

양자점 기술과 III-V 화합물 반도체 기반의 평판 집광형 Luminescent solar concentrator 투명 태양전지 기술



한철중
전자부품연구원
디스플레이소재부품
연구센터



김지용
전자부품연구원
디스플레이소재부품
연구센터



이정민
전자부품연구원
디스플레이소재부품
연구센터

서론

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

III-V 화합물반도체 기반 태양전지는 고효율과 소자 안정성, 신뢰성의 장점에도 불구하고 고가라는 단점 때문에 그 응용이 제한되어 왔다. 그러나 저가의 렌즈를 이용한 집광 기술과 III-V 태양전지 기술의 접목은 발전 단가를 기존 실리콘, CdT, CIGS 등의 상업화된 태양전지 등과 경쟁력을 갖출 수 있는 가능성을

제시하였다. 이러한 집광기술은 렌즈를 이용한 입사광과 평행한 광축을 갖는 일반적인 의미의 집광 시스템으로 III-V 태양전지와 광추적기, 렌즈를 포함한 광학계 등으로 구성되어 주로 대규모의 태양광 발전소에 적합한 기술이다.

또한 이와 달리 광축과 수직인 집광기술과 밴드갭 조절을 통한 파장 선택형 III-V 태양전지의 응용기술에 대한 연구도 활발하게 진행 중에 있다. 디스플레이 산업분야에서 활발하게 이루어진 양자점 연구를 태양전지에 적용한 다양한 응용기술 및 제품 중 대표적인 예로 투명 광농축 태양전지(luminescent solar concentrator, LSC)기술을 꼽을 수 있다. 투명 광농축 태양전지만 형광체가 분산된 투명 도광판의 엣지 부분에 태양전지를 결합함으로써, 투명 태양전지를 제조하는 기술이다. 이러한 투명 광농축 태양전지는 그동안 적절한 파장 선택성 및 신뢰성을 갖는 형광체의 부재로 연구가 답보 상태에 있었으나 최근 양자점 형광체의 도입으로 새로운 기술개발이 활발하게 진행 중에 있다.^[1] 특히 기존 집광형 태양전지들과는 다르게 입사되는 광축에 수직 방향으로 집광할 수 있어 박막 평판형 구조로 제조 가능하며, 태양광 발전 모듈의 투명도를 증가시킬 수 있는 장점이 있어 차세대 집광형 태양전지로서 다양한 응용이 기대된다.

본고에서는 이와 같이 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.

광농축 태양전지 소개 및 장점

Luminescent solar concentration 현상의 이해

일반적인 투명 소재의 경우, 외부에서 투과하는 빛의 대부분은 기재 표면에서의 프레넬 반사와 일부 흡수되는 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, 내부전반사되어 투명 소재의 가장자리 부분으로 모이게 된다.(그림 1) 이러한 현상을 Edge glow 현상으로도 부르고 있다(그림 2).

이때 우측 형광체 함유 투명 소재의 경우, 100개의 광량 중 50개의 광량은 투과하고 25광량만 가장자리에 모이게 되지만, 단위 면적당 광량인 optical flux 는 100 Photon/m² 에서 25 Photon/0.1m²로, 즉 250 Photon/m² 로 2.5배의 농도가 상승되어 이를 luminescent solar concentration 으로 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.

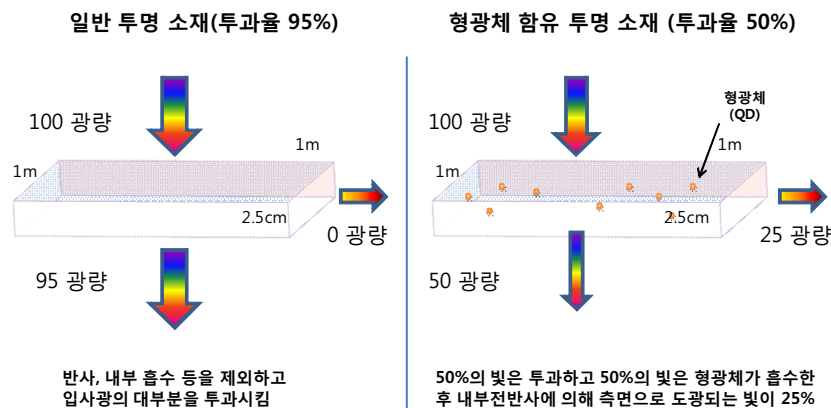


그림 1. 일반 투명소재와 형광체 함유 투명소재의 측면 도광 비율 비교

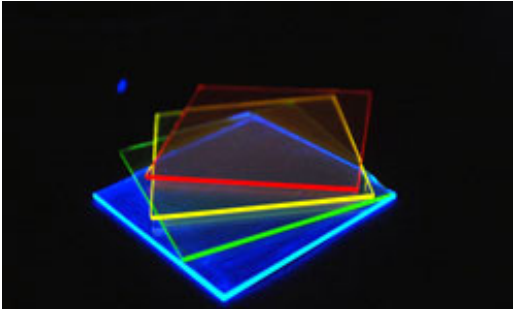


그림 2. 형광체가 함유된 투명 소재의 Edge glow 현상

양자점 형광체 적용 LSC 기술

LSC에 적용하는 형광체의 경우 연구 초기에는 유기 형광체 등을 사용해 왔다. 그러나 유기 형광체의 경우 태양광에 대한 신뢰성 문제가 있어 점차 무기 형광체, 유무기 복합 형광체로 연구개발 방향이 옮겨져 왔다. 그러나 LSC의 효율 및 응용성을 극대화하기 위해 양자점 형광체의 개발 및 적용이 요구되고 있으며, 이와 관련된 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

특히 양자점 형광체가 적용된 QD-LSC의 경우, (1)10 nm 이하 크기로 산란이 억제되어 haze 최소화 가능 (2)흡수 파장 영역과 발광파장 영역의 자유로운 tailoring 가능 (3) 유기 형광체 대비 높은 신뢰성 등의 장점을 가지고 있어 많은 응용 기술 및 적용 제품이 기대된다.

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

핵심 응용 분야별 장점

LSC 기술은 단독 태양광 발전시스템 적용보다는 Building integrated PV, Device integrated PV, Vehicle integrated PV 등과 같은 발전 효율이 상대적으로 낮지만 투광성이 중요한 다양한 융합형 PV 제품에 최적화된 특성을 갖는다. 특히 주목할 점은 투명 태양전지로서의 기능성이다. 투명 태양전지는 입사된 광량의 일정 부분 투과시켜야 하기 때



그림 3. 투명 태양전지 대표 적용 분야

문에 태양전지로서의 성능을 극대화 할 수 없는 근원적인 한계를 지닌 기술로서 그동안 제한적인 연구만이 이루어져 왔다. 하지만 태양광을 100% 차단하여 태양광 패널 뒤쪽에서는 전혀 태양광을 활용할 수 없는 일반적인 태양전지 기술보다는, 태양광의 일부라도 투과하여 조명, 식물성장, 외부 관찰, AR 등을 구현할 수 있는 기능성 태양전지의 필요성이 최근 들어 확대되고 있는 추세다(그림 3).

BIPV(Building integrated PV)의 경우, 가장 높은 태양광 발전 효율을 얻을 수 있는 남쪽 방향에 보다 넓은 면적의 태양전지를 배치하고자 한다. 그러나 이 경우 빌딩 외관 훼손 및 주간 태양광 도입문제, 시야 확보 문제 등 디자인과 심미적 측면의 문제가 발생하고 있다. 즉 한정된 “남향”이라는 공간을 두고 태양전지 기능과 창호의 기능이 충돌하여 서로 경쟁하고 있는 상황이다. 이와 같은 문제의 해결을 위한 기능성 투명 태양전지의 개발과 도입이 절대적으로 필요한 상황이다.



BIPV 분야에서는 창호로 사용 가능해야 하기 때문에 창호로서의 기본 특성인 높은 투과도, 헤이즈나 모아레 현상의 제거, 무색/투명 특성 등을 만족해야 한다. 더 나아가 단위 소자에서는 위의 특성을 만족한다 하더라도, 창호형 태양전지의 대형화에 따른 전류 추출용 도선 혹은 배선이 시야를 가리는 현상이 억제되어야 한다. 이와 같은 문제의 해결을 위해 전하가 아닌 광자를 투명패널 가장자리로 전달할 수 있는 QD-LSC 기술이 창호용 태양전지에 가장 적합한 기술로 여겨지고 있다.

또한 DIPV, VIPV 등에서는 가벼운 무게와 자유로운 폼팩터가 요구되고 있으므로 상대적으로 박형 구조를 가지면서 동시에 유연성(flexible)과 신축성(stretchable)의 특성을 동시에 갖는 QD-LSC는 향후 다양한 에너지를 요구하는 시스템의 구동시간을 증가시키는데 일조할 것으로 기대되고 있다.^[2]

QD-LSC 태양전지 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.

효율 개선

LSC 기반 태양전지의 효율은 투명 소자를 기준으로 할 경우 현재 세계 최고 수준이 4% 수준으로 형성되어 있으며 표 1에 형광체와 태양전지 따른 최고 효율을 표시하였다. 이와 같이 효율이 낮은 이유는(가) LSC내부 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 이루어

져야 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.

두 번째 시급한 문제는 양자점에 의해 생성된 발광 파장에 최적화된 고효율 태양전지의 개발이다. 양자점에 의해 방출되는 파장영역에서 광손실을 최소화 할 수 있는 밴드갭 맞춤형 태양전지 개발이 요구되고 있다. III-V 화합물반도체 기반 태양전지는 3족 및 5족 원소간의 조성 및 도핑을 조절함으로써 요구되는 파장영역에 최적화된 밴드갭 확보가 가능한 장점이 있다. 또한 대표적인 실리콘 태양전지가 LSC용으로 적용하기 위해 폭이 좁고 얇은 strip 형태의 가공이 어려운 단점을 지니고 있는 반면, III-V족 태양전지는 기판 박리 기술을 이용할 경우 플렉서블하며 성형성이 우수하여 strip 형태 가공에 유리하다. 그러나 고가인 단점을 극복하기 위한 양산 기술 및 기판 재사용 기술 등 단가 인하 기술 개발에 대한 문제도 함께 극복되어야 할 것으로 사료된다. 한국 나노기술원과 전자부품연구원, 영동테크윈은 현재 그림 4에서 볼 수 있듯이 플렉서블 III-V족 태양전지를 strip형태로 제조하고 이를 flexible PCB에 모듈화 하여 얇고 좁은 폭을 갖는 태양전지 모듈을 제조하고 이를 이용하여 LSC 태양전지 모듈을 제조하고 있다.

투명도 향상

QD-LSC의 낮은 투명도는 전체 투명도뿐만 아니라 파장별 투명도도 의미한다. 파장별 투명도가 낮아짐에 따라 QD-LSC는 특정한 색상을 지닐 수 있어 다양한 색상을 지니는 태양전지로 사용될 수도 있으나, 기본적으로는 무채색의 색상을 지니는 것이 창호용 투명전지로서는 요구되고 있다.^[3]

전체 투명도 중 문제가 되는 것은 특히 산란에 의한 헤이즈 현상이다. 10 nm 이하의 크기를 갖는 나노입자는 가

표 1. 현재까지 발표된 LSC 기술 수준 정리, Reference로부터 재구성^{1,4)}

형광체	Cell 타입	LSC 크기(cm)	효율(%)	광학 농축 배율(%)	연도	참고사항
Coumarin, Rhodamine	Si	-	1,9		1981	
Secret	Si	-	2,5		1981	
DSM	Si	120 x 100 x 0,4	1,3		1981	
Coumarin, Rhodamine	Si	120 x 100 x 0,4	1,3		1981	
Secret	Si	40 x 40 x 0,3	2,1		1984	
Secret	GaAs	-	2,5		1984	
Secret, 2층 구조	Si	40 x 40 x 0,6	3		1984	
Secret, 2층 구조	GaAs	40 x 40 x 0,6	4		1984	
Coumarin, Rhodamine	Si	140 x 140 x 3	3,2		1984	
CdSe/CdS양자점	GaAs	140 x 140 x 3	4,5		1984	
CdSe/CdS 양자점	Si	5 x 5 x 0,3	2,1		2007	
Red305	Si	5 x 5 x 0,3	3,3		2007	
Red305	Si	5 x 5 x 0,3	2,4		2008	
Red305/CRS040	Si	5 x 5 x 0,3	2,7		2008	
Red305/CRS040	mc-Si	5 x 5 x 0,5	2,7		2008	
Red305/CRS040	GaAs	5 x 5 x 0,5	4,6		2008	
Red305/CRS040	GaAs	5 x 5 x 0,5	7,1		2008	불투명
BA241	GaInP	2 x 2 x 0,3	5,1		2009	
BA241	GaInP	2 x 2 x 0,3	6,7		2009	
BA241	GaInP	5 x 10 x 0,5	2,6		2009	
Secret	a-Si	5 x 5 x 0,5	0,7		2010	
CdSe/CdS giant shell	Si	4,95 x 3,1 x 0,4	2,8		2011	
Red305, Perylene	Si	5 x 5 x 0,5	4,3		2011	
CdSe/CdS/CdZn 양자점		4,95 x 3,1 x 0,4	2,8		2011	
Pbs 양자점		25,4 x 7,62 x 0,4	-	20	2011	
ZnSe/ZnS양자점		2,5 x 7,5 x 0,042	-	810	2014	
CdSe/CdS 양자점		2x 2 x 0,2	-	150	2014	
CdSe/CdS 양자점		21,5 x 1,3 x 0,5	-	440	2014	
CuInS/ZnS 양자점	Si	2,2 x 2,2 x 0,3	8,7	50	2015	초소형
CuInSeS/ZnS 양자점		12,0 x 12,0 x 0,3	-	170	2015	
PbS/CdS 양자점		10,0 x 1,5 x 0,2	-	20	2016	
CdSe/CdZnS/SiO2 양자점		10,2 x 10,2 x 0,16	-	380	2016	
CdSe/CdZnS/SiO2 양자점		20,3 x 20,3 x 0,16	-	480	2016	

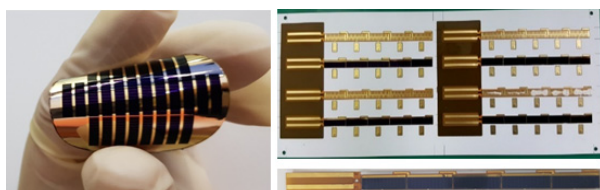


그림 4. 플렉서블 III-V족 태양전지 및 이를 적용한 플렉서블 모듈(효율 14,54%)

시광선 영역에서 산란이 없어야 하나, 나노입자 간 뭉침 및 주변 분산 매질과의 클러스터 형성으로 광학적 크기가 상승하여 산란 현상을 발생하게 된다. 때문에 완벽한 나노 분산을 통한 헤이즈가 없는 양자점 복합체를 제조하는 기술 개발이 요구되고 있으며 일부 형광체 복합체에 대해서는 관련 기술 개발이 보고되고 있다.

대면적화

LSC가 대면적 창호에 적용되기 위해서는 1 m x 1 m 급 대형화가 필수적인 요소이다. 그러나 현재까지 개발된 LSC 태양전지의 크기는 10 cm x 10 cm 이내로 대형화에 성공하지 못하고 있다. 주요 원인으로 광농축 과정에서 반복적으로 양자점에 의한 재흡수가 되며, 이때 재흡수에 의한 광 손실이 지속적으로 발생되기 때문이다.

즉, 그림 5에서 알 수 있듯이 최초 형광체에서 발생한 광량이 도광판을 통하여 가장자리로 전달하는 과정에서 지속적으로 또 다른 형광체에 의해 흡수될 가능성이 있다.

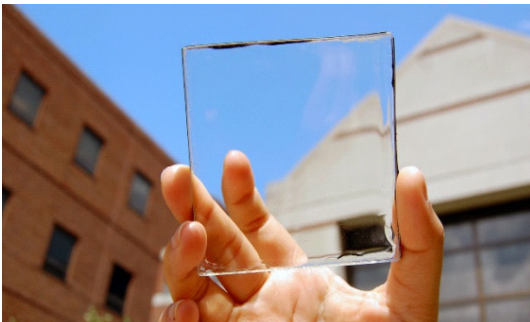


그림 5. 나노형광체가 분산된 Luminiscent solar concentrator

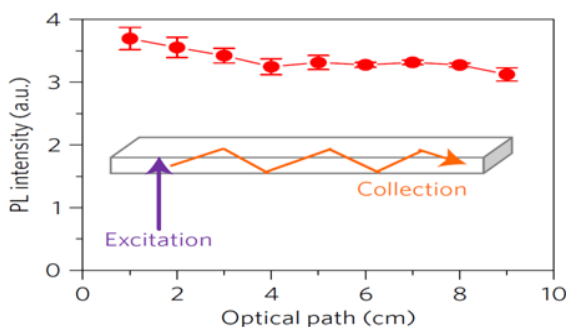


그림 6. 도광 경로 내 다중 광흡수에 따른 광량 저하 현상^[4]

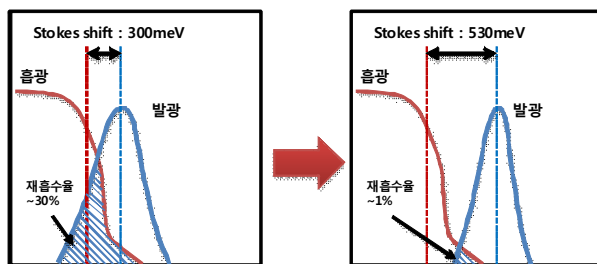


그림 7. Stoke's shift 증가에 따른 재흡수율 감소 모식도

이때 형광체의 흡광 스펙트럼과 발광 스펙트럼이 완벽하게 분리되어 있다면 재흡수현상은 최소화 될 수 있으나 현재까지 이와 같은 고품위의 형광체는 개발되지 못하고 있다. 이와 같은 문제 해결 방법으로 다양한 양자점의 연구 개발을 통해 그림 6과 같이 양자점의 Stokes's shift를 극대화시켜 재흡수율을 줄이고자 하는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.^[5]

신뢰성 향상

LSC 태양전지는 지속적으로 태양광에 노출되어야 하기 때문에 우수한 소자 안정성과 신뢰성이 요구된다. 특히 양자점은 photo excitation 된 상태에서 산소나 수분에 의해 degradation 될 가능성이 크다. 따라서 매우 우수한 특성의 passivation이 요구되며, 이러한 passivation은(1) 양자점 수준(2) 복합체 수준(3) 모듈 수준에서 복합적으로 이루어져야 한다. 양자점 수준에서 수분의 passivation은 추가적인 oxide shell 형성 등을 통해 이루어질 수 있으나 너무 두꺼운 shell 형성은 자칫 산란 현상 발생 및 oxide 층에 의한 흡광이 발생할 수 있어 주의해야 한다. 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 신뢰성은 높지만 유해성이 있으며, InP 기반의 III-V족 양자점은 안전하지만 신뢰성이 떨어지는 단점이 있다. 이와 같은 단점해결을 위하여 I-III-VI족 CIS계 양자점이 대안으로써 연구 및 개발되고 있다.

결론 및 제언

양자점 기반 광농축 태양전지 기술은 기존 “태양전지 발” 형태 발전에서 벗어나 전력 공급 지역과 전력 수요 지

역을 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 제시되어 고효율 III-V 태양전지 결합된 융합 기술이 활발하게 연구되고 있다.

특히 태양전지 결합용 평판 집광을 위한 QD-LSC 기술은 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 태양전지 기술에서 벗어나 수출형 고부가가치의 가능성 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).