

# 퀀텀닷 기본원리: 퀀텀닷 디스플레이의 원리를 설명하는 기초 물리학 가이드

## 개요

이 백서에서는 퀀텀닷(QD) 기술 및 이 기술이 적용된 퀀텀닷 디스플레이의 기본 과학 원리를 이해함으로써 퀀텀닷의 기반을 다지는 것을 목표로 합니다. 이로 인해 업계가 새로운 돌파구를 마련하고, 디스플레이의 QD 활용도가 향상되면서 소비자들은 기술의 발전의 혜택을 누릴 수 있을 것입니다.

나노 기술은 이미 하이 엔드 디스플레이의 핵심 기반이 되었습니다. 따라서 QD 반도체 입자의 핵심 특성과 기본 작동 원리를 이해하기 위해 [퀀텀닷](#)에 대해 더 자세히 설명하고자 합니다.

## 퀀텀닷의 기본 원리

### 퀀텀닷이란 무엇입니까?

퀀텀닷(QD)은 지름이 2-10nm(나노미터,  $10^{-9}$ )에 불과한 반도체 입자로 특이한 전기적, 광학적 성질을 지닌 입자를 말합니다. 예를 들어, 퀀텀닷 결정은 빛에 노출되면 특정 주파수의 빛을 방출합니다.

퀀텀닷의 크기와 모양은 반응 시간과 조건을 조절하여 정확하게 제어할 수 있으므로 이 나노 기술을 디스플레이 용도에 맞게 확장할 수 있으며 유용하게 사용할 수 있습니다.

### 퀀텀닷은 어떻게 동작합니까?

퀀텀닷(QD; 양자점이라고도 함)이 빛을 발산할 수 있는 이유와 그것이 생성하는 빛의 파장(빛의 파장은 색상을 결정함)이 입자 크기에 따라 달라지는 이유를 탐구하기 위해 양자 물리학에 대해 좀 더 자세히 알아보십시오. (양자 물리학이라는 단어에 겁먹지 마십시오.)

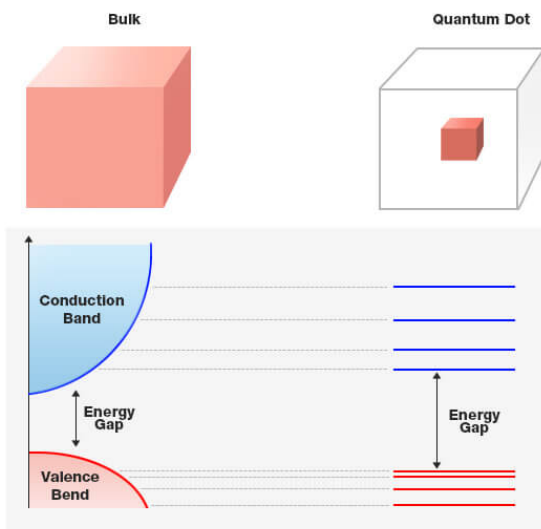
QD의 발광 과정은 광자의 들뜸(excitation; 여기)으로 인해 발생하므로 광 발광(photoluminescence; 줄여서 PL이라고 함)이라고도 부릅니다. 빛을 받으면 광자가 들뜬 상태(excitation)가 되고 더 높은 에너지대로 “점프”합니다. 그다음 뒤따라 비방사전이(“fall back, 되돌아감”)가 일어나거나 광자가 재결합 및 재방출할 수 있는 이완 과정이 발생합니다.



밴드갭은 가전자대의 가장 높은 부분과 전도대의 가장 낮은 부분 사이의 에너지 준위 차이를 말합니다. 이 밴드갭은 방출되는 빛의 파장을 결정합니다.

### 퀀텀닷을 특별하게 만드는 것은 무엇입니까?

실리콘(벌크 물질이라고도 함)과 같은 일반적인 반도체에서 밴드는 매우 많은 원자와 분자의 인접한 에너지 준위 간 흡수를 통해 형성됩니다. 하지만 입자 크기가 나노 미터에 도달하고, 원자 및 분자의 양이 많이 감소함에 따라 오버랩된 에너지 준위가 감소하게 되고 밴드의 폭이 증가하게 됩니다. QD의 크기는 매우 작은 나노 미터이므로 벌크 물질보다 가전자대와 전도대 사이의 에너지 갭이 더 큽니다.



이로 인해 나노미터 크기의 반도체인 QD는 양자구속효과(quantum confinement effect) 및 불연속의 양자화된 전자특성을 가지고 있습니다.

## 양자구속효과

양자구속효과는 에너지대역이 입자의 원자 구조 변화에 영향을 받았을 때 관찰되는 현상을 말합니다. 파장의 범위는 입자의 크기와 연동되므로 전자는 파장 경계에 의해 영향을 받습니다. 따라서 QD의 특성은 크기에 따라 다르며, QD의 들뜸(excitation)은 3차원 공간에 의해 영향을 받습니다.

양자구속효과는 QD의 크기와 방출되는 빛의 파장 사이의 관계를 설명하는 쿼텀닷(양자점)의 핵심 특성입니다.

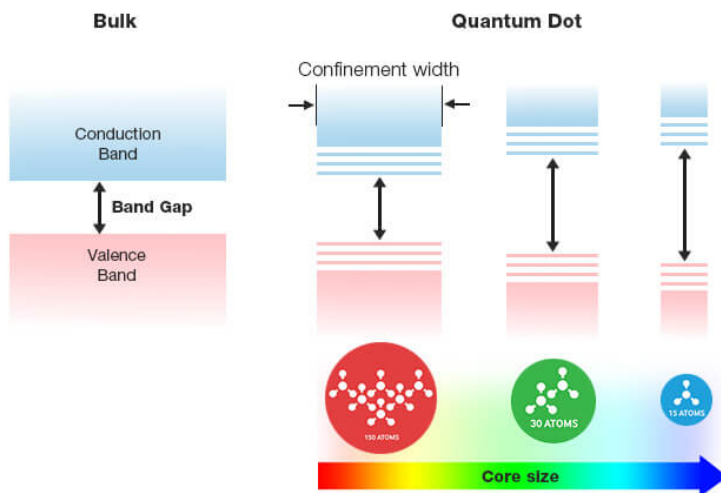
## QD의 양자화된 (또는 불연속적인) 전자 상태

QD의 입자 크기가 매우 작기 때문에 양자구속효과는 관찰할 수 있는 불연속 에너지 준위와 넓은 밴드갭을 유발할 수 있습니다. 쿼텀닷(양자점)에서 양자화된 이러한 에너지 준위는 단일 분자(단일 갭)와 벌크 반도체(밴드내 연속 에너지준위) 사이에 존재하는 전자 구조를 갖게 합니다.

## 이러한 양자 물리학이 디스플레이 기술에 중요한 이유는 무엇입니까?

이러한 양자 물리학을 디스플레이의 QD과 연결시켜보십시오.

높은 표면적 대 체적비로 인해 발생하는 QD의 고유 특성은 이러한 나노 결정이 입자의 크기에 따라 독특한 색을 생성할 수 있는 이유를 설명합니다.



결정의 크기가 감소함에 따라 가전자대의 가장 높은 부분과 전도대의 가장 낮은 부분 사이의 에너지 차이가 증가합니다. 쿼텀닷을 자극하기 위해 에너지가 더 많이 필요하고 동시에 QD가 원래의 이완 상태로 되돌아올 때 에너지가 더 많이 방출됩니다.

이러한 현상으로 인해 QD는 크기에 따라 같은 물질에서 다양한 색의 빛을 방출할 수 있습니다. 게다가 형성된 나노 결정의 크기에 대한 높은 수준의 제어 능력으로 인해 생성 과정에서 원하는 색의 빛을 방출할 수 있도록 조정할 수 있습니다.

멋진 일이지 않습니까? 하지만 이러한 모든 장점에도 불구하고 디스플레이에 QD를 활용하기 위해서는 해결해야 하는 몇 가지 과제가 남아 있습니다.

## QD를 구현하기 위해서 해결해야 하는 과제는 무엇입니까?

### 광퇴색

디스플레이에 적용 시 나노 기술의 문제는 광퇴색이라고 불리는 QD 입자의 비가역적인 분해입니다. 광퇴색은 고주파, 열 또는 습기가 있는 상태에서 빛에 노출되었을 때 발생합니다. QD 분자의 부식과 산화는 비발광 재결합 통로로 표면 결함(surface trap states)을 만듭니다.

광퇴색으로 인해 QD 분자는 빛을 방출하는 능력을 영원히 상실할 수도 있습니다. 비보호된 QD 분자는 평균적으로 1,000초(대략 17분) 미만의 수명을 갖습니다. 백라이트를 사용하여 반도체 입자에 빛을 비추는 디스플레이의 기술적 특성으로 인해 QD는 계속해서 더 긴 파장의 광원에 노출되어야 합니다.



### 광 발광(PL) 깜박거림

크기 조절로 빛 방출이 가능한 QD는 광 발광 깜박거림(Photoluminescence blinking)이라고 불리는 현상으로 인해서 더욱 효율이 감소합니다. 이는 나노 결정 방출에서 광 발광 중단(photoluminescence intermittency)이라고도 합니다. 이러한 깜박거림(blinking)은 하나 또는 두 개 모두 들뜬 상태가 된 캐리어(excited carrier)가 QD 결정의 표면으로 빠져나가면서 발생합니다.

### 오제 재결합

오제 재결합은 반도체에서 발생하는 오제 효과와 유사합니다. 전자와 정공(정공쌍)은 에너지를 포기하고(전도대에서) 또 다른 전자와 재결합하면서 에너지를 증가시킵니다.

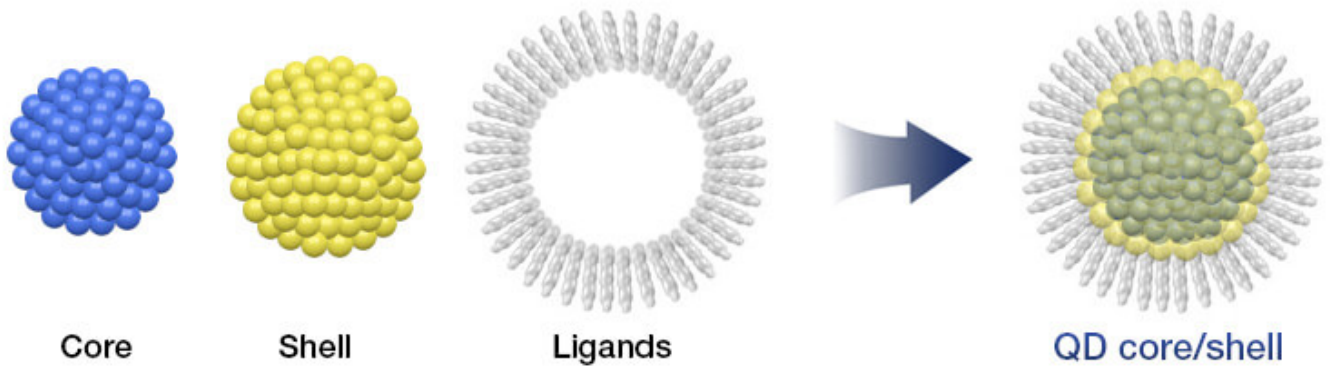
오제 재결합은 들뜬 상태가 된 전자가 재결합하여 빛을 방출하는 대신에 에너지를 전자 근처(또는 정공)로 전달하여 열전자(정공)를 생성할 때 발생합니다. 우리의 목표는 빛 방출을 최대화하는 것이므로 QD에서 비발광 과정을 최소화해야 합니다. 오제 재결합은 QD의 효율성을 상당히 감소시키는 손실 프로세스입니다.

## 디스플레이에 퀀텀닷 기술 적용

이러한 주요 과제들을 염두에 두고, 패널 제조업체들이 어떻게 이 기술을 디스플레이에 적용할 수 있는지 살펴보십시오.

### QD 성능 및 안전성 강화

안정성을 높이고 광 반응에 대한 내구성을 확보하기 위해 제조업체들은 코어셸 디자인을 사용하여 QD 구조를 강화합니다. 이 경우, 나노 결정은 코어의 취약성을 줄이고자 반도체 셸과 표면 리간드에 둘러싸인 반도체 특성의 QD 코어로 만들어집니다.



셸은 전자 및 전공과 같은 전하 캐리어의 구속 및 표면 상태의 효과적인 제거를 달성하는 데 도움을 주며, 이로 인해 양자 수율과 안정성을 향상시킬 수 있습니다. 게다가 셸은 환경 변화 및 광 산화 분해로부터 보호하는 역할을 합니다.

또 다른 보호 메커니즘은 그들의 화학적 성질과 형광 방출 행동을 미세조정할 수 있는 기능의 리간드를 갖춘 QD의 표면 변화입니다. 리간드는 주변 환경으로부터 나노 결정을 물리적으로 보호할 뿐만 아니라 전자 트랩의 효과적인 부동화로 인해 광 발광 양자 수율을 향상시킴으로써 오제 재결합 효과를 방지하는 데 도움이 됩니다.

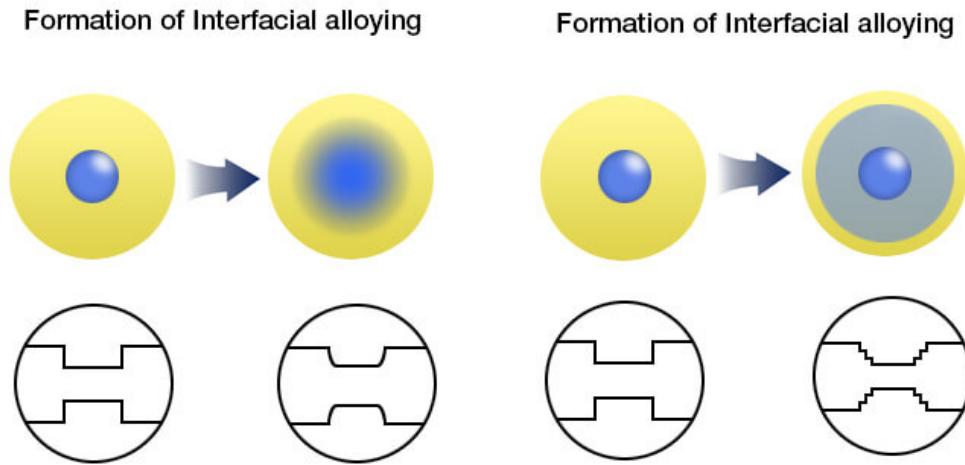
### PL 감박거림 및 오제 재결합의 감소

QD 구조가 개선되면 PL 감박거림과 오제 재결합을 감소시키는 데 도움이 됩니다. 셸은 캐리어(운반체; carrier)가 표면으로부터 빠져나가지 못하게 하는 에너지 장벽을 만듭니다. 셸은 코어를 감싸고 있기 때문에 빛을 가하여 생성된 전하를 효과적으로 통제할 수 있으며 코어의 발광을 위해서 사용될 수 있도록 제어합니다. 이것은 격자 불일치가 낮은 셸과 코어 물질을 사용하여 들뜬 상태가 된 캐리어가 더 좁은 밴드 갭으로 통제되도록 설계함으로써 달성됩니다.

전하 중립성을 유지함으로써 셸은 오제 재결합을 피하고 PL 감박거림을 억제하여 광 발광을 향상시킵니다.

### 퀀텀닷 재료 및 구조의 추가 개선

최근에는 오제 재결합을 줄이기 위해 퀀텀닷의 코어와 셸 사이에 중간 셸(middle shell)이라는 또 다른 보호층을 구성하고 있습니다. 중간층의 도입은 밴드내 전이를 감소시키고 더불어 오제 결합을 감소시킵니다.

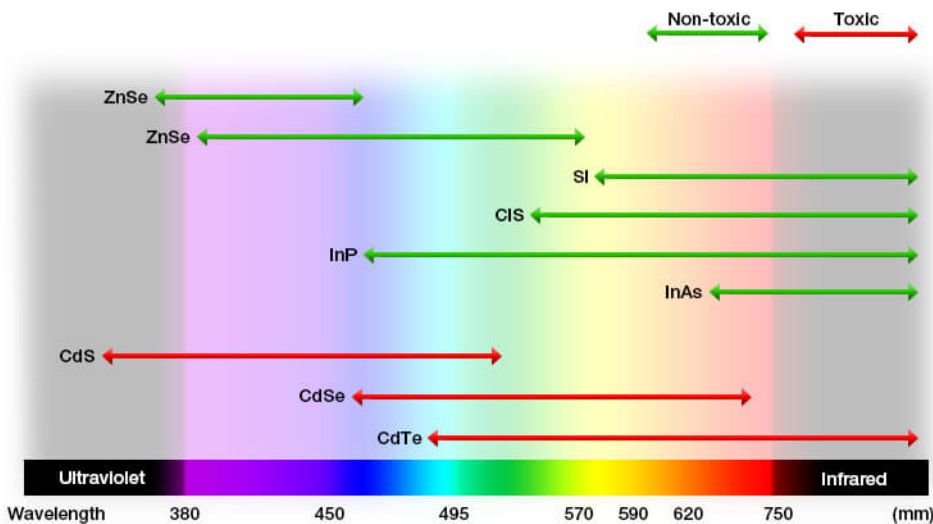


## 가시성의 퀀텀닷 반도체 물질

다음으로 가시광선의 영역에서 원하는 광 발광을 달성하기 위해 퀀텀닷 디스플레이 기술에 사용되는 물질을 살펴보십시오.

화학적 구성 및 특성으로 인해 생성된 다양한 물질들은 다양한 크기의 QD를 형성하고 자신의 최대 방출량을 결정합니다. 인간의 눈은 784-400THz 주파수 범위에 해당하는 380~750nm 파장 범위의 빛을 볼 수 있습니다. 그리고 이 파장의 광자 에너지를 생성하기 위해서는 3.26eV-1.65eV가 필요합니다.

QD는 다양한 반도체 재료에서 합성되어 형성될 수 있습니다. 디스플레이 기술에 사용되는 가장 보편적인 재료 중 셀렌화카드뮴(cadmium selenide; CdSe)과 인화인듐(indium phosphide; InP)은 최고 내부 양자 효율 (IQE) 수준에서 가시광 파장 범위를 처리합니다.



양자점의 방출 스펙트럼은 좁고 대칭적이기 때문에 발광 색상이 포함된 가장 높은 색 순도를 가지게 됩니다.

[디스플레이에서 색 재현](#) 또는 [QD 구현의 원리](#)에 대해서 더 자세히 알아보십시오.

## 결론

이 백서에서는 나노 결정 기술의 기본적인 기능 및 원리와 디스플레이에 어떻게 적용되는지에 대해 다루었습니다. 과학기술이 여전히 QD 구현 및 구조 개선의 과제를 해결하는 방향으로 계속 발전하고 있기 때문에 이 주제를 앞으로 더 지켜봐야 합니다. 다음 호에서는 디스플레이에서 QD 애플리케이션이 어떻게 진화하는지 그리고 그 이유에 대해 논의할 것입니다.

## 감사한 분:

자료를 제공해주신 홍익 대학교 재료공학부 양희선 교수님에게 감사드립니다.

## 참고 자료:

- <http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/23484/3/03.chapter%201.pdf>
- [https://www.researchgate.net/publication/306001639\\_Excited-State\\_Dynamics\\_in\\_Colloidal\\_Semiconductor\\_Nanocrystals](https://www.researchgate.net/publication/306001639_Excited-State_Dynamics_in_Colloidal_Semiconductor_Nanocrystals)
- <http://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/materials-science/nanomaterials/quantum-dots.html>
- [https://www.researchgate.net/publication/51788624\\_Two\\_types\\_of\\_luminescence\\_blinking\\_revealed\\_by\\_spectroelectrochemistry\\_of\\_single\\_quantum\\_dots](https://www.researchgate.net/publication/51788624_Two_types_of_luminescence_blinking_revealed_by_spectroelectrochemistry_of_single_quantum_dots)
- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702116303510>
- <http://cen.acs.org/articles/91/web/2013/10/Understanding-Quantum-Dots-Inside.html>
- <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15980316.2012.683537>
- <http://rsfs.royalsocietypublishing.org/content/3/3/20120103>
- <http://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2015/cs/c5cs00285k>