

양자점 합성의 연구동향

Research Trends in Synthesis of Quantum Dots

김상욱 · 강미재 | Kim, Sang-Wook · Meejae Kang

Department of Molecular Science and Technology, Ajou University,
San 5, Wonchon-Dong, Youtong-Gu, Suwon 443-749, Korea
E-mail: swkim@ajou.ac.kr

1. 서론

양자점은 0차원의 구 형태를 띠는 반도체 나노입자로, 같은 물질임에도 불구하고 벌크물질과는 다른 광학적, 전기적 특성을 보인다. 그 이유는 물질의 크기가 작아지면서 본래 무기 결정이 가지고 있는, 연속적인 에너지 상태로 구성된 밴드가 불연속으로 변하게 되어 특성이 변화하기 때문이다. 이는 양자 제한 효과 (quantum confinement effect)로 설명 가능하며(그림 1(a)) 물질별 양자 제한 효과는 각각의 Bohr radius에 따라 달라진다. 이는 반도체가 갖는 전자, 정공의 유효질량과 유전상수에 따라 결정되는 값으로 알려져 있으며 벌크에서 전자와 정공이 가질 수 있는 최소 거리이다. 입자의 크기가 Bohr radius보다 작아지면 양자 제한 효과가 매우 강하고 크게 나타나며 이것이 물질이 가지고 있는 밴드갭을 불연속적으로 만들게 된다. 밴드갭이 변하게 되면 전도대와 가전자대에서 전자와 정공의 움직임이 달라지면서 광학적, 전기적 특성이 변하고, 이는 나노입자의 크기를 조절하면서 양자 제한 효과를 조절하여 물질에서 우리가 원하는 특성을 쉽게 이끌어 낼 수 있음을 의미한다. 특히 양자점은 형광염료와 비교하여 물질 크기 조절을 통해 높은 양자 효율과 색 순도가 우수한 다양한 스펙트럼 방출이 가능하며(그림 1(c),(d)), 유기 물질이 아니기 때문에 광안정성도 보장할 수 있어 주목 받고 있다. 또한 가시광선 영역뿐만 아니라 다양한 파장에서 발광이 가능한 양자점에 대한 연구가 진행되고 있으며 이를 태양전지, 바이오이미징, 발광 다이오드, 광 검출기 등에 응용하기 위한 연구 또한 활발히 진행되고 있다.

양자점의 연구는 90년대 이후 MIT 대학의 Bawendi 그룹에서 양자효율이 높은 Cadmium 계열의 양자점 합성 방법을 보고한 이후에 가속화 되었으며 현재에는 Cadmium 계열뿐 아니라 II-VI족, III-V족, IV-VI족, I-III-V족 등 다양한 양자점이 보고되고 있는 상태이다. 물질에 따라 양자점의 특성도 함께 변하며 일반적으로 core라고 불리는 양자점 그 자체로는 발광 특성이 양호하지 않다. 하지만 최근 shell로 주위를 감싸거나 alloy 형태로 만들어 특성을 극대화시키는 방법이 보고되고 있다. 이러한 방법을 응용하면 양자점의 효율과 안정성을 동시에 높일 수 있다. 또한 고효율의 양자점은 장치에 응용하는 연구를 할 때에도 훨씬 효과적일 것이며 이러한 양자점 합성 방법은 새로운 양자점의 설계에도 도움이 될 것이다. 여기에서는 core/shell 양자점, alloy 양자점 그리고 도핑 양자점의 합성 연구동향과 그에 따른 특성 증대 효과에 대해 소개하고자 한다.

Author



김상욱
1991 서울대학교 화학과 (학사)
1993 서울대학교 화학과 (석사)
2001 서울대학교 응용화학부 (박사)
2003-2005 MIT 화학과 박사후연구원
2005-현재 아주대학교 분자과학기술학과 부교수



강미재
2011 아주대학교 응용화학공학부 (학사)
2012-현재 아주대학교 분자과학기술학과 석사과정

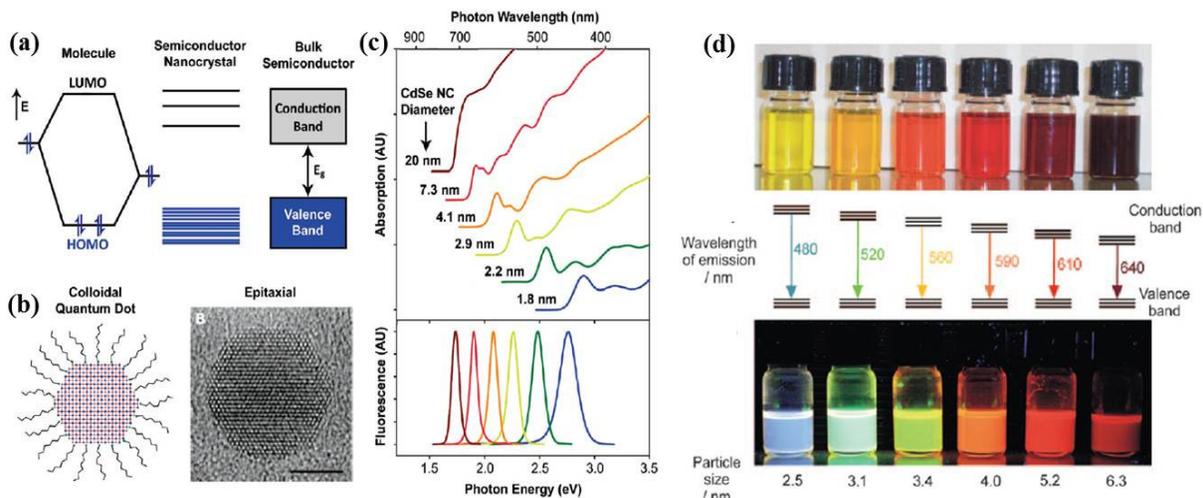


그림 1. (a) 양자 제한 효과(quantum confinement effect)를 설명한 그림, (b) 용액 상 합성법에 의해 만든 양자점을 나타낸 그림으로 무기물 core와 주변 리간드로 구성됨, (c), (d) 크기 변화에 따라 달라지는 흡광도와 형광 스펙트럼을 나타낸 그래프와 시료 사진들.^{1,2}

2. 본론

2.1 Core/Shell 양자점

용액 합성법에 의해 합성되는 양자점의 경우 무기 물질로 이루어진 나노 크기의 core와 이를 안정화 시켜주는 유기 리간드로 구성되어 있다(그림 1(b)).^{1,2} II-VI족, III-V족, IV-VI족, I-III-V족 등의 다양한 양자점이 보고되어 있으며 보통 core 자체는 매우 큰 표면적-부피비를 가지기 때문에 매우 불안정하다. 또한 불안정한 표면에 여기자의 광 결합을 억제하는 트랩이 존재하게 되어 광 발생에 영향을 주고 비 형광적인 에너지 방출을 도모하기 때문에 절대적으로 양자 효율이 낮아지게 된다. 이를 막는 한 방법으로 보고되어 있는 것이 core 자체에 무기물로 이루어진 shell을 둘러싸게 하여 양자점 자체를 안정하게 하는 방법이다. Hines 그룹에서 최초로 보고했으며 이후에 양자점의 안정성과 양자 효율을 높이는 방법의 하나로 core/shell 구조에 대한 연구가 진행되었다.

Core/shell 구조는 type I, type II, reverse type I으로 나뉜다(그림 2).³ 먼저 type I 구조의 경우 core의 밴드갭이 shell의 밴드갭 사이에 위치하여 core와 shell에 존재하는 전자와 정공이 core의 내부에 갇히게 된다(그림 3(a)).⁴ 이로 인해 core/shell 구조를 갖는 양자점에서 일어나는 recombination이 core만 존재하는 양자점에 비해 증가하게 되며 양자 효율의 증가로 이어질 수 있다. 또한 core 표면을 무기물질인 shell이 보호해주기 때문에 표면의 트랩에 의한 영향이 줄어들 수 있으며 외부 요인-물이나 산소에 의한 광퇴화 현상을 줄이고 외부 환경에 대한 민감성을

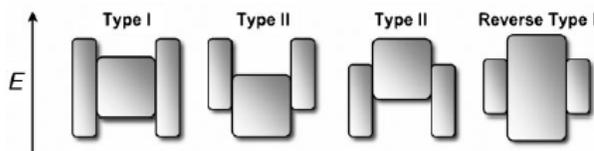


그림 2. 에너지 준위에 따른 core/shell 구조 양자점의 분류.³

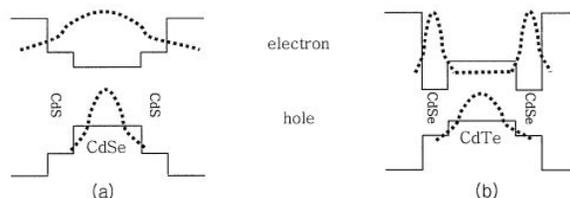


그림 3. (a) Type I 구조에서의 전자와 정공의 분포, (b) Type II 구조에서의 전자와 정공의 분포.⁴

줄일 수 있다. 최초의 type I 은 Hines와 Guyot-Sionnest가 보고한 CdSe/ZnS이며 50%까지 양자효율을 증대시켰다.⁵ 이후 Bawendi 그룹에서 다양한 분석 방법을 통해 470~625 nm의 파장조절이 가능하며 양자효율 30~50%를 갖는 CdSe/ZnS에 대해 분석하여 보고하였다.⁶ CdSe/ZnS의 경우 ZnS의 밴드갭은 CdSe의 밴드갭보다 훨씬 크고 ZnS와 CdSe의 lattice mismatch가 적어 효과적으로 shell로써 작용했다. 양자효율의 증대는 물론이고 광퇴화 현상에 대한 양자점의 안정성이 커졌다. 대표적인 예로 CdSe/CdS, CdSe/ZnSe, InP/ZnS 등이 알려져있다.

Type II의 경우에는 계단식의 밴드 갭 구조를 가지며 shell의 두께와 밴드갭의 위치에 따라 전자와 정공의 갇힘 정도가 달라지게 된다.⁴ 그림 3(b)를 보면 전자의 경우에는

shell에 모일 확률이 높고 정공의 경우 core 쪽에 위치할 확률이 높다. 이러한 계단구조는 밴드구조에서 밴드갭 차이가 적은 부분이 core/shell의 밴드갭으로써 역할을 하게 된다. 이 구조는 shell의 두께에 따라서 상당한 red-shift를 유발한다. Bawendi 그룹에서는 이를 이용해 CdTe/CdSe, CdSe/ZnTe 등이 근적외선(near infrared, NIR) 영역에서도 형광 특성을 내는 것이 가능함을 보여주었다.⁷ 또한 shell의 두께가 늘어나면 바깥 shell에도 전자와 정공이 존재하게 되므로 type I과 마찬가지로 양자 효율의 증가와 광안정성을 기대할 수 있다. 이 구조의 또 다른 장점은 형광의 decay time이 늘어난다는 것이며 이는 전자와 정공이 분리되어 파동 함수의 겹침 현상이 줄었기 때문이다. 이러한 현상을 이용하면 태양 전지에서 전자의 흐름을 도와 주는 중간 삽입 물질로써도 이용될 수 있다.

Reverse type I의 경우 type I의 반대되는 밴드갭 구조를 가지고 있으며 shell의 밴드갭보다 core의 밴드갭이 크다. 따라서 전자와 정공은 상대적으로 바깥쪽 shell에 위치하게 되며 shell의 두께에 따라 형광 파장 조절이 가능하다. 하지만 type II와 같이 red-shift가 상당히 일어난다고 알려져있다. reverse type I의 경우에도 type I과 마찬가지로 shell을 깬 후에 양자 효율이 더 높아졌다는 보고가 있으며 물질의 예로는 CdS/HgS, CdS/CdSe, ZnSe/CdSe 등이 있다.

최근에는 이러한 3가지 type의 core/shell 구조뿐만 아니라 multi core/shell 또한 보고되고 있다(그림 4).³ 특히 두 개, 혹은 세 개의 shell을 쌓아 shell의 효과를 극대화하였다. 이 또한 shell의 물질과 두께를 조절하여 양자 점의 효율을 변화시킬 수도 있다. CdSe/ZnSe/ZnS의 경우 바깥으로 갈수록 밴드 갭이 커지는 구조를 가지고 있다. 또한 cadmium 계열뿐 아니라 친환경 양자점으로 각광 받는 III-V 족 양자점인 InP에 GaP와 ZnS shell을 둘러싸으로써 InP의 양자 효율을 85%로 끌어 올릴 수 있었다.⁸ 이와 다른 구조로 CdSe/ZnTe/ZnS의 경우 CdSe/ZnTe는 type II구조로 한 후에 type I처럼 밴드갭이 큰 ZnS로 감싸주면서 type II구조의 장점인 radiative life time을 늘

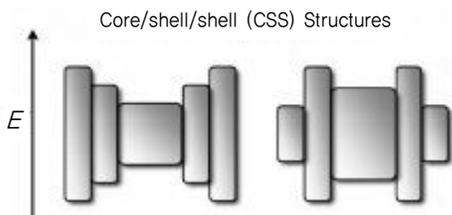


그림 4. Core/shell/shell 구조의 밴드 구조 모식도.³

리고 광안정성을 늘릴 수 있게 설계되었다.⁹

2.2 Alloy 양자점

양자점의 특성이 변화하는 가장 큰 이유는 양자 제한 효과이며 이는 밴드갭의 변화를 야기한다. 따라서 양자점 특성을 변화시키기 위해서는 밴드갭의 변화가 반드시 필요하며 이를 위한 연구의 하나로 shell에 대한 연구와 더불어 alloy 양자점에 대한 연구가 진행되고 있다. Alloy 양자점은 양자점의 조성을 변화하여 양자점의 밴드갭을 조절하는 방법으로 상대적으로 밴드갭이 큰 물질의 비율이 높으면 alloy 양자점의 밴드갭도 증가하고 이와 반대로 성립한다. Alloy 양자점은 도핑 양자점과는 다른 개념이므로 혼동되지 않도록 주의해야 한다. 도핑의 경우 주 물질의 밴드갭이 바뀌는 것이 아니라 전자 에너지 준위가 밴드갭의 사이에 생기면서 낮은 에너지를 갖는 형광 특성을 갖게 되는 것이다. 따라서 주 밴드갭이 조절되는 alloy와는 혼동되어서는 안된다.

Alloy 양자점은 크게 homogeneous alloy와 gradient alloy로 나눌 수 있지만 core/shell 구조에 비해 특성이 분명히 나뉘지는 않는다(그림 5).¹⁰ Alloy 양자점은 구성된 원소에 따라서 3개에서 4개로 이루어 질 수 있으며 예를 들어 CdSe와 CdS가 섞여 있을 시 CdS_xSe_{1-x} 로 표시할 수 있다.

Chalcopyrite 구조의 양자점은 alloy 양자점의 대표적인 예라고 볼 수 있다. 특히 우리는 기존의 Reiss 그룹에서 발표한 chalcopyrite 구조의 대표적인 양자점인 50~815 nm 근적외선 파장에서 발광하는 $CuInS_2$ ¹¹ 구조를 기반으로 ZnS shell을 깬 때의 광학적 특성 변화와 $CuInS_2$ 조성의 변화를 통해 gradient alloy 형태를 보임을 보인 것은 물론 shell을 둘러싼 alloy 형태가 최고 65%의 높은 양자효율을 나타낸 것은 물론 안정성 또한 기존에 비해 향상됨을 보였다.¹²

Alloy 양자점의 경우 합성 시에 monomer의 양이나 성장 시간에 따라 조성의 변화가 가능하다. 양자점의 조성은 위 그림 6의 $CdSe_xTe_{1-x}$ 경우에 Se와 Te의 monomer 양으

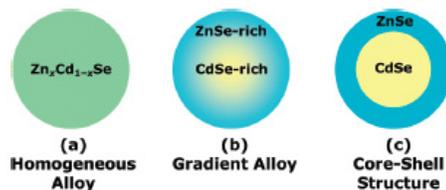


그림 5. 전체적으로 균일한 조성의 alloy, 점차 조성이 바뀌는 alloy와 core/shell의 구조를 비교한 모식도.¹⁰

로도 조절할 수 있으며 그 이유는 Cd과 Te의 반응성이 Cd과 Se의 반응성보다 좋기 때문이다. 그리고 Cd의 양을 과량으로 할 시에는 Se와 Te의 반응성의 차이가 줄어들게 되어 합성의 반응성 조절이 가능하다.¹³ 그림 6(b)의 아래는 같은 크기일 때 양자점의 조성에 따라 형광 스펙트럼의 변화를 보여주고 있다. 그림 6(b)의 형광 스펙트럼의 변화를 보면 Alloy화 된 양자점의 형광 파장의 위치와 각 물질의 형광 파장을 비교했을 때 비선형적으로 변함을 알 수 있다. 이는 optical bowing effect로 설명할 수 있으며(그림 6(a)) 이를 통해 알려진 스펙트럼 범위와는 다른 밴드 갭의 형성이 가능함을 알 수 있다. 이를 이용하면 두 물질의 밴드갭보다 작은 NIR 영역에서 형광 특성을 나타내는 양자점을 합성하는 것도 가능할 것이다.¹³

그리고 또한 흥미로운 연구 중 하나는 core/shell 구조의 양자점을 높은 온도에서 성장시켰을 때 온도가 'alloying point'와 맞을 때 합금화 과정이 진행된다는 연구 결과이다(그림 7).^{14,15} CdSe-ZnSe core/shell을 만든 후에 270 °C를 기준으로 낮은 온도에서는 core/shell 구조를 유지하지만 이보다 높은 온도에서는 alloy를 형성함을 실험을 통해 보였고 이를 Zn²⁺와 Se²⁻의 결합이 약해지고 Zn²⁺가 CdSe 구조체에 들어가면서 생기는 현상으로 설명하였다. 또한

높은 온도에서는 alloy가 더 잘 생성되며 이온의 확산 이동도가 증가함을 밝혔으며 이에 따른 emission의 변화도 보였다. Alloy point에서 성장을 시키면 시간에 따라 형광 파장이 blue-shift가 일어남을 관찰할 수 있는데 이 이유는 바로 더 넓은 밴드 갭을 가지는 ZnSe가 CdSe core에 확산되면서 homogeneous한 alloy가 생성되었기 때문이다. 이 반대의 경우에도 반대의 결과를 보이며 이 또한 ZnSe core에 CdSe가 확산되며 밴드갭 에너지가 감소하기 때문이다.

2.3 Doped 양자점

앞서 2.2절에서 설명했던 대로 alloy의 개념과 도핑의 개념은 다르다. 도핑의 경우 흔히 벌크물질에서 전기적인 특성을 변화하기 위해 쓰이는 것으로 알려져 있는데, 여기에서는 최근 연구가 많이 되고 있는 도핑 양자점에 대해서 알아보고자 한다. 도핑 양자점에 대한 연구는 2001년도에 Kennedy 그룹에서 고품질의 망간 도핑 양자점을 보고하면서 본격화되어졌다.⁶ 도핑은 원래의 물질에 아주 적은 양의 불순물이 밴드갭 사이에 끼어 들어서 전기적, 광학적 특성이 변화함을 의미하며, 전도대에 불순물이 끼어들어 가 불순물이 에너지 레벨을 형성하여 전자를 제공하면 이를 'N형 도핑'이라고 부르고 반대로 가전자대에 불순물이 들

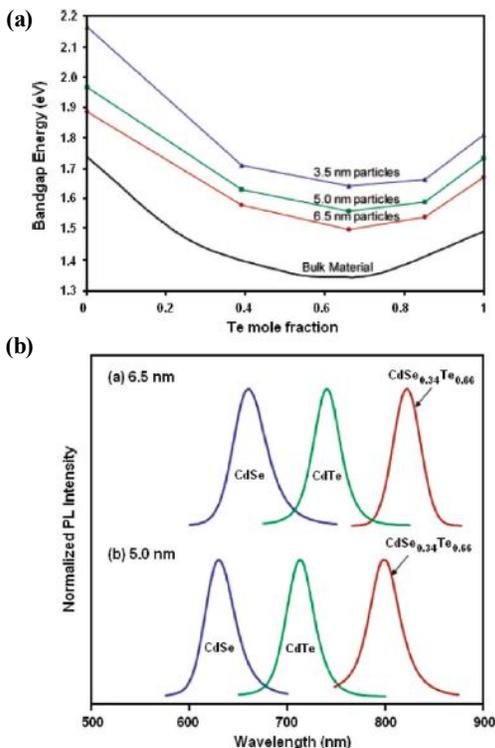


그림 6. (a) CdSe_xTe_{1-x} 조성에 따른 밴드 갭의 변화 그래프, (b) CdSe_xTe_{1-x} 각 크기가 일정할 때 조성에 따른 형광 스펙트럼의 변화 그래프.¹³

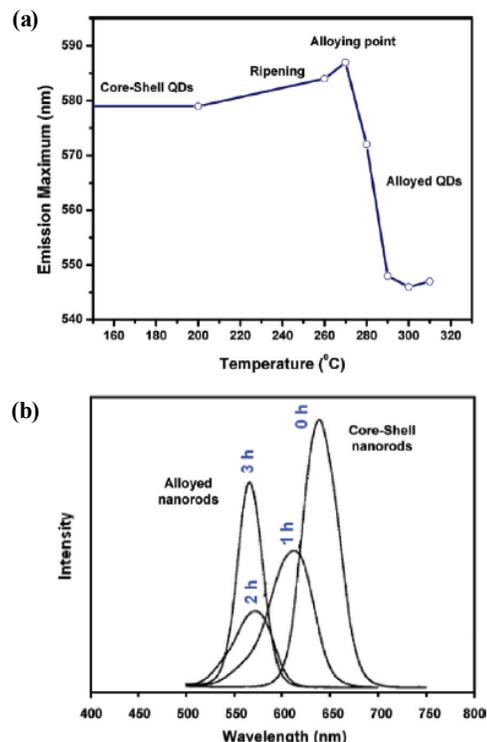


그림 7. (a) Zn_xCd_{1-x}Se alloy 양자점의 alloying point에 대한 그래프,¹⁴ (b) 270 °C에서 성장시킬 때 core/shell에서 alloy로의 변화를 시간에 따라 나타낸 형광 스펙트럼.¹⁵

어가 정공을 여기 시키면 이를 'P형 도핑'이라고 부른다. 이 도핑 현상이 나노입자에서 일어나면 나노 입자의 광학적 특성에 강하게 영향을 미치게 된다.

보고된 도핑 양자점 중에 중심 물질로 많이 사용된 양자점은 ZnSe인데, ZnSe는 초창기 발견 되었을 때 CdSe에 비해 상대적으로 낮은 독성과 광학적 특성으로 CdSe를 대체할 물질로 각광을 받았으나 ZnSe가 가진 문제점인 강한 자가 광퇴화 현상과 열적, 화학적, 광화학적으로 예민한 본질적인 문제점 때문에 응용될 수 없었다. 이를 보완하기 위한 방법으로 고안된 것이 도핑 방법이다.¹⁸ Peng 그룹에서는 도핑의 방법과 불순물에 따라 달라지는 광학적 특성을 보였다.^{17,18} 그림 8(a)는 첫 번째로 반응할 때 불순물을 끼워 넣어 함께 키우는 방법(nucleation-doping)과 두 번째로 중심 물질을 만든 후에 불순물을 넣어 도핑 양자점을 만드는 방법(growth-doping)을 그림으로 나타낸 것이다. 첫 번째의 방법의 경우 monomer 반응을 시킬 때 함께 핵이 형성되도록 하며 핵이 형성되면 온화한 조건에서 불순물이 비활성을 띠도록 하여 핵을 키운다. 이 방법에서는 불순물과 monomer의 비율에 따라 도핑되는 정도가 달라진다. Mn²⁺을 ZnSe에 도핑할 때 사용된 방법으로 그림 8(a)에서 nucleation-doping의 데이터를 보면 중심 물질의 형광 스펙트럼과 Mn²⁺의 형광 스펙트럼이 동시에 나타나거나 monomer의 반응성에 따라 Mn²⁺의 형광 스펙트

럼만 나타나는 것을 볼 수 있다. 두 번째 방법의 경우에는 ZnSe core를 형성한 후에 새로운 조건으로 불순물이 활성화되도록 하여 core의 성장 없이 core의 표면에 붙게 하여 도핑을 하는 방법이다. 이 방법을 이용하여 ZnSe에 d-orbital을 가진 구리 이온을 넣어 도핑을 했다. 성장 시간에 따라 도핑되는 정도가 차이가 나며 이는 그림 8(b)에서 중간 growth-doping 형광 스펙트럼에서 시간에 따른 구리 이온 형광 스펙트럼의 세기 변화를 통해 확인할 수 있다. 그래프를 보면 중심 물질의 형광 스펙트럼의 세기는 줄어들고 구리 이온의 형광 스펙트럼의 세기는 점점 커진다. 그리고 재성장을 통해 ZnSe core의 크기를 키우면 이에 따라 형광 스펙트럼이 red-shift하는 것 또한 확인할 수 있다.

그림 9(a)를 보면 불순물의 이온 종류에 따라 발광 파장이 다름을 눈으로 확인할 수 있고 불순물의 종류, 양 혹은 성장 시간을 조절함으로써 그림 9(c)처럼 형광 스펙트럼을 조절할 수 있다. 이는 ZnSe처럼 파장 조절이 어렵다고 알려진 양자점도 도핑을 통해 파장 조절이 가능하다는 것을 보여 주는 것으로 의미하는 바가 크다. 그림 9(b)는 구리 이온을 도핑한 양자점의 안정성을 보여주는 데이터로 중심에 불순물이 들어 있는 도핑 양자점이 표면에 불순물이 있는 도핑 양자점에 비해서 안정성이 더 큼을 보여 준다. 이를 통해 표면의 불순물이 중심에 존재하는 불순물에 비해서 불안정하며 이 불순물 때문에 광퇴화 현상도 더 많이 일어남을 알 수 있다. 도핑에 관련된 연구로 Norris 그룹에서는 ZnSe의 표면에 Mn²⁺이 잘 붙을 수 있는 면과 그 특성에 대해서 보고하였다.¹⁹ 벌크 상태 물질의 결합 에너지를 결정 구조가 가지는 면에 따라 비교하여 그림 9(d)도 도

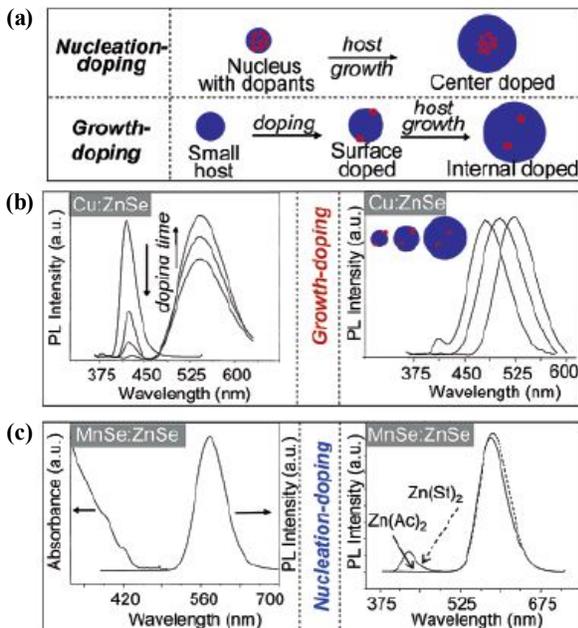


그림 8. (a) Nucleation-doping과 growth-doping의 모식도, (b) ZnSe에 Cu를 growth-doping 했을 때의 형광 스펙트럼, (c) ZnSe에 Mn을 nucleation-doping 했을 때의 형광 스펙트럼.¹⁷

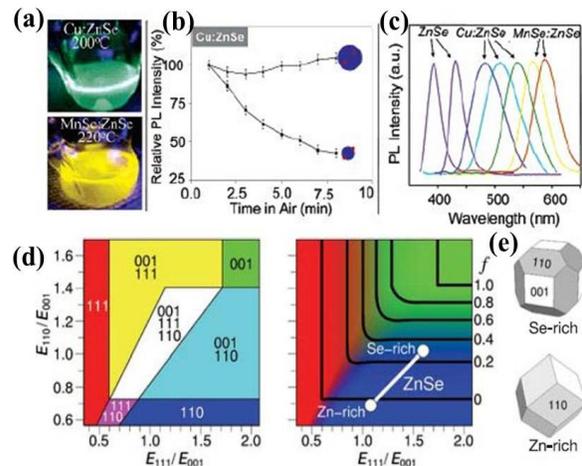


그림 9. (a) Cu:ZnSe와 MnSe:ZnSe의 반응 중 사진, (b) Cu:ZnSe의 공기 중에서의 형광 스펙트럼 변화, (c) ZnSe와 도핑된 ZnSe의 형광 스펙트럼, (d),(e) Cubic 구조에서 Mn²⁺이 도핑이 잘되는 면의 도식화와 ZnSe에서 Zn와 Se가 각각 많을 때의 결정 구조.^{17,19}

식화했으며, 이 결과에 따르면 zinc blende 구조의 (001)에 Mn^{2+} 이온이 잘 붙는다. 이는 곧 그림 9(e)처럼 Se이 많은 구조의 ZnSe에 Mn^{2+} 도핑이 더 잘 됨을 의미한다. 이를 이용하면 wurtzite 구조를 가지는 CdSe도 zinc blende 구조로 바꾸어 도핑을 하거나 다른 zinc blende 구조를 가지는 양자점 또한 도핑을 통해 특성 변화를 유도할 수 있음을 알 수 있다. Mn^{2+} , 구리 이온의 단일 도핑 외에도 ZnSe에 구리 이온과 Mn^{2+} 을 동시에 도핑하여 백색LED에 응용한 보고²⁰도 있으며 CdSe 양자점에 Al^{3+} 나 In^{3+} 를 도핑해 보고한 논문도 있다.²¹

3. 결론

본론에서는 독특한 특성을 나타내고 현재 활발히 연구되고 있는 양자점을 core/shell 구조를 가지는 양자점, alloy 구조를 가지는 양자점 그리고 도핑 양자점으로 나누어 살펴보았다. 양자점은 20년간 많은 연구자들이 연구를 거듭한 결과 초창기에 비해 놀라운 발전을 이뤄 왔다. CdSe를 시작으로 발전된 양자점은 2010년대로 들어와서 앞서 살펴본 양자점 이외에도 각 종류의 물질에 따른 다양한 특성과 초창기의 양자점보다 월등한 안정성과 양자 효율을 가지는 양자점의 합성이 가능하게 되었다. 궁극적인 목표인 바이오이미징, 태양 전지, LED, 디스플레이 등의 핵심 소재로 응용하기 위한 연구 또한 활발히 진행되고 있으며 가까운 미래에 상용화를 기대할 수 있을 것으로 전망된다. 하지만 현재까지 눈에 띄는 광학 특성을 지니는 양자점의 경우 cadmium 기반의 양자점이 대다수이다. 이는 독성 문제와 더불어 합성 또한 비 친환경적이고 산업화가 어려울 만큼의 소량 생산만이 가능하기 때문에 이는 양자점의 상용화에 큰 걸림돌로 작용하고 있는 실정이다. 현재 III-V 족의 InP와 다른 여러 종류의 양자점들이 연구되고 있고 앞서 살펴본 양자점의 특성을 극대화시키는 방법들이 개발되면서 짧은 시간 동안 많은 성과를 이뤄내기는 했지만 cadmium 기반의 양자점에 비해서는 아직 턱없이 부족한 광학특성을 나타내고 있다. 따라서 독성과 환경 문제, 고품질 양자점의 대량 생산 문제에 대한 보완이나 이런 문제를 해결해 줄 수 있는 새로운 양자점에 대한 연구가 무엇보다 절대적으로 필요한 시점이다. 이미 보고되고 알려진, 본문에서 살펴봤던 방법들을 사용하여 새로운 양자점의 연구도 가능할 것이며 이 방법 외의 다른 양자점의 효율을 극대화시킬 수 있는 방법의 연구가 가능할 것이다. 양자점 상용화에 걸림돌이 되는 이 문제들이 해결되면 유

기 형광염료보다 뛰어난 특성을 보이는 양자점의 응용이 본격화될 것이며 이는 양자점의 산업화, 상용화를 앞당기는 물론 현재 알려진 응용 분야 이외에도 여러 부분의 쓰임이 가능해질 것이다.

참고문헌

1. A. M. Smith, and S. Nie, *Acc. Chem. Res.*, **43**, 190 (2010).
2. H. Goessmann, and C. Feldmann, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **49**, 1362 (2010).
3. P. Reiss, M. Protiere, and L. Li, *Small*, **5**, 154 (2009).
4. 고창현, *나노구조소재를 이용한 LED 최신동향III*, 화학공학연구정보센터(전문연구정보), <http://www.cheric.org/ippage/ip.php?code=p200401> (2004).
5. M. A. Hines, and P. Guyot-Sionnest, *J. Phys. Chem.*, **100**, 468 (1996).
6. B. O. Dabbousi, J. Rodriguez-Viejo, F. V. Mikulec, J. R. Heine, H. Mattoussi, R. Ober, K. F. Jensen, and M. G. Bawendi, *J. Phys. Chem. B*, **101**, 9463 (1997).
7. S. Kim, B. Fisher, H. J. Eisler, and M. Bawendi, *J. Am. Chem. Soc.*, **125**, 11466 (2003).
8. S. Kim, T. Kim, M. Kang, S. K. Kwak, T. W. Yoo, L. S. Park, I. Yang, S. Hwang, J. E. Lee, S. K. Kim, and S.-W. Kim, *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 3804 (2012).
9. C. T. Cheng, C. Y. Chen, C. W. Lai, W. H. Liu, S. C. Pu, P. T. Chou, Y. H. Chou, and H. T. Chiu, *J. Mater. Chem.*, **15**, 3409 (2005).
10. M. D. Regulacio, and M. -Y. Han, *Acc. Chem. Res.*, **43**, 621 (2010).
11. L. Li, J. Daou, I. Texier, T. T. K. Chi, N. Q. Liem, and P. Reiss, *Chem. Mater.*, **21**, 2422 (2009).
12. J. Park and S.-W. Kim, *J. Mater. Chem.*, **21**, 3745 (2011).
13. R. E. Bailey and S. M. Nie, *J. Am. Chem. Soc.*, **125**, 7100 (2003).
14. X. H. Zhong, M. Y. Han, Z. L. Dong, T. J. White, and W. Knoll, *J. Am. Chem. Soc.*, **125**, 8589 (2003).
15. H. Lee, P. H. Holloway, and H. Yang, *J. Chem. Phys.*, **125**, 164711 (2006).
16. D. J. Norris, N. Yao, F. T. Charnock, and T. A. Kennedy, *Nano Lett.*, **1**, 3 (2001).
17. N. Pradhan, D. Goorskey, J. Thessing, and X. Peng, *J. Am. Chem. Soc.*, **127**, 7586 (2005).
18. N. Pradhan and X. Peng, *J. Am. Chem. Soc.*, **49**, 3339 (2007).
19. S. C. Erwin, L. Zu, M. I. Haftel, A. L. Efros, T. A. Kennedy, and D. J. Norris, *Nature*, **436**, 91 (2005).
20. S. K. Panda, S. G. Hickey, H. V. Demir, and A. Eychmüller, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **50**, 4432 (2011).
21. A. W. Wills, M. S. Kang, K. M. Wentz, S. E. Hayes, A. Sahu, W. L. Gladfelter, and D. J. Norris, *J. Mater. Chem.*, **22**, 6335 (2012).