

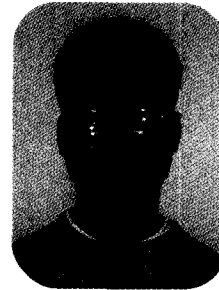
반도체 나노 입자의 합성과 응용



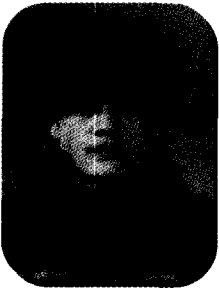
· 조경아 ·
고려대
전기공학과 계약교수



· 이준우 ·
고려대
전기공학과 석사과정



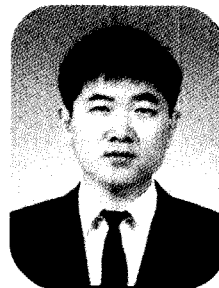
· 김진형 ·
고려대
전기공학과 석사과정



· 송현우 ·
고려대
전기공학과 석사과정



· 김현석 ·
고려대
전기공학과 박사과정



· 김상식 ·
고려대
전기공학과 부교수

1. 서론

지금까지의 반도체 소자 기술의 핵심인 실리콘 소자 공정은 향후 소자의 물리적 한계, 집적공정상의 어려움, 소형 선폭 제작으로 인한 장비 투자의 과도한 증가 등의 문제로 인해 새로운 개념의 소자 제작 기술이 요구되고 있다. 따라서 미국, 일본 등의 기술 선진국을 포함하는 많은 국가에서 기존의 실리콘 CMOS 구조와는 다른 새로운 개념의 양자소자, 자성 소자, 분자소자 등의 개발을 서두르고 있는 실정이다. 이러한 연구 중에서 차세대 광 및 전자 소자의 소재로 충분한 이용 가능성을 보이는 나노 입자에 대

한 연구가 지난 수 년간 활발하게 진행되어 다양한 분야에서의 응용이 기대되고 있다.(그림 1)

나노 입자의 크기가 벌크에서의 엑시톤 보어 반지름(Bulk exciton Bohr radius)보다 비슷하거나 작아질 때, 벌크와는 다른 물리, 화학적 특성을 나타내게 된다. 구체적인 예로써 불연속적인 에너지 상태 밀도, 입자의 크기가 작아짐에 따라 에너지 갭의 변화 등의 양자 구속 효과(Quantum Confinement Effect)가 나타나게 된다. 그림 2에서 보듯이 나노 입자의 경우 에너지 상태 밀도가 벌크와는 다른 특성을 보이고 있는 것을 알 수 있는데, 이러한 특성으로 인해 나노 입자를 광소자로 이용할 경우 발광 및 수광 효율을

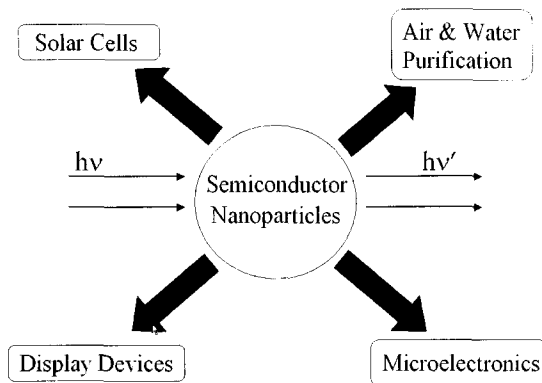


그림 1. 반도체 나노입자의 응용성.

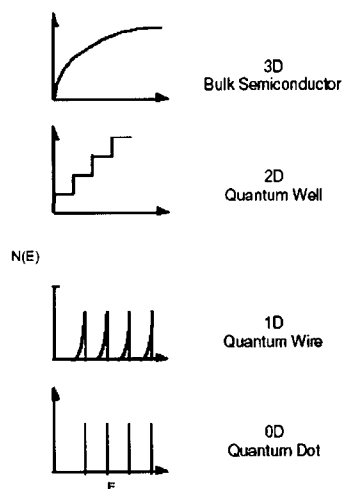


그림 2. 차원에 따른 에너지 상태 밀도.

크게 향상시킬 수 있다. 이와 더불어 나노입자의 큰 장점 중의 하나는 입자의 크기에 따른 에너지 갭의 변화를 들 수 있으며, (그림 3) 이러한 변화는 다음과 같은 근사식으로 표현된다.[1]

$$\Delta E \approx \frac{\hbar^2 \pi^2}{2R^2} \left[\frac{1}{m_c^*} + \frac{1}{m_h^*} \right] - \frac{1.8e^2}{\epsilon R} \quad (1)$$

여기서 R은 나노 입자의 반지름이고, ϵ 은 벌크에서의 유전 상수, e는 전자의 전하량을 나타내며 m_c^* 와 m_h^* 는 각각 전자와 정공의 유효질량(effective

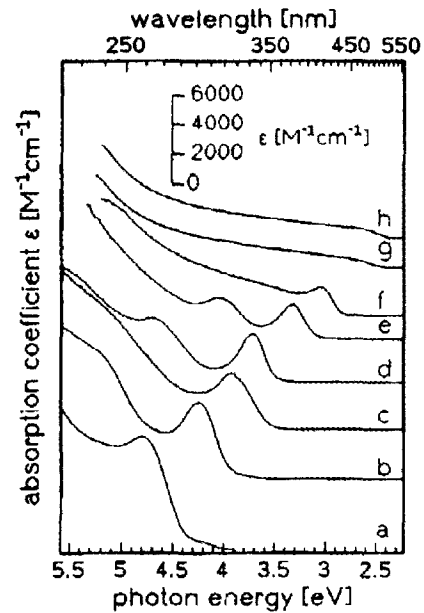


그림 3. 입자크기에 따른 CdS 나노입자의 흡광 스펙트럼 (a) 6.4 (b) 7.2 (c) 8.0 (d) 9.3 (e) 11.6 (f) 19.4 (g) 28 (h) 48 nm.

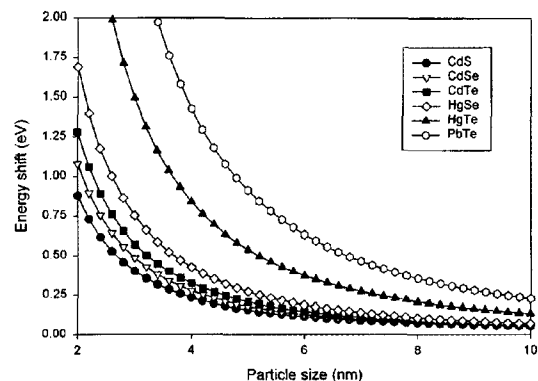


그림 4. 반도체 나노입자의 크기에 따라 계산되어진 에너지 이동.

mass)을 나타낸다. 위의 식을 통해 볼 때, 입자의 크기가 감소함에 따라 에너지 갭이 증가하는 현상을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 나노 입자의 크기를 변화시켜 가시광선 영역을 비롯한 자외선, 적외선 영역 등의 원하는 파장 대역에서 사용가능한 소자의 소재로써 나노 입자를 이용할 수 있다. 그림

3은 CdS 나노 입자의 크기에 따른 흡광 스펙트럼으로, 입자의 크기가 작아짐에 따라 흡수가 시작되는 파장이 짧아지는 현상을 볼 수 있다[2]. 이러한 나노 입자의 크기를 조절하는 방법으로는 합성 조건을 변화함에 따른 크기 조절 방법과 합성 후에 침전제와 원심분리를 통해 크기를 분리하는 방법 등이 있다.

2. 나노 입자의 합성 및 특성

나노입자는 기상 증착법, 액상 합성법, 고상 합성법 등의 방법으로 제조될 수 있다. 각각의 합성 방법에 따른 장단점이 있으나, 여기서는 액상 합성법을 이용한 나노 입자의 연구에 대해 살펴보려 한다. 액상 합성법의 장점으로는 합성 단가가 매우 경제적

이며, 다양한 합성조건을 조절로써 선택적 크기의 합성과 합성 후 크기에 따른 분리 실험을 통해 고른 크기분포를 갖는 나노 입자를 형성할 수 있다는 것이다. 표 1은 액상 합성법으로 제조된 여러 반도체 나노 입자들과 그 크기를 나타내고 있다.

액상 합성법 중 하나로써 가장 연구가 활발하게 진행 중인 것으로 콜로이드 방법(colloidal method)이 있다. 입자의 성장을 방지하고 용해도를 증가시키는 캡핑 리간드(capping ligand or stabilizer)를 이용하여 나노 입자를 합성하는 방법이다. 이러한 캡핑 리간드의 종류에 따라 유기물을 이용하는 유기물 캡핑(organic capping)과 무기물을 이용하는 무기물 캡핑(inorganic capping)이 있다. 무기물 캡핑은 일반적인 경우, core/shell 구조를 이루고 있으며, core보다 더 큰 밴드갭을 갖는 물질을 이용하여 shell을 형성한다. 이러한 무기물 캡핑은 양자우물(quantum well) 구조를 형성할 수 있으며, 표면 결함을 줄일 수 있어 발광 효율을 증가시키는데 장점이 있다. 그림 5는 콜로이드 방법으로 합성된 CdTe 나노 입자의 크기에 따른 Photoluminescence(PL) 스펙트라이다[3]. CdTe 나노 입자의 크기에 따라 540~700nm의 파장 대역에서 발광하는 것을 볼 수 있다.

일반적인 콜로이드 합성 방법에 관해 그림 6에서 나타내었다. 그림 6은 유기물 캡핑 물질로 thiol을 이용하여 CdTe 나노 입자를 합성하는 방법을 보여주고 있다. 콜로이드 방법으로 합성된 나노 입자는 반응 초기에 관여하는 반응 전구체 물질들의 농도, 유기 리간드들의 종류, 농도, 반응 용액의 pH, 반응 온도, 그리고 반응시의 가스 분위기 등의 많은 합성 조건에 의해 그 크기와 성질에 많은 영향을 받는다. 한

표 1. 현재까지 합성되어진 반도체 나노입자의 종류와 크기[reference 참조].

종류	[ref]	particle size range/nm
Si(sillica coated)	[4]	2-10
Ge[]	[5]	2-60
GaN	[6]	3
GaP	[7], [8]	2-21
GaAs	[9], [7]	4.5-36
InP	[8]	2-6.5
InAs	[10], [11]	2.5-16
Cd3P2	[12], [13], [14], [15]	1-4
Cd3As2	[16]	
Zn3P2	[13], [14]	1-2.5
CdS	[17], [18]	1.5-9
CdSe	[19], [20]	1.2-11.5
CdTe	[19]	2-3
ZnS	[21], [22]	3.5-4.2
ZnSe	[23]	3.5-4.2
PbS	[24], [25]	1.3-20
PbSe	[26]	2-20
Cd(OH)2/CdS	[27]	4-6
CdS/SiO2	[28], [29]	40-300
CdS/SiO2	[28], [29]	40-300
CdS/CdSe	[30]	4-6
PbS/CdS	[31], [32]	6-8
ZnS/CdS	[33]	4.6
CdSe/ZnS	[34]	4.5
ZnSe/CdSe	[35], [36]	4-6.8
CdS/HgS/Cds	[37], [38]	8
GaInP2	[8]	2.5

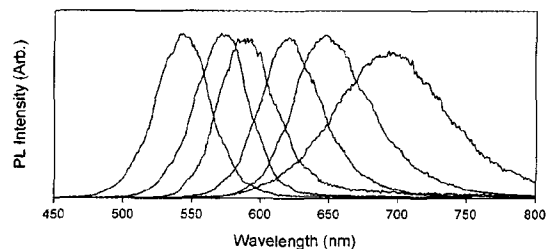


그림 5. CdTe의 나노입자 크기가 커질수록 PL의 peak는 장파장으로 이동한다.

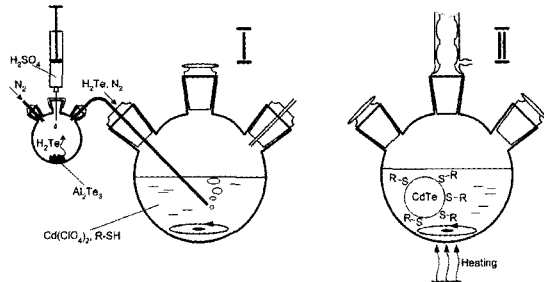


그림 6. Thiol-capped CdTe의 합성과정. 1st stage : H₂Te gas의 주입에 의한 CdTe precursors의 형성. 2nd stage : Reflux에 의한 증가된 CdTe nanocrystals의 성장.

예로 캡핑 유기물의 종류에 따른 CdTe 나노 입자의 합성 조건과 그에 따른 발광 효율의 변화를 표 2에 나타내었다. 형성된 나노 입자들이 더 이상 성장하지 않도록 막아주는 능력에 따라 나노 입자의 크기가 결정되기 때문에, 캡핑 물질의 종류는 나노 입자의 물성 변화에 많은 영향을 끼치게 되는 것이다. 특히 PL 스펙트라에서 보여지는 발광 효율은 캡핑 물질의 종류에 따라 큰 차이를 보이는 것으로 나타나고 있다.

그림 7은 합성 후 지난 시간과 열처리에 의한 HgSe 나노 입자의 발광 특성 변화를 나타내고 있다. 유기물 캡핑만으로 형성된 HgSe 나노 입자는 합성 후 시간이 경과함에 따라 안정하지 못한 것을 보여주고 있다. 합성 후 1시간이 지난 후에는 930nm 부근에서 피크가 나타나고 있으나 1일이 지난 시료에서는

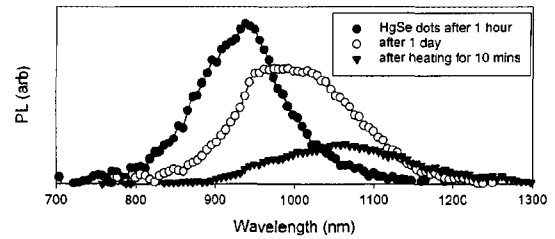


그림 7. 유기물로 캡핑된 HgSe 나노입자의 시간과 열에 의한 광학적 특성 (photoluminescence)의 열화.

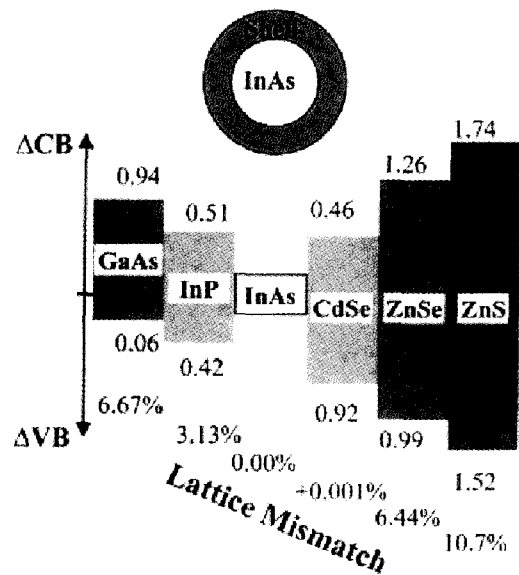


그림 8. InAs 나노입자에 shell물질로 이용될 수 있는 반도체 물질들의 band offset과 lattice mismatch.

표 2. CdTe 나노입자 합성조건에 따른 PL 변화.

Stabilizer	pH used for the synthesis	Stability of CdTe QDs	typical PL QE of as-prepared CdTe QDs
2-mercaptoethanol	11.2-11.8	stable	< 1%
1-thioglycerol	11.2-11.8	stable	3%
mixture(1 : 1) of 1-thioglycerol and 2,3-dimercapto-1-propanol	11.2-11.8	moderate	6%
thioglycolic acid(TGA)	11.2-11.8	stable	10%
2-mercaptoethylamine(MA)	5.6-5.9	moderate	10%
1-cysteine	11.2-11.8	moderate	10%
2-(dimethylamino)ethanethiol	5.0-6.0	moderate	30%

1000nm 정도에 폭이 넓은 피크가 나타나고 발광의 세기도 약해지는 것을 보여주고 있다. 시간이 지남에 따라 이러한 변화를 aging 효과라 하며 소자의 구현시 문제가 되고 있다. 또한 10분동안 열처리를 한 시료의 PL 스펙트럼에서는 피크의 크기가 매우 감소한 것을 볼 수 있는데 유기물의 열적 불안정성이라는 큰 문제를 나타내고 있는 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 무기물로 나노 입자를 캡핑하는 core/shell 구조의 나노 입자를 합성하는 방법이 대두되고 있다.

Core/shell 구조의 나노 입자는 유기물로만 캡핑된 나노 입자에 비해 시간이나 환경 변화에 대하여 그 특성이 변하지 않는다는 연구들이 보고되고 있다. 이러한 core/shell 구조 형성시 shell을 이루는 물질은 core 물질과 전도 대역과 가전자 대역의 상대적 에너지 차이와 결정 격자 상수 차이 등의 물성을 고려하여 선택해야 한다. 그림 8은 core 물질이 InAs일 경우 어떠한 물질들이 shell 물질로 이용될 수 있는지를 보여준다. ZnS를 shell 물질로 선택할 경우 전도 대역과 가전자 대역의 에너지 차이가 매우 커서 매우 좋은 양자 우물 효과를 보여 전자와 정공의 구속 효과를 클 수 있겠지만 격자 상수의 차이가 10% 이상이나 되어 core와 shell 사이의 interface에서 많은 결함으로 인한 발광 효율의 저하를 가져올 수 있는 요인이 되어 좋은 shell 물질이 될 수 없다. 그림 9는 InAs 나노 입자에 CdSe와 ZnSe로 무기 캡핑을 하여 InAs/CdSe와 InAs/ZnSe의 core/shell 구조 나노 입자가 유기물로만 캡핑된 InAs 나노 입자에 비하여 시간과 환경 변화에 매우 안정적이라는 결과를 보여준다. 그림 9의 A, B, 그리고 C에서 아래쪽의 스펙트라는 합성 직후 나노 입자의 PL(점선)과 absorption(직선)의 스펙트라이며, 위쪽의 스펙트라는 10개월동안 산소분위기에 보관한 나노 입자들의 스펙트라이다. A는 유기물로만 캡핑된 InAs 나노 입자, B는 InAs/CdSe 나노 입자, 그리고 C는 InAs/ZnSe 나노 입자에 대한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 유기물로만 캡핑된 InAs 나노 입자의 경우는 열 달 동안 산소분위기에 보관하게 되면, 발광효율이 40배 정도 감소하나, CdSe나 ZnSe로 캡핑이 되어져 있을 경우, 발광효율은 산소분위기에 10개월 동안 보관하여도 3~4% 정도만

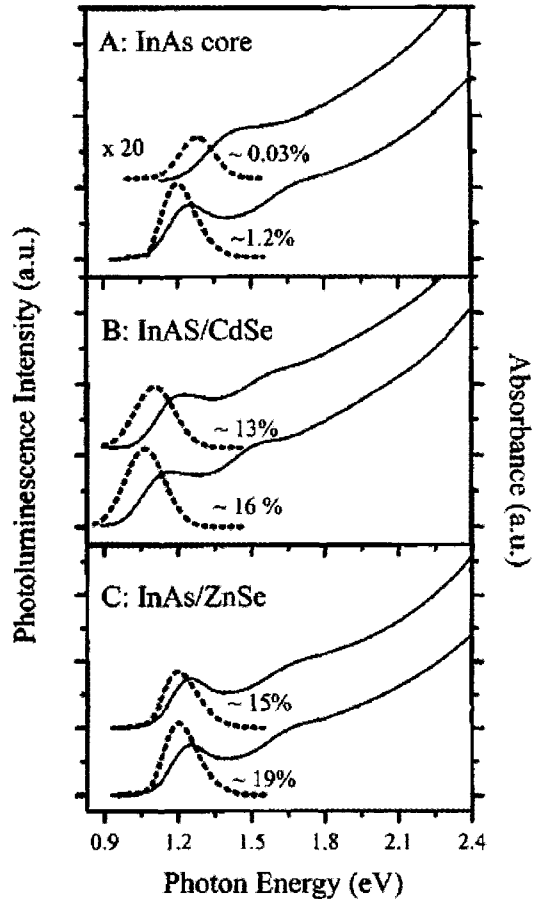


그림 9. A: bare InAs 나노입자, B: InAs/CdSe, C: InAs/ZnSe 의 안정성 비교. InAs/ZnSe core/shell의 안정성비교. 아래 그림은 합성 직후의 광학특성[absorption spectra(solid line)과 PL spectra (dashed line)]. 위 그림은 산소 분위기에서 10달 경과 후의 광학특성.

감소한다. 또한 합성 직후의 발광 효율도 무기물로 캡핑된 경우가 10% 이상인 것에 비하여 유기물로 캡핑된 경우 1.2%로 상당한 차이를 보이고 있는 것으로 나타났다. 따라서 발광 효율과 안정성 양 측면에서 볼 때, 무기물로 캡핑된 나노 입자가 소자로의 응용을 위해 적합하다고 생각되어진다.

합성된 나노 입자의 크기는 앞서 살펴본 바와 같이 크기에 따른 에너지 갭의 변화로부터 계산하는 방법과 나노 입자의 X-ray Diffraction(XRD)법을 이용하

는 방법, 투과전자현미경(Transmission Electronic Microscopy : TEM)을 사용하여 직접적으로 나노 입자 크기를 관찰하는 방법 등이 있다. XRD 방법을 이용하게 되면 나노 입자의 크기에 따른 피크의 폭의 변화를 이용한 Scherrer 식(2)으로부터 그 크기를 계산할 수 있고, 또한 나노 입자의 결정 구조를 알 수도 있다.

$$d = \frac{0.9\lambda}{B \cos\theta} \quad (2)$$

여기서 d는 합성된 나노입자의 크기, λ 는 XRD 측정시 사용한 x-선의 파장, θ 는 main peak의 라디안 값, B는 피크의 FWHM (full width at half maximum) 값이다.

그림 10은 입자 크기가 커짐에 따라 XRD의 피크의 폭이 넓어지는 현상을 보여주는 예이다. 그림에서 보여주는 XRD 결과는 본 연구실에서 합성한 cubic 구조의 HgTe 나노 입자로 앞서 기술한 바와 같이 합성시 사용되는 캡핑된 유기물의 종류에 따라 합성된 나노 입자의 크기가 달라지게 되는 것을 피크의 폭으로부터 알 수 있다. Scherrer 식으로부터 계산되어진 HgTe 나노입자의 크기는 각각 thioglycerol 을 유기 캡핑제로 사용할 때에는 2.2nm, ethylenediamine 을 유기 캡핑제로 사용할 때에는 7.6nm였다. 일

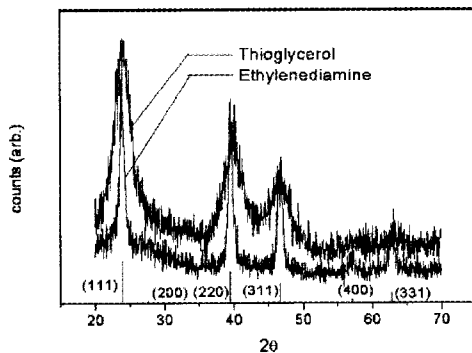


그림 10. 본 연구실에서 합성한 HgTe 나노입자. XRD peak broadening에 의해서 계산된 나노입자의 크기는 유기안정제로 1-thioglycerol 사용시 2.2nm, Ethylenediamine 사용시 7.6nm. 나노입자의 크기가 작을수록 XRD peak의 broadening은 증가.

반적으로는 XRD 피크의 폭으로부터 물질의 결정성을 알 수 있으나, 나노 입자의 경우에는 입자의 크기에 의해 피크의 폭의 변화가 나타나기 때문에 XRD 패턴으로 합성된 나노 입자의 결정성을 판단하기가 어렵다. 따라서 나노 입자의 결정성을 알기 위하여 TEM에서 Selected Area Electron Diffraction(SAED)를 이용할 수 있다. TEM은 나노 입자의 크기와 모양, 결정성 등을 알 수 있는 유용한 분석 방법이다. 그림 11는 HgTe 나노 입자의 TEM 사진으로, 합성된 나노 입자들의 결정성이 매우 좋다는 사실을 알 수 있다. 그림 12는 CdSe/CdS 나노입자의 XRD와 SAED 결과로 (a)는 shell 물질로 이용된 CdS, (c)는 core 물질인 CdSe, 그리고 (b)는 CdSe/CdS 나노 입자 구조 분석의

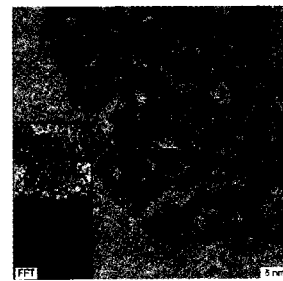


그림 11. HgTe 나노입자들의 TEM image.

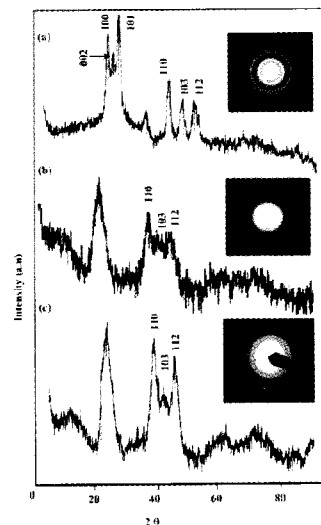


그림 12. (a) CdS, (b) CdSe, (c) CdSe/CdS 나노 입자들의 XRD와 SAED patterns.

예를 보여주고 있다.

3. 나노입자의 응용

반도체 나노 입자는 앞에서 설명하였듯이 벌크와는 다른 특이한 성질들 때문에 여러 분야에 있어서 응용 가능성을 갖는다. 특히, 반도체 나노 입자를 디스플레이 소자에 소재로써 사용하면 단일 물질로 완벽한 색상을 구현할 수 있기 때문에, 90년대 U. C. Berkley 대학에서 CdSe 나노 입자를 이용하여 LED를 구현하는 것을 시작으로 현재까지 연구가 계속되고 있다. 그림 13은 나노 입자가 광소자의 발광층의 소재로 사용된 LED의 개략도이다. 이러한 구조에서 전자는 나노 입자로 주입되고 정공은 폴리머에서 주입되는 나노 입자층과 폴리머의 hybrid 형태를 갖게 된다. 전자와 정공은 나노 입자에서 재결합하며 발광 파장은 소자에 사용된 나노 입자의 크기에 의해 결정된다. 파장에 따라 가시광 영역에서는 CdSe, CdTe, CdS 등의 나노 입자, 적외선 영역에서는 HgTe, HgSe 등의 나노 입자가 연구되고 있다. 예를 들어 HgTe 나노 입자의 경우 상온에서 HgTe의 벌크의 에너지 갭이 대략 0eV 부근이므로 그 크기를 줄임에 따라 적외선 전 영역에 걸쳐 파장을 가변할 수 있다. 이를 이용하면 광통신용(1.3, 1.5 μ m) 발광 및 수광 소자뿐만 아니라 의료용 레이저 및 군사용 목적으로 이용되는 적외선 감지 소자에도 적용할 수 있을 것이다. 발광 소자와 더불어 수광 소자의 소재로의 응용을 위한 연구도 이루어지고 있다. 현재 박막의 필름 증착을 통한 양자 우물 구조를 이용한 수광 소자는 입사된 빛의 편광 방향에 따라 수광 효율의 큰 차이가 나는 문제점을 가지고 있다. 이러한 점을 해결하기 위하여 수광 소자의 입사면의 경사를 주는 방법 등의 연구가 진행되었지만 근본적인 문제를 해결하기에는 미흡한 실정이다. 나노 입자를 수광 소자의 소재로써 사용할 경우 나노 입자의 등방적인 수광 효율을 통해 이러한 문제점을 해결할 수 있다. 또한 조사된 광에 의해 생성된 전자-정공쌍을 신호로 처리하는 이동경로에 대한 문제점을 해결한다면 더 큰 수광 효율을 가질 수 있을 것으로 기대된다. 그림 14는 CdSe 나노 입자의 크기에 따른 광전류 특성을

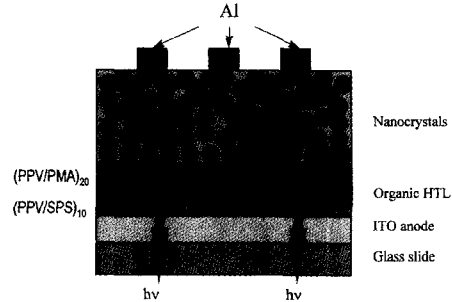


그림 13. 나노입자를 이용한 LED(light emitting diode)의 모식도.

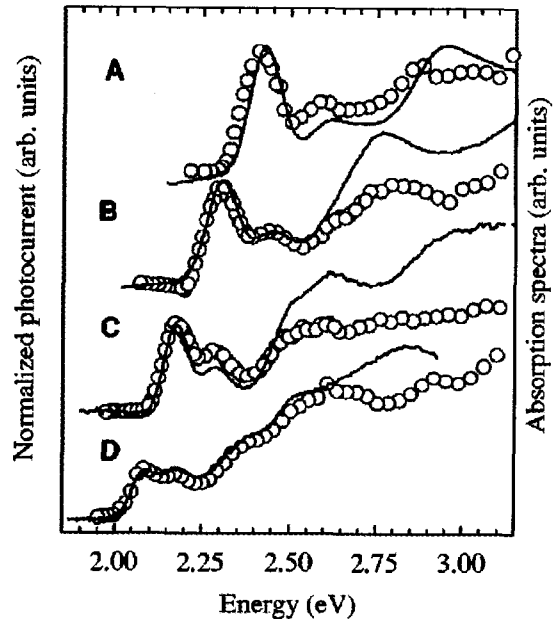


그림 14. CdSe 나노 입자의 크기에 따른 흡수 스펙트럼과 여기 파장에 따른 광전류 크기 (입자의 크기 -A:1.75nm, B:2.06m, C:2.5nm, D:3.0nm)

흡수 스펙트럼과 비교하여 보여주고 있다. 앞서 설명한 바와 같이 입자의 크기가 작아짐에 따라 흡수가 시작되는 에너지가 커지는 것을 볼 수 있다. 또한 조사하는 광의 파장에 따라 광전류의 크기를 나타내고 있는데 흡수 스펙트럼과 거의 비슷한 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 통해 나노 입자에서 흡수된 광에 의해 전자-정공쌍이 생성되고, 생성된 전하가 광전류에 기여를 한다는 것을 알 수 있다. 이러한 수광

소자로의 응용을 위한 광전류 실험이 밖에도 CdS, CdTe 등의 나노 입자를 이용한 수광 소자 연구 결과도 보고되고 있다.

또한 차세대 전자 소자로 대두되고 있는 단전자 트랜지스터 (Single Electron Transistor: SET)로의 응용도 가능하다. 그림 15는 이에 대한 SET의 대략적인 구조를 보여주고 있다.

마지막으로, 나노입자를 이용한 hybrid solar cell의 연구에 대해 살펴보고자 하겠다. 나노 입자가 hybrid solar cell의 소재로서 사용될 수 있는 것은, 나노입자가 염료감응형 태양전지(Dye-sensitization solar cell : DSSC)에 사용되는 감응제인 염료에 비해 열적, 화학적으로 안정하고, 자외선에 강할 뿐 아니라 전하이동속도가 빠르기 때문이다. Hybrid solar cell의 구조는 DSSC와 같이 투명 전도성 유리 위에 TiO 층과 감응제로 이용되는 나노 입자로 이루어진다. 감응제로

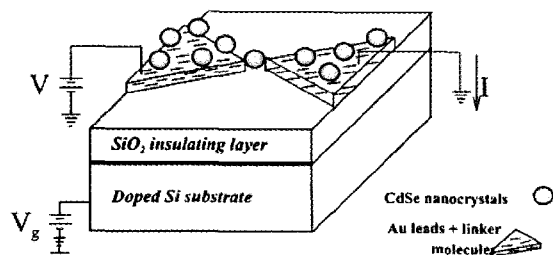


그림 15. 나노입자를 이용한 SET(single-electron transistor)의 모식도.

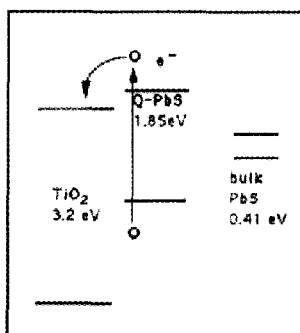


그림 16 PbS Q.D./TiO₂ interface와 bulk PbS/TiO₂ interface band diagram. 크기조절에 의해 PbS 나노입자를 hybride solar cell에 이용 가능성을 나타냄.

나노 입자를 사용한다는 점을 제외하면, 기존의 DSSC 구조와 동일하다. Hybrid solar cell에서 감응제로 사용되는 나노 입자의 종류로는 InP와 PbS, CdS, CdSe 등과 같은 chalcogenide 나노 입자이며, 이러한 나노 입자들은 앞서 살펴본 콜로이드방법으로 합성할 수 있다. 그림 16에서 볼 수 있듯이, 나노 입자의 경우 크기조절을 통한 밴드갭 조절이 가능하므로, 빛에 의해 생성된 전자들이 TiO를 거쳐 투명전도성유리(Transparent Conducting Oxide : TCO)로 이동할 수 있다.

지금까지 반도체 나노 입자의 에너지 갭의 조절을 통해 구현 가능한 응용 소자들에 대해서 살펴보았다. 여기서는 소개하지 않았지만, 나노 입자가 벌크에 비해 단위 부피당 큰 표면적을 갖는 점을 이용하여 나노 입자를 촉매로 사용하고자 하는 연구도 활발히 진행 중이다. 최근에는 다양한 분야에서 나노 입자를 적용하려는 시도가 급증하고 있어, 나노 입자에 대한 합성 및 성질에 관한 기초적인 연구가 보다 요구되어진다. 앞으로 21세기의 신소재로서 나노 입자가 활발히 연구되어진다면, 기존의 과학기술로는 극복할 수 없었던 문제점들을 해결하여 보다 소형화되고 고효율의 소자가 될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] Brus, L. E., J. Chem. Phys., Vol. 80, p. 4403, 1984.
- [2] Trindade, T. and O' Brieu, P., Chem. Mater., Vol. 13, p. 3843, 2001.
- [3] Kershaw, S. V., Harrison, M., Rogach, A. L., and Kornowski, A., IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 6, p. 534, 2000.
- [4] Fojtik, A. and Henglein, A., Chem. Phys. Lett., Vol. 221, p. 363, 1994.
- [5] Kornowski, A., Giersig, M., Vogel, M., et al. Adv. Mater., Vol. 5, p. 634, 1993.
- [6] Jegier, J. A., Mckernan, S., and Gladfelter, W. L., Chem. Mater., Vol. 10, p. 2041, 1998.
- [7] Kher, S. S. and Wells, R. L., Chem. Mater., Vol. 6, p. 2056, 1994.
- [8] Micic, O. I., Sprague, J. R., et al., J. Phys. Chem.,

Vol. 99, p. 7754, 1995.

[9] Olshavsky, M. A., Goldstein, A. N., and Alivisatos, A. P., J. Am. Chem. Soc., Vol. 112, p. 9438, 1990.

[10] Guzelian, A. A., Peng, X., Alivisatos, A. P., et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 69, p. 1432, 1996.

[11] Wells, R. L., Kher, S. S., Lube, M. S., and White, P., Chem. Mater., Vol. 7, p. 793, 1995.

[12] Baral, S., Fojtik, A., Weller, H., and Henglein, A. J., Am. Chem. Soc., Vol. 108, p. 375, 1986.

[13] Weller, H., Fojtik, A., and Henglein, A., Chem. Phys. Lett., Vol. 117, p. 485, 1985.

[14] Buhro, W. E., Polyhedron., Vol. 13, p. 1131, 1994.

[15] Matchett, M. A., Viano, A. M., et al., Chem. Mater., Vol. 4, p. 508, 1992.

[16] Fojtik, A., Weller, H., and Henglein, A., Chem. Phys. Lett., Vol. 120, p. 552, 1985.

[17] Babcock, J. R., Zehner, R. W., and Sita, L. R., Chem. Mater., Vol. 10, p. 2027, 1998.

[18] Choi, K. M. and Shea, K. J., J. Phys. Chem., Vol. 98, p. 3207, 1994.

[19] Murray, C. B., Norris, D. J., and Bawendi, M. G., J. Am. Chem. Soc., Vol. 115, p. 8706, 1993.

[20] Dabbousi, B. O. and Bawendi, M. G., Appl. Phys. Lett., Vol. 66, p. 1316, 1995.

[21] Weller, H., Koch, U., and Henglein, A., Ber. Bunsen-Ges. Phys. Chem., Vol. 88, p. 649, 1984.

[22] Li, X., Fryer, J. R., and Cole-Hamilton, D. J., Chem. Commun., Vol. 1994, p. 1715, 1994.

[23] Ludolph, B., Malik, M. A., et al. Chem. Commun., Vol. 1998, p. 1849, 1998.

[24] Wang, Y., Suna, A., Mahler, W., and Kasowski, R., J. Chem. Phys., Vol. 87, p. 7315, 1987.

[25] Rindade, T., O'Brien, P., and Zhang, X. J., Mater. Chem., Vol. 7, p. 1011, 1997.

[26] Nedeljkovic, J. M., Micic, O. I., and Nozic, A. J., J. Phys. Chem., Vol. 90, p. 12, 1986.

[27] Spanhel, L., Haase, M., Weller, H., and Henglein, A., J. Am. Chem. Soc., Vol. 109, p. 5649, 1987.

[28] Chang, S., Liu, L., and Asher, S. A., J. Am. Chem. Soc., Vol. 116, p. 6739, 1994.

[29] Chang, S., Liu, L., and Asher, S. A., J. Am. Chem. Soc., Vol. 116, p. 6745, 1994.

[30] Tian, Y., Newton, T., and Fendler, J. H., J. Phys. Chem., Vol. 100, p. 8967, 1996.

[31] Zhou, H. S., Honma, I., Komiyama, H., and Hans, J. W., J. Phys. Chem., Vol. 97, p. 895, 1993.

[32] Zhou, H. S., Honma, I., Komiyama, H., and Hans, J. W., Chem. Mater., Vol. 6, p. 1534, 1994.

[33] Youn, H. C., Baral, S., and Fendler, J. H., J. Phys. Chem., Vol. 92, p. 6320, 1988.

[34] Kortan, A. R., Hull, R., Bawendi, M. G., et al., J. Am. Chem. Soc., Vol. 112, p. 1327, 1990.

[35] Danek, M., Murray, C. B., Bawendi, M. G., et al., J. Cryst. Growth., Vol. 145, p. 714, 1994.

[36] Danek, M.; Murray, C. B.; Bawendi, M. G. et al. Chem. Mater., Vol. 8, p. 173, 1996.

[37] Eychmuller, A., Mews, A., and Weller, H., Chem. Phys. Lett., Vol. 208, p. 59, 1993.

[38] Mews, A., Eychmuller, A., Giersig, M., Weller, H., et al., J. Phys. Chem., Vol. 98, p. 934, 1994.

· 저 · 자 · 약 · 력 ·

성명: 조 경 아

❖ 학 력

- 1993년 2월 성신여대 화학과 이학사
- 1995년 2월 성신여대 대학원 화학과 이학석사
- 2000년 2월 동경대 화학과 이학박사

❖ 경 력

- 2002년 1월-현재 고려대 전기공학과 계약교수

성명: 이 준 우

❖ 학 력

- 2001년 2월 고려대 화공생명공학과 공학사
- 2003년 3월-현재
고려대 대학원 전기공학과 석사과정

성명: 김진형

❖ 학력

- 2003년 2월 중앙대 전기공학과 공학사
- 2003년 3월-현재
고려대 대학원 전기공학과 석사과정

성명: 송현우

❖ 학력

- 2001년 2월 광운대 화공생명공학과 공학사
- 2001년 9월-현재
고려대 대학원 전기공학과 석사과정

성명: 김현석

❖ 학력

- 1999년 8월 고려대 물리학과 이학사
- 2001년 8월 고려대 대학원 물리학과 이학석사
- 2001년 9월-현재
고려대 대학원 전기공학과 박사과정

성명: 김상식

❖ 학력

- 1985년 2월 고려대 물리학과 이학사
- 1987년 2월 고려대 대학원 물리학과 이학석사
- 1996년 2월 Columbia University 응용물리학 박사

❖ 경력

- 1996년 3월-1999년 2월
University of Illinois at Urbana-Champaign 전기공학과
- 1999년 3월-현재
고려대 전기공학과 부교수

