

양자점의 광물리적 특성

Photophysical Properties of Colloidal Nanocrystal Quantum Dots

이강하 · 우주영 · 김휘동 · 이도창 | Kangha Lee, Ju Young Woo, Whi Dong Kim, Doh C. Lee

Department of Chemical and Biomolecular Engineering, KAIST Institute for the Nanocentury,
Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST),
291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-701, Korea
E-mail: dclee@kaist.ac.kr

1. 서론

반도체 나노입자의 크기가 전자-정공의 거리와 비슷하거나 작아지면 양자구속효과(quantum confinement effect)에 의하여 물리학적 성질이 변화하게 된다. 예컨대, 반도체의 에너지갭(band gap)이 나노입자의 크기에 따라 변하게 되며, 에너지레벨이 양자화 되어 전자 및 정공의 거동이 벌크에서와는 다른 양상을 갖는다. 양자구속효과의 범위에 드는 반도체 나노입자를 양자점이라고 부른다.^{1,2} 양자점이 갖는 독특한 광물리학적 특성으로 인해 양자점을 이용한 연구가 다양하게 진행되고 있으며, 광물리학 연구의 주요한 성과를 정리하고자 한다.

전자와 정공은 쿨롱인력(Coulombic attraction)으로 인해 결합상태(bound state)를 가지며, 이 결합상태의 특정 크기는 보어 반지름(exciton Bohr radius)으로 불리는 반도체의 물성이다. 반도체 나노입자의 크기가 보어 반지름보다 작아지게 되면 전자 및 정공의 파동 함수의 기술이 경계조건(boundary condition)에 의해 영향을 받아, 에너지 레벨이 양자화 되고, 밴드갭이 변화하게 된다. 보어 반지름은 반도체가 갖는 유전상수에 의해 결정된다. 예컨대, CdSe의 경우 4.9 nm, PbSe의 경우 46 nm의 보어 반지름을 가진다.

2. 양자구속효과(Quantum Confinement Effect)

일반적으로 벌크 상태의 반도체는 그림 1에서처럼 연속적인 에너지 레벨을 지니며, 고정된 밴드갭을 가지고 있다. 반면, 양자점은 밴드의 가장자리 근처에서 양자화된(quantized) 에너지레벨을 갖게 된다. 뿐만 아니라, 가능한 에너지 전이의 최저값도 변하게 되는데, 양자구속효과에 의한 에너지갭의 변화는 상자속

Author



이강하

2011 KAIST 생명화학공학 (학사)
2011-현재 KAIST 생명화학공학 (석사과정)



우주영

2012 인하대학교 섬유신소재공학 (학사)
2012-현재 KAIST 생명화학공학 (석사과정)



김휘동

2009 부산대학교 나노과학기술 (학사)
2011 부산대학교 나노과학기술 (석사)
2012-현재 KAIST 생명화학공학 (박사과정)



이도창

2000 서울대학교 응용화학부 (학사)
2002 서울대학교 응용화학부 (석사)
2007 The University of Texas at Austin 화학공학과 (박사)
2007-2010 로스앨러모스 국립연구소 박사후 연구원
2010-현재 KAIST 생명화학공학 조교수

입자(particle-in-a-box) 모델을 통하여 다음과 같이 얻어진다.

$$E_g(\text{NC}) = E_g(\text{bulk}) + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m_r R^2}$$

위 식에서 R 은 양자점의 반지름, \hbar 는 디랙(Dirac) 상수로

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} (h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})$$

의 값을 갖는다. 또한,

$$m_r = (m_e^{-1} + m_h^{-1})^{-1}$$

로, m_e 와 m_h 는 각각 전자와 정공의 유효질량(effective mass)이다. 즉, 양자점의 크기가 작아질수록 에너지갭은 넓어지게 된다.

일반적으로 합성된 양자점의 특성 분석은 흡수 및 발광(photoluminescence, PL) 등의 광학적 분석을 통해 이루어진다. 예컨대, 흡수 스펙트럼에서 가장 낮은 에너지 영역에서 나타나는 첫 번째 피크(peak)가 양자점의 밴드갭을 나타낸다. (그림 2(a))의 피크를 첫째 엑시톤피크라고 부르며, 양자점이 흡수할 수 있는 가장 낮은 에너지의 빛의 파장에 자리하게 된다. 첫째 엑시톤피크보다 고에너지 영역에서도 여러 개의 피크를 관찰할 수 있으며, 이는 더 높은 에너지 준위에 대한 흡수로서, 양자점의 에너지 준위가 양자화 되어 나타나는 결과이다. 에너지 준위의 양자화는 그림 2(b)에 보이는 발광여기(photoluminescence excitation, PLE) 스펙트럼을 통해 보다 확실히 확인할 수 있다. PLE 스펙트럼에서 각각의 피크는 발광하는 양자점에서 발광에 기여하는 에너지레벨을 나타낸다. 따라서, 밴드갭 이상의

에너지 영역에서 나타나는 여러 개의 피크는 양자점의 발광에 기여하는 여러 개의 양자화된 에너지레벨이 있음을 나타낸다.⁴

그림 2(a)의 양자점의 흡수 스펙트럼과 발광 스펙트럼 피크를 분석해 보면, 양자점이 흡수한 에너지보다 낮은 에너지에서 발광을 보임을 알 수 있다. 스토크스 시프트(Stokes shift)라 불리는 이 에너지 차이는, 양자화된 에너지 준위가 다시 여러 개의 에너지 레벨로 나뉘어지면서 나타나는 현상이다. 싱글렛(singlet) 상태로 전이된 전자가 트리플렛(triplet) 상태를 거쳐 정공과 재결합 하면서 발광을 나타내기 때문인데,⁵ 이를 이해하기 위해서는 에너지 밴드의 분리(splitting)에 대해서 자세하게 이해할 필요가 있다. 그림 3에서 나타난 것처럼 양자점의 에너지 준위는 전자와 정공의 상호작용과 결정 구조의 비대칭성 등으로 인하여 다시 여러 개의 세부 준위로 나뉘어 진다. 그림 3(a)의 CdSe 양자점의 1S(e)-1S_{3/2}(h) 밴드의 경우 다섯개의 에너지 준위로 나뉘어 지게 되고, 이는 그림 3(b)에서 볼 수 있는 것처럼 단일 양자점의 PLE 측정을 통해 확인할 수 있다. PLE 스펙트럼에서 각각의 피크는 서로 다른 에너지 준위를 나타내는 것으로, 1^L, 1^U 등의 에너지 준위를 확인할 수 있다. 각각의 에너지 준위로 여기된 전자는 1^L 상태를 거쳐 2 밴드에 머물다가 정공과 재결합하게 되는데, 이 때

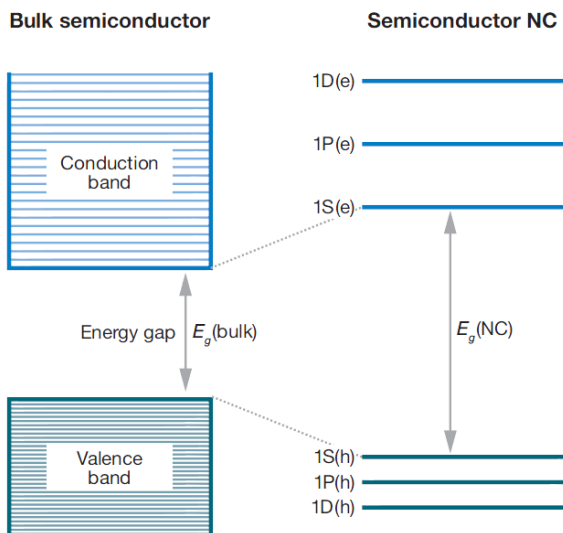


그림 1. 벌크 상태 반도체의 에너지 레벨과 반도체 나노입자의 에너지 레벨.³

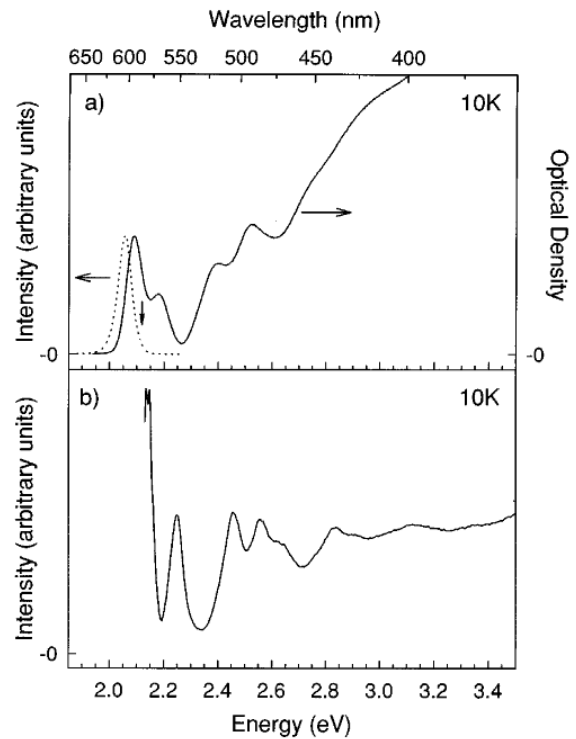


그림 2. (a) 5.6 nm 크기의 CdSe 양자점 흡수(실선) 및 발광(점선) 스펙트럼, (b) CdSe 양자점의 발광여기 스펙트럼.⁴

1^L 과 2^L 의 에너지 차이가 스토크스 시프트로 나타나게 된다.³

3. 포논병목현상(Phonon Bottleneck) 및 다중엑시톤 생성(Multiple Exciton Generation)

양자점이 에너지갭 이상의 에너지를 흡수하면, 여러 에너지 레벨에서 전자와 정공쌍이 형성된다. 밴드의 가장자리

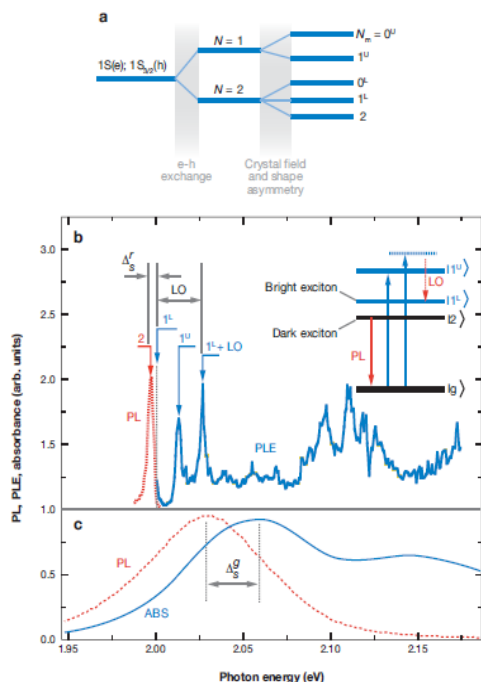


그림 3. (a) CdSe 양자점의 $1S(e)-1S_{3/2}(h)$ 밴드 분리의 모식도, (b) 단일 CdSe 양자점의 발광 및 발광여기 스펙트럼, (c) CdSe 용액의 흡수 및 발광 스펙트럼.³

보다 높은 에너지 준위에서 형성된 전자 및 정공, 또 핫캐리어(hot carrier)는 피코 초 수준의 짧은 시간 안에 낮은 에너지 준위의 캐리어가 된다. 반도체에서 핫캐리어의 이완(relaxation)은 결정격자 진동에너지의 양자인 포논의 형태로 방출되는데(그림 4(a)), 양자화된 에너지 준위를 갖는 양자점의 경우(그림 4(b)), 핫캐리어의 이완을 위해 다수의 포논이 필요하게 되므로, 이 과정이 상대적으로 느려지게 된다. 소위, 포논 병목(phonon bottleneck)이라 불리는 이론적 현상을 실험적으로 구현한다면, 양자점을 이용한 광수확 소자에서 핫캐리어를 효율적으로 추출할 수 있게 되고 소자의 효율 향상을 이룰 수 있다. 유효질량이 무거운 정공의 에너지 준위는 유효질량이 가벼운 전자에 비해 촘촘하여 비교적 효율적으로 포논을 방출하면서 에너지를 잃을 수 있다. 이러한 전자-정공 상호작용에 의한 과정은 10 피코 초(10^{-11} s) 내외의 빠른 시간 내에 일어나기 때문에, 양자점에서 핫캐리어를 추출하는 것은 여전히 매우 어렵다. 핫캐리어의 추출을 위해서 핫캐리어의 수명을 늘려주는 것이 중요하다. 그 동안 핫캐리어를 제어하기 위한 다양한 시도가 있었으며, 여러 방법 중 이종구조(heterostructure) 양자점을 이용하는 것이 효과적이라 보고되고 있다. 이종구조 양자점을 만들어주게 되면, 서로 다른 종의 계면에서 핫캐리어가 머물 수 있는 다양한 에너지 레벨을 제공함으로써 핫캐리어의 수명을 늘려줌과 동시에 그림 4(d)와 4(e)에 나타난 표면 트랩 및 분자 진동에 의한 에너지 손실을 방지할 수 있다. 2008년 시카고 대학의 Guyot-Sionnest 교수 연구팀은 그림 4(f)와 같은 CdSe/ZnS/ZnSe/CdSe 이종구조 양자점을 이용하여 핫캐리어의 수명을 1 ns 이상으로 연장하는데 성공하

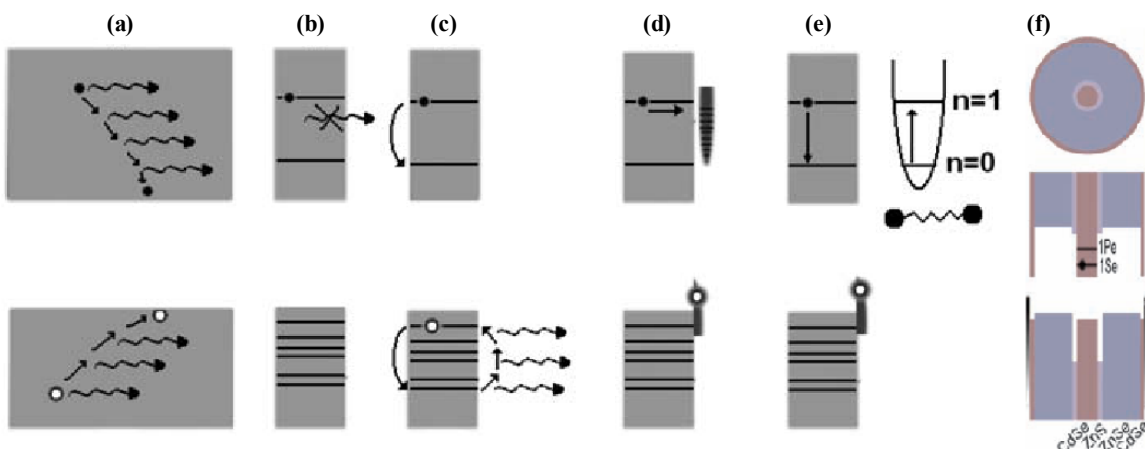


그림 4. (a) 벌크 상태 반도체에서 핫캐리어의 이완, 핫캐리어가 낮은 에너지 상태인 에너지밴드의 가장자리로 가면서 포논을 통하여 열에너지를 방출한다. (b) 양자화된 에너지 준위로 인하여 양자점에서는 포논 방출이 제한적이다. (c) 양자점에서 전자-정공 상호작용을 통한 핫캐리어의 이동 및 정공의 포논 방출. (d) 표면 트랩을 통한 핫캐리어 추출. (e) 표면 분자의 진동을 통한 핫캐리어 에너지 수확. (f) 핫캐리어의 수명이 연장된 CdSe/ZnS/ZnSe/CdSe 이종구조 양자점의 모식도 및 에너지 관계도.⁶

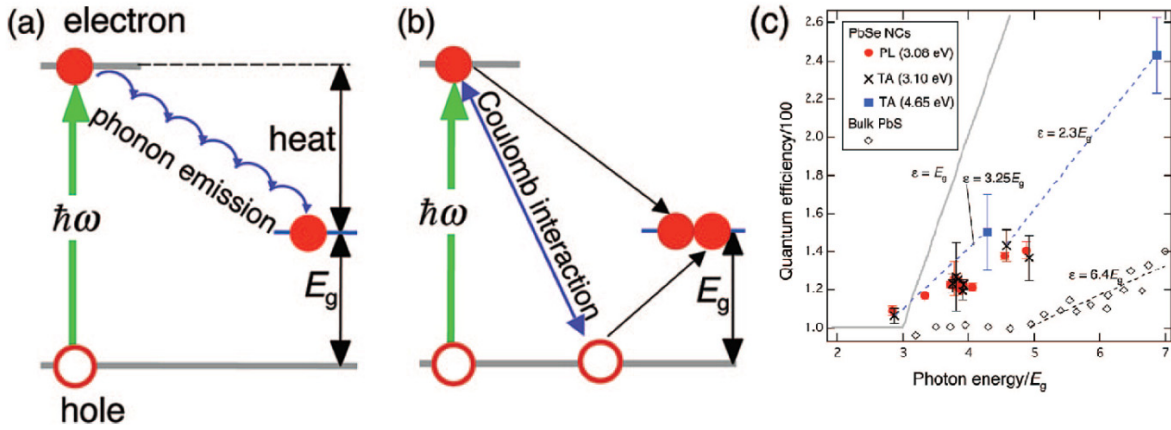


그림 5. (a) 벌크 상태 반도체에서 고에너지 전자가 포논을 방출하며 에너지를 잃는 과정에 대한 모식도, (b) 양자점에서 고에너지 전자가 다른 전자로 에너지를 전달하여 다른 전자-정공쌍을 형성하는 다중여기자 형성과정에 대한 모식도, (c) 다양한 측정법을 통해 확인한 PbSe 양자점의 다중여기자 형성 임계 에너지.⁹

였다.⁶ 이와 같은 연구 결과를 바탕으로 2010년 미네소타 주립대학의 Aydil, Norris, Zhu 교수 공동 연구팀은 TiO₂를 이용하여 PbSe 양자점으로부터 핫전자(hot electron)를 추출 할 수 있는 소자 제작에 성공하기도 하였다.⁷

핫캐리어의 제어와 더불어 효율적인 다중엑시톤 생성(multiple exciton generation, MEG), 즉 하나의 광자에 의해서 여러 개의 전자-정공쌍이 생성되는 현상은 양자점이 가질 수 있는 독특한 광물리학적 특성이다. 벌크 상태의 반도체에서 핫캐리어는 포논을 방출하면서 그 에너지를 잃고 밴드의 가장자리에 위치하게 된다(그림 5(a)). 반면 양자점에서는 양자화된 에너지 준위로 인해 포논 병목현상이 생기고, 이로 인해 포논 방출 대신 새로운 전자-정공쌍 생성에 에너지를 전달하는 임팩트 이온화(impact ionization)가 일어날 수 있다(그림 5(b)). 양자점에서 다중엑시톤 생성 효율이 높을 수 있다는 물리적 배경은 태양전지 효율의 향상이 가능하게 될 것이라는 기대로 이어지고 있다. 2006년 미국

로스알라모스 국립 연구소의 Klimov 박사의 계산 결과에 따르면, 하나의 광자로 두 개의 엑시톤이 생성된다면 태양전지의 이론최대 효율이 31%에서 41%까지 향상될 수 있다.⁹ MEG가 에너지 보존의 조건만을 충족해야 한다면, 에너지갭의 두배에 해당하는 에너지의 광자로부터도 MEG가 보일 수 있으나, 그림 5(c)에서처럼 밴드갭의 세 배 가량에 해당하는 에너지 영역에서 MEG가 일어나기 시작한다. 이는 에너지 보존의 조건 뿐 아니라 모멘텀 보존의 규칙을 지켜야 하므로 실제 다중엑시톤의 생성에는 더 많은 에너지가 필요함을 보여주는 결과이다. 가시광 영역에서 MEG가 일어나도록 하기 위해서는 흡수하는 물질의 에너지갭이 작아야 한다는 것을 의미하는데, 이는 적외선 영역의 밴드갭을 갖는 PbSe나 PbS 등이 주로 연구되는 이유이다.

다중엑시톤의 수명은 피코 초 (10⁻¹²초, ps) 수준으로 매우 짧아 효과적인 추출이 주요한 과제로 남아있다. 다중엑시톤이 한쌍의 엑시톤으로 전환하는 Auger 재결합은 전

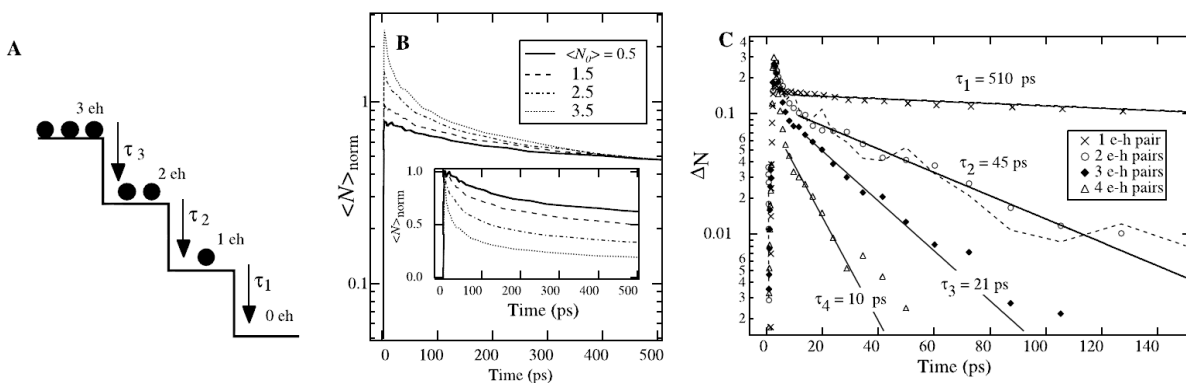


그림 6. (a) 다중엑시톤의 재결합과정을 나타낸 모식도, (b) 각각 다른 숫자의 전자-정공쌍을 가진 양자점의 시간에 따른 전자-정공쌍 수 변화, (c) 다중엑시톤의 수명변화.¹⁰

자와 정공 간의 쿨롱인력이 더 강한 양자점에서 더욱 빠르다(그림 6(a)). 양자점 내에서 다중엑시톤의 밀도 변화를 분광학적 측정으로 분석할 수 있다. 그림 6(b)는 여기 에너지 변화에 의해 다른 수의 엑시톤을 갖는 양자점의 시간에 따른 엑시톤 수 변화를 나타내고 있다. $\langle N_0 \rangle$ 는 초기 단일 양자점내의 엑시톤 수로, 엑시톤의 수가 달라도 수백 피코초 내에 재결합이 일어나 $\langle N_0 \rangle = 0.5$ 인 경우와 거의 같아지게 된다. 각각의 경우 단일엑시톤으로 재결합해 가는 데 걸리는 속도는 엑시톤의 수가 더 클수록 더 빠르다. 이는 그림 6(c)를 통해 알 수 있다. 한 쌍의 전자-정공쌍이 있을 때의 수명은 510 ps 수준이지만, 두 번째 전자-정공쌍의 경우는 45 ps, 세 번째, 네 번째 전자-정공쌍의 경우에는 각각 21 ps, 10 ps 로 수명이 매우 짧아짐을 알 수 있다.¹⁰ 다중엑시톤을 효과적으로 이용하기 위해서는 수 피코초의 시간 내에 양자점에서 전자를 추출해 낼 수 있어야 한다. 이를 위해서 양자점의 표면에 다중엑시톤을 수용할 수 있는 분자 등을 붙여 전자를 추출하는 연구가 진행되어 왔다.^{11,12} 하지만, 이후 수용체 분자로부터 전자의 재추출 및 전자 전달 효율성 등의 문제가 여전히 남아있다.

양자점에서의 MEG에 대한 연구가 순탄하게 진행되어 온 것 만은 아니다. 2006년 하나의 광자에 의해 7개의 엑시톤이 형성되어 양자 효율(quantum efficiency)이 최대 700%까지 도달할 수 있다는 내용의 논문이 발표된 뒤,¹³ 이에 대한 논쟁이 이어졌고, 2007년 MIT의 Bawendi 교수 연구팀이 이에 정면으로 반박하는 논문을 발표하기도 하였다.¹⁴ 이후, 로스알라모스의 연구팀에서도 MEG에 의한 700% 양자효율 달성에 대한 실험의 재연에 실패하면서, 현재는 MEG의 효율이 초기에 보고되었던 수치보다는 낮게 나타나는 것으로 받아들여지고 있다.⁸ 한편, 미국의 신재생에너지 국립연구소(National Renewable Energy Laboratory)의 Nozik 박사와 Beard 박사의 연구팀은 MEG효율을 갖는 양자점을 태양전지에 적용하여 100% 이상의 외부양자효율을 얻음을 발표하였다.¹⁵ 또한, 캐나다 토론토 대학의 Sargent 교수 연구팀에서는 MEG를 이용한 양자점 광검출기(photodetector)를 보고하기도 하였다.¹⁶ 이에 따라, 전세계적으로 양자점에서의 MEG효율의 정확한 측정이 주요한 논쟁의 주제인 가운데, 고효율 광전 변환 소자로의 응용도 활발히 연구되고 있다.

4. 레이징(Lasing)

광학 이득(optical gain)은 자극방출(stimulated emission)

에 의해 방출되는 광자가 흡수되는 광자보다 우세할 때에 달성되는데, 이 경우 점유 역전(population inversion), 즉, 여기상태의 전자가 바닥상태의 전자보다 많은 상황의 수반이 필수적이다. 단일엑시톤이 여기된 양자점에서는 흡수와 자극방출이 거의 균형을 이루기 때문에 광학 이득을 관찰하는 것이 거의 불가능하다(그림 7(a)). 이러한 사실은 $\langle N \rangle$, 즉 '여기된 전자의 평균 개수/양자점'이 1보다 클 경우에만 광학 이득을 획득할 수 있음을 의미한다. 그러나 type II 이종구조 양자점을 이용하면 $\langle N \rangle$ 이 반드시 1보다 크지 않더라도 광학 이득을 획득할 수 있다. Type II 이종구조 양자점에서는 전자와 정공의 분리에 의해 전하의 균형이 깨져 국소적인 전기장이 형성되는데 이를 스타크 효과(Stark effect)라 한다. 이 전기장에 의해 전자가 여기되기 위한 흡수에너지가 바뀌게 되고, ΔE_s (스타크 효과에 의한 에너지 변화) $> \Gamma$ (transition line width) 조건에서는 자극방출의 흡수에 의한 손실을 확실히 제거하여 단일엑시톤에 의한 광학 이득을 획득할 수 있다(그림 7(b)). 다만 $\Delta E_s > \Gamma$ 인 경우 광학적 이득은 제3의 여기되지 않은 양자점에 의한 흡수와 경쟁하게 된다(그림 7(c)).

다중엑시톤을 이용하여 광학 이득을 더 높은 에너지 범위로 확장하여 스펙트럼의 범위를 넓히는 것은 양자점을 이용한 레이징 응용에 있어서 매우 중요한 문제이다. 그러나 다중엑시톤의 증가에 따라 Auger 재결합의 속도가 급격하게 증가하여 대부분의 다중엑시톤이 Auger 재결합으로 소실되기 때문에 달성하기 매우 어려운 문제로 여겨진다. 하지만 g-QD(핵/두꺼운 껍질 이종구조 양자점)의 경

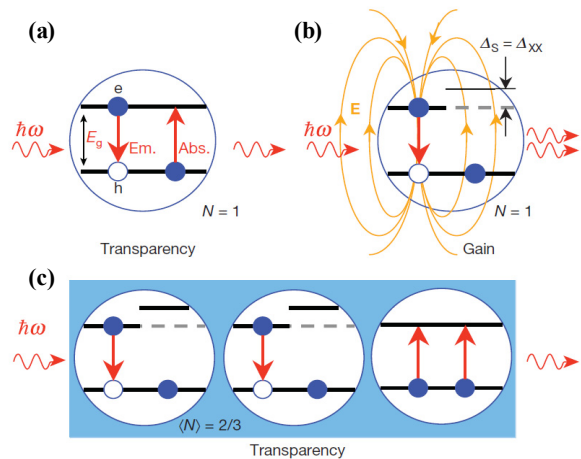


그림 7. (a) 엑시톤-엑시톤 상호작용이 없는 상황에서는 $N=1$ 때에 흡수와 방출이 균형을 이루게 된다. (b) 스타크 효과로 인해 흡수와 방출의 균형이 깨져 자극방출을 관찰할 수 있다. (c) 스타크 효과가 있는 양자점 양상물에서 단일엑시톤의 자극방출은 여기되지 않은 양자점의 흡수와 경쟁하게 된다.¹⁷

우 핵과 껍질 간 포텐셜 경사의 완만함, 전자-정공 파동함수의 겹침 감소, 엑시톤-엑시톤 반발 등의 영향으로 Auger 재결합이 억제되고, 따라서 다중엑시톤에 의한 광학 이득의 달성이 가능하다.

2009년 Klimov 박사의 연구팀은 g-QD를 이용하여 다중엑시톤을 통한 광학이득을 달성하였다.¹⁸ 펌프 세기를 증가시키수록 날카로워지는 방출 피크(그림 8(a))와 '펌프 세기 대 방출세기' 관계의 비선형성(그림 8(b))은 광학 이득에 의해 증폭된 자발적 방출(amplified spontaneous emission process)로 인한 것으로, 높은 에너지 준위의 다중엑시톤에 의해서 광학적 이득이 높은 에너지의 스펙트럼 영역으로 확장된 것이 확인되었다(그림 8(a), (b)).

5. 깜박임 (Blinking)

발광체의 깜박임은 분자체나 고분자 혹은 양자점 등에서 발견되는 현상이다. 그림 9(a)에서 볼 수 있듯이 단일 양자점의 발광 현상을 시간에 따라 관찰해 보면, 연속적으로 발광하는 것이 아니라 깜빡임이 있는 것을 알 수 있다. 이는 여기된 전자와 정공쌍이 재결합 하는 과정에서 빛을 내는 발광 재결합(radiative recombination)과 빛을 내지 않는 비발광 재결합(nonradiative recombination)이 경쟁적으로 일어나기 때문이다. 양자점의 발광 특성을 바이오이미징, LED 등에 응용하게 위해서는 이러한 깜빡임 현상을 최소화하고, 연속적인 발광이 가능하도록 하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해서 특히 Auger 재결합을 억제 시켜야 할 필요가 있다. 로체스터 대학의 Krauss 교수 연구진은 이종구조 양자점에서 계면의 조성변화가 연속적으로 나타

나는 경우 깜박임을 억제할 수 있음을 발표하였다(그림 9).¹⁹

6. 자성 양자점

희박자성반도체(diluted magnetic semiconductor)는 스핀트로닉스 소자의 주요 물질로서 벌크의 III-V족 반도체를 바탕으로 활발히 연구되어 왔다. 반도체에 소량의 전이 금속을 치환하면 불순물로 들어간 금속 이온이 반도체에 자성을 부여하게 되므로 전하가 아닌 스핀을 정보 전달의 매체로 쓸 수 있다는 것이 스핀트로닉스의 주된 개발 방향이다. 양자점의 경우, 빛에 의해 생성된 전자가 양자화된 에너지 준위를 갖게 되므로(그림 10(a)), 상온에서도 열에너지에 의한 자성 저하를 최소화 할 수 있고, 따라서 비교적 높은 온도에서 강자성을 갖는 반도체 설계가 가능해진다. 워싱턴 주립대학의 Gamelin 교수 연구팀은 Mn이 도핑된 CdSe 양자점이 상온에서 자성을 띄며, ~50 K에서 100% 자화율을 보인다는 것을 광발광 스펙트럼을 통해 관찰하였다(그림 10(c)).²⁰ 이는 ~30 K 이하에서 자기적 특

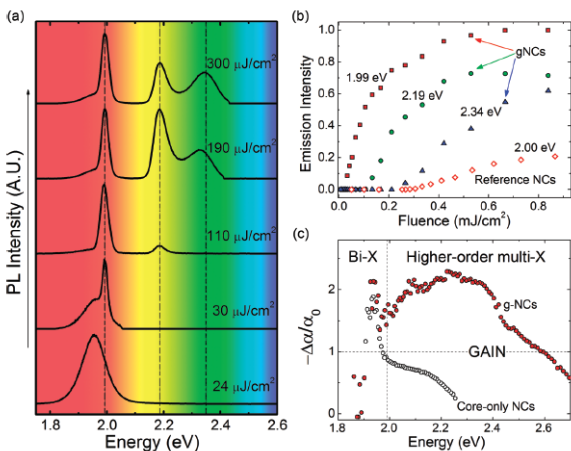


그림 8. (a) g-QD 필름의 방출 스펙트럼: 이 스펙트럼은 붉은 색에서부터 녹색으로까지 ASE의 형성을 보여준다. (b) 증폭된 자발적 방출 피크 위치에서 펌프 세기와 방출 세기의 관계. (c) 광학 이득 스펙트럼.¹⁸

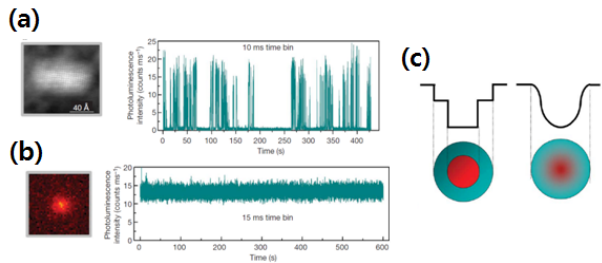


그림 9. (a) 단일 양자점의 시간에 따른 발광 세기, (b) 깜빡임이 억제된 양자점의 시간에 따른 발광 세기, (c) 깜빡임이 억제된 이종구조 양자점의 구조 및 에너지 모식도.¹⁹

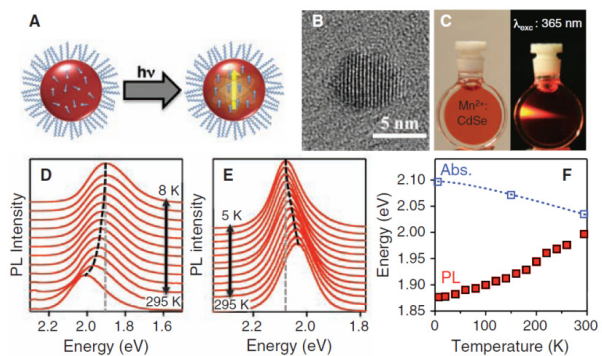


그림 10. (a) Mn 불순물에 의한 CdSe 양자점의 광유도 자기화(photo-induced magnetization) 모식도, (b) Mn 도핑된 CdSe 양자점의 전자주사현미경 사진, (c) 실내용 (왼쪽)과 암실에서 레이저 (오른쪽)에 노출된 Mn²⁺:CdSe 양자점 콜로이드 용액의 사진, (d) Mn이 4.5% 도핑된 CdSe 양자점과 (e) 도핑되지 않은 CdSe 양자점의 온도에 따른 광발광(photoluminescence) 스펙트럼, (f) 온도에 따른 흡수 및 광발광 최대값의 변화.²⁰

성이 관찰되고 5 K에서 75% 자화율을 보였던 기존의 실험적 결과를 뛰어 넘는 것이며 상온에서 자성을 띄는 양자점의 개발이 가능해져 향후 다양한 소자에 응용될 것으로 기대된다.

7. 결론

양자구속효과에 의한 에너지 레벨의 이동 및 양자화로 인해, 양자점은 포논병목현상, 다중엑시톤 생성효율 증가, 레이징, 깜박임 억제 등의 새로운 광물리적 특성을 갖게 된다. 이와 같은 광물리학적 특성 분석 결과들은 양자점이 광전자 소자 분야(optoelectronics)와 바이오이미징 등의 영역에서 주요한 신물질로 활용될 수 있음을 시사한다. 양자점의 광물리적 특성의 제어를 기반으로 새로운 연구분야로의 적용도 기대된다.

참고문헌

1. A. I. Ekimov, and A. A. Onushchenko, *JETP Lett.*, **34**, 345 (1982).
2. L. E. Brus, *J. Chem. Phys.*, **79**, 5566 (1983).
3. V. I. Klimov, *Annu. Rev. Phys. Chem.* **58**, 635 (2007).
4. D. J. Norris and M. G. Bawendi, *Phys. Rev. B*, **53**, 16338 (1996).
5. M. Niemal, D. J. Norris, M. Kuno, M. G. Bawendi, A. L. Efros, and M. Rosen, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 3728 (1995).
6. A. Pandey and P. Guyot-Sionnest, *Science*, **322**, 929 (2008).
7. W. A. Tisdale, K. J. Williams, B. A. Timp, D. J. Norris, E. S. Aydil, and X. -Y. Zhu, *Science*, **328**, 1543 (2010).
8. J. A. McGuire, J. Joo, J. M. Pietryga, R. D. Schaller, and V. I. Klimov, *Acc. Chem. Res.*, **41**, 1810 (2008).
9. V. I. Klimov, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 123118 (2006).
10. V. I. Klimov, A. A. Mikhailovsky, D. W. McBranch, C. A. Leatherdale, and M. G. Bawendi, *Science*, **289**, 1011 (2000).
11. V. V. Matyilitsky, L. Dworak, V. V. Breus, T. Basche, and J. Wachtveitl, *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, 2424 (2009).
12. J. Huang, Z. Huang, Y. Yang, H. Zhu, and T. Lian, *J. Am. Chem. Soc.*, **132**, 4858 (2010).
13. R. D. Schaller, M. Sykora, J. M. Pietryga, and V. I. Klimov, *Nano Lett.*, **6**, 424 (2006).
14. G. Nair and M. G. Bawendi, *Phys. Rev. B*, **76**, 081304 (2007).
15. O. E. Semonin, J. M. Luther, S. Choi, H.-Y. Chen, J. Gao, A. J. Nozik, and M. C. Beard, *Science*, **334**, 6062 (2011).
16. V. Sukhovatkin, S. Hinds, L. Brzozowski, and E. H. Sargent., *Science*, **324**, 1542 (2009).
17. V. I. Klimov, S. A. Ivanov, J. Nanda, M. Achermann, I. Bezel, J. A. McGuire, and A. Piryatinski, *Nature*, **447**, 441 (2007).
18. G. Garcia-Santamaria, Y. Chem, J. Vela, R. D. Schaller, J. A. Hollingsworth, and V. I. Klimov, *Nano Lett.*, **9**, 3482 (2009).
19. X. Wang, X. Ren, K. Kahen, M. A. Hahn, M. Rajeswaran, S. Maccagnano-Zacher, J. Silcox, G. E. Cragg, A. L. Efros, and T. D. Krauss, *Nature*, **459**, 686 (2009).
20. E. Beaulac, L. Schneider, P. I. Archer, G. Bacher, and D. R. Gamelin, *Science*, **325**, 973 (2009).