 된 LSC태양전지의 크기는 10cm × 10cm 이내로 대 형화에 성공하지 못하고 있다. 그 이유는 광 농축 과정 에서 반복적으로 이루어지는 재흡수 시, 광량 감소가 지속 적으로 이루어지기 때문이다.(그림 5)

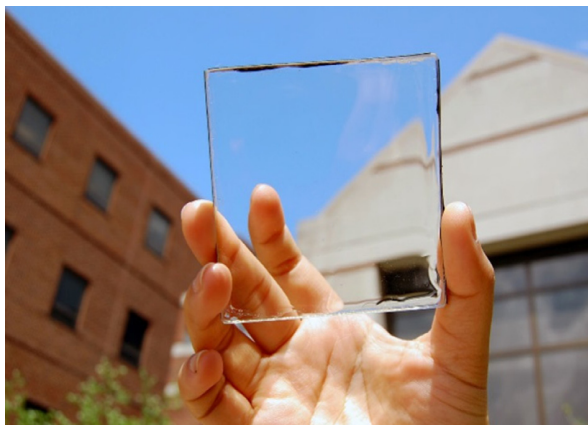


그림 4. 나노형광체가 분산된 Luminiscent solar concentrator

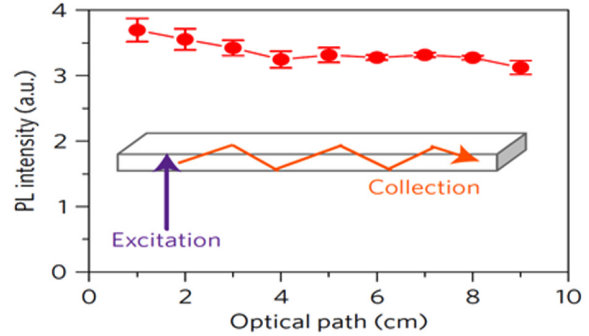


그림 5. 도광 경로 내 다중 광흡수에 따른 광량 저하 현상^[4]

위 그림에서 나타나 있는 바와 같이 최초 형광체에서 발생한 광량은 도광판으로 통해 가장자리로 이동하는 과 정에서 지속적으로 또 다른 형광체에 의해 흡수될 가능 성이 있다. 이때 형광체의 흡광 스펙트럼과 발광 스펙트 럼이 완벽하게 분리되어 있다면 재흡수현상은 최소화 될 수 있으나 아직 그러한 형광체는 개발되지 못하고 있다. 그러나 다양한 양자점의 연구 개발을 통해 그림 6과 같 이 양자점의 Stokes's shift를 극대화시켜 재흡수율을 줄이고자 하는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.^[5]

3.3.4. 낮은 신뢰성

LSC는 지속적으로 태양 직사광선에 노출되어야 하기 때문에 높은 광신뢰성이 핵심적으로 요구된다. 그러나 양자점은 photo excitation된 상태에서 산소나 수분에 의해 degradation 될 가능성이 있기 때문에 상당히 높 은 수준의 passivation이 요구된다. 이러한 passivation 은 (1) 양자점 수준, (2) 복합체 수준, (3) 모듈 수준에서 복합적으로 이루어져야 한다. 양자점 수준의 passivation 은 추가적인 oxide shell 형성 등을 통해 이루어질 수 있으나 너무 두꺼운 shell 형성은 자칫 산란 현상발생 및 oxide 층에 의한 흡광이 발생할 수 있어 주의해야 한다.

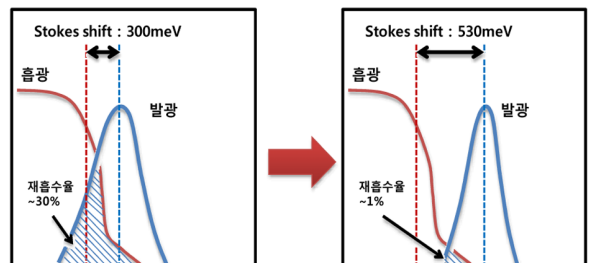


그림 6. Stoke's shift 증가에 따른 재흡수율 감소 모식도

복합체 수준에서는 현재 디스플레이 QDEF분야에서 사용되고 있는 것처럼 투명 배리어층 도입을 통해 해결될 수도 있고, 무게와 유연성에 문제가 없는 창유리의 경우 유리기판 자체를 배리어로 사용하여 문제를 해결할 수도 있다. 더 나아가 양자점 자체의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 가능한 안정된 양자점 소재를 적용하여야 하는데 Cd 기반의 II-VI족 양자점은 신뢰성이 높지만 유독하고 InP 기반의 III-V족 양자점은 안전하지만 신뢰성이 떨어지기 때문에 I-III-VI족 CIS계 양자점이 대안으로써 연구 및 개발되고 있다.

4. 결론 및 제언

양자점 기반 광농축 태양전지 기술은 기존 “태양전지 밭” 형태 발전에서 벗어나 전력 공급 지역과 전력 수요 지역을 일치시킴으로써 송배전 효율을 향상시킬 수 있는 장점과 동시에 태양전지 성능과 기존 창호의 성능을 동시에 활용할 수 있는 융합 기술이다. 그러나 관련 기술 개념이 30여 년 전에 제시되었음에도 불구하고 아직 상용화되지 못한 데에는 형광체 관련 기술 이슈가 주도적이며 이를 해결하기 위한 대안으로써 양자점 형광체 기술이 제시되고 있다.

이러한 QD-LSC기술은 현재 TFT-LCD의 BLU(Back light unit)과 유사한 폼팩터를 갖고 있어 관련 장비, 인력 및 기술을 이미 보유하고 있는 우리나라에 최적화 되어 있을 뿐 아니라, 양자점 기술 강국으로써의 장점 또한 극대화 할 수 있다. 관련 기술 개발을 통해 기존 레드오션화

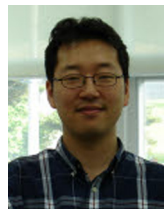
된 실리콘 태양전지 일변도 시장에서 벗어나 수출형 고부가가치 기능성 태양전지 시장으로 사업다각화가 일어날 수 있기를 기대한다.

참고문헌

- [1] M. G. Debije and P. P. C. Verbunt, *Adv. Energy Mater* **2**, 12, (2012).
- [2] J. Yoon, L. Li, A. V. Semichaevsky, J. H. Ryu, H. T. Johnson, R. G. Nuzzo and J. A. Rogers, *Nature Comm.* **2**, 343,(2011).
- [3] F. Meinardi, H. McDaniel, F. Carulli, A. Colombo, K. A. Velizhanin, N. S. Makarov, R. Simonutti, V. I. Klimov and S. Brovelli, *Nature Nanotechnology* **10**, 878, (2015).
- [4] H. Li, K. Wu, J. Lim, H.-J. Song and V. I. Klimov, *Nature Energy* **1**, 16157, (2016).
- [5] I. Coropceanu and M. G. Bawendi, *Nano Lett.* **14**, 4097, (2014).

저 자 약 력

한 철 중



- 2006년~현재 : 전자부품연구원 디스플레이소재부품연구센터 책임
- 2002년~2006년 : LG전선 디스플레이소재부품연구소 선임
- 2002년 : 한국과학기술원 화학과 박사
- 1997년 : 한국과학기술원 화학과 석사
- 1995년 : 한국과학기술원 화학과 학사
- 관심분야 : 고분자 기반 차세대 전자 소재 분야