

# 양자점 디스플레이 기술의 현재와 미래

이창민, 이우석, 채희엽

## 1. 들어가는 글

1983년 AT&T Bell laboratory의 Louis Brus에 의해 “Small Semiconductor Crystallites”라는 이름으로 명명되며 개념이 도입된 콜로이드 양자점(quantum dot, QD)은 [1,2] 지난 30여년간 괄목할 만한 발전을 보이고 있다. 여러 가지 가능성을 가지고 있는 양자점은 태양 전지 [3], 바이오 센서 [4], 조명 [5], 디스플레이 [6] 및 의학분야 [7] 등의 분야에 적용 가능성들이 시험되고 있다. Cd과 Se로 대표되는 II-VI족 양자점들은 뛰어난 성능을 보이며 현재 양자점이 차세대 디스플레이 재료로 자리잡는데 가장 큰 역할을 해왔다. 하지만 Cd이 가지고 있는 독성의 [8] 대안으로 활발하게 연구되어지고 있는 양자점들 중 III-V족 양자점을 대표하는 InP와 그 외 Pb를 중심 금속으로 사용하는 Perovskite QD 또한 Cd에 비하여 상대적으로 낮은 독성을 주장하며 널리 개발되고 있다. 이처럼 여러 가지 재료들이 여러 가지 분야로의 적용이 검토되고 있으나, 그 중에서도 가장 각광을 받는 영역은 디스플레이 영역이라고 할 수 있다. 합성 시 크기 조절을 통해 밴드갭을 조절하며 광학적 특성을 변화시킬 수 있으며, 양자점 크기를 일정하게 제어함으로써 높은 색 순도를 얻을 수 있다 [9,10]. 또한 추가적인 보완을 통하여 다양한 용매에 분산시킬 수 있어 여러 가지 공정에

에 적용할 수 있다. 이러한 양자점의 특성은 디스플레이 영역에서 차세대 재료로 주목 받고 있으며, 이미 놀라운 성과들이 보고 되고 있다. 3년 전 첫 상품화 이후 지금은 이미 디스플레이의 한 축을 확보하고 있다.

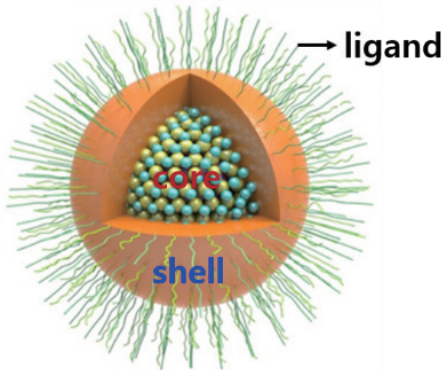
양자점은 이들의 광발광 (Photo-luminescence) 현상과 전계발광 (Electro-luminescence) 현상을 이용하여 디스플레이 분야에 적용이 되며, 특히 최초의 QD 상품화는 광 발광을 이용한 제품으로 2013년 Nanosys와 3M에 의해 QDEF 상품명으로 출시되었다. Liquid Crystal Display(LCD)의 Back Light Unit(BLU)에 film 형태로 적용되어 색변환을 통하여 휘도 향상 및 넓은 색재현성을 구현할 수 있었으며, 이듬해에 2014년 삼성전자에서 비 Cd계인 InP 양자점 필름을 적용한 TV를 상품화하여 QLED TV라는 상품명으로 지금까지 시장에 나오고 있다. 이 글에서는 양자점의 여러 적용 처 중 디스플레이의 현 상황을 분석하고 그 정보를 기반으로 이후의 시간들을 예측하려고 한다.

## 2. 양자점

물질의 크기가 작아지면 전자의 potential wall이 커지면서 에너지 준위를 이동하는데 제약을 받아 분자궤도 함수가 분리되고, band gap이 커지는 현상이 발생하는

### 〈저자 약력〉

- 이창민 저자는 2004년 광운대학교 화학과에서 석사 학위를 받고 2006년부터 2015년까지 삼성SDI에서 근무하였으며, 2015년부터 성균관대학교 화학공학과에서 양자점 합성 및 응용에 관하여 연구하고 있다. (cm2nara@skku.edu)
- 이우석 저자는 2009년 광주과학기술원 신소재공학과에서 석사학위를 받고, 2009년부터 현재까지 삼성SDI에서 근무 중이며 2016년부터 성균관대학교 화학공학과에서 양자점 발광다이오드를 연구하고 있다. (ws.lee@skku.edu)
- 채희엽 저자는 2000년 미국 MIT에서 박사 학위를 받고, 2004년까지 Applied Material에서 근무하였으며, 2004년부터 현재까지 성균관대학교 화학공학과 교수로 재직 중이다. 양자점 및 양자점 발광소자, 플라즈마 식각 및 공정 연구, 플라즈마 진단 연구를 진행 중이다. (hchae@skku.edu)



[Fig. 1] 양자점의 구조.

데 이를 양자구속 효과라고 하며 이 양자구속 효과를 기반으로 여러 가지로 응용이 되고 있다 [11].

양자점은 코어(core), 셸(shell) 및 리간드(ligand)로 이루어진다. 코어는 실질적으로 발광이 일어나는 부분으로 코어의 크기가 발광 파장을 결정한다. 양자구속 효과를 받기 위해서는 exciton Bohr radius보다 작은 크기여야 하며, 해당 크기에서 optical band gap을 가져야 한다. 양자점의 shell은 core의 양자구속 효과를 촉진하고 양자점의 안정성을 결정한다. 일반적으로 코어/셸 (core/shell) 형태로 양자점을 합성하며, shell을 이용해 코어의 산화를 방지하고 코어 표면의 trap 에너지 준위를 줄일 수 있으며, 이를 통해 광양자를 코어에 집중시킴으로써 양자효율을 높일 수 있다. 리간드는 양자점의 분산성 및 서로 뭉치는 현상을 막아주는 역할을 한다. 최근 리간드로 특정 기능을 부여하여 양자점의 전기적, 광학적 성질을 변화시켜주는 연구도 활발히 진행되고 있다 [12].

양자점이 차세대 디스플레이 재료로서 성능 관련 이슈로는 아래의 세 가지를 꼽을 수 있다.

1. 양자점의 성능
2. 양자점의 안정성
3. 친환경 양자점

양자점의 성능은 다양한 연구들을 통한 보고들이 있다. 양자점은 좁은 발광 반치폭에서 기인되는 높은 색순도를 표현할 수 있어서 새롭게 제안된 색좌표인 REC.2020을 만족시킬 수 있는 가장 유력한 후보이며,

우수한 광학적 성질을 보여준다 [13, 14].

또한 양자점은 유기발광소자에 적용되는 유기물에 비하여 상대적으로 높은 안정성을 보여주고 있지만 다양한 적용을 위해서는 열, 빛, 수분 및 산소에 대하여 보다 높은 안정성을 요구 받고 있다. 이러한 결과를 얻기 위하여 양자점을 실리카와 같은 무기물을 이용하여 봉지하는 방법 [15], 하나의 고분자 비드에 여러 개의 양자점을 넣는 방법 [16], 복합 고분자를 이용한 봉지 방법 [17] 등의 방법이 제안되었다.

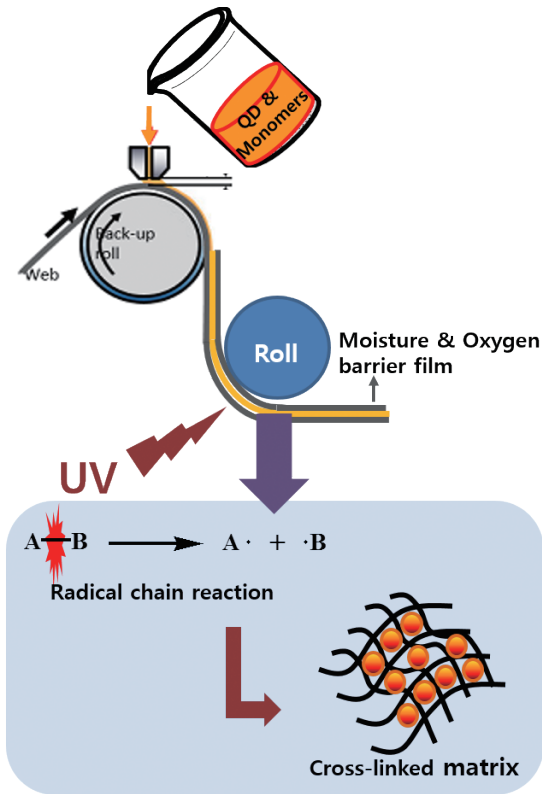
현재 가장 뛰어난 광학적 성질을 보여주는 양자점은 카드뮴을 기반으로 한 물질이지만, 카드뮴의 독성 때문에 비카드뮴계 양자점의 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 최근 삼성전자에서 출시하는 TV에는 비카드뮴계 양자점이 적용되고 있다. 디스플레이 재료로 가장 주목 받고 있는 비카드뮴계 양자점으로는 III-V족인 InP가 각광을 받고 있으며 [18], InP로 색표현이 어려운 청색발광체로는 ZnSe [19]등의 물질이 대안으로 보고되고 있으나 그 수준이 낮아 향후 많은 연구가 필요한 부분이다. 비카드뮴계 양자점인 InP는 색재현성에서는 카드뮴계의 약 90% 수준이 표현 가능하지만, 전계 발광 분야에서는 아직 그 효과가 미미한 수준이다.

### 3. 양자점 적용 LCD

양자점은 광 발광 및 전계 발광이 가능하며, LCD 기판으로는 광 발광을 이용하여 고휘도, 고색재현이 가능한 디스플레이를 구현하고 있다. 이미 상품화된 색 변환 필름은 필름 내의 양자점이 백라이트인 청색 GaN LED를 각각 녹색 및 적색으로 변환시키고 청색 빛이 일부 그대로 투과되어 색순도가 높은 백색 빛을 생성시키고 이로 인해 높은 휘도와 색재현성을 구현할 수 있다 [20].

최근까지 LCD 백라이트에 색 변환을 위해 제안되고 있는 양자점의 성형 방법은 크게 아래와 같이 네 가지로 분류될 수 있다.

1. 레일 타입
2. 필름 타입
3. 온칩 타입
4. 포토레지스트 타입



[Fig. 2] 양자점필름의 제작 공정 개념도.

가장 널리 상품화에 사용되는 방법은 필름 타입이며 현재 TV 등에 적용되어 상품화되고 있다.

양자점 필름들은 현재 수분산소 베리어 필름 사이에 무용제 타입의 경화물과 양자점 혼합물을 넣고 광경화 방식으로 제조하고 있다. 이러한 방식은 기존 LCD에 사용되고 있는 프리즘 시트와 비슷한 제조 방법으로 미래 나노텍, 글로벌과 같은 기존 프리즘 시트 회사들이 양산을 하고 있으며, 중국, 대만을 포함한 다른 프리즘 시트 제조사들도 양자점 필름의 제조를 준비하고 있다. 수분산소 베리어 필름은 양자점의 수분과 산소에 대한 취약점을 보완하기 위해 사용되며 [17], 실리콘옥사이드나 알루미늄 옥사이드와 같은 무기물이 기재 필름 (PET)에 코팅되어 있는 형태이다. 최근에는 양자점 자체의 안정성도 향상되고, 필름을 이루고 있는 매트릭스에도 베리어 성능이 추가되어 베리어 필름 자체의 성능을 낮추어 양자점 필름 자체의 생산 가격을 경쟁력 있게 가져가려고 하는 움직임이 있다.

### 3-1. 양자점 레일 타입 광 발광

양자점 레일은 옛지 청색 LED 백라이트 앞에 지름이 수 mm인 유리관 내에 양자점을 넣고 밀봉한 것으로 도광관을 통하여 백색 빛을 발광 시키는 성형법이다. 이 방법은 양자점이 적게 사용되어 상대적으로 저렴하고 대량 생산이 가능한 성형법이지만 레일의 가공이 까다롭고 발열하는 청색 LED 바로 앞에 양자점이 위치하여 내열성 향상이 과제이다. 특히 물리적으로 옛지 부분에 레일이 위치하게 됨으로써 베젤의 두께가 민감한 형태의 디스플레이에서는 사용하기 어렵다. 이러한 방법으로 QD Vision과 Sony에서 TV 및 모바일폰에 적용하여 상품을 출시한 바 있으나 [21] 현재는 연구된 보고가 많지 않다.

### 3-2. 양자점 필름 타입 광 발광

필름 타입은 현재 가장 널리 사용되고 있는 방식으로 2013년 Amazon Kindle Fire HDX 7"에 채용된 이후로 삼성전자에 의해 2014년 이후로 색재현성이 우수한 TV로 시장에 선보여지고 있다. 양자점은 필름 내에 고굴절의 다른 나노 파티클들과 함께 필름을 형성하여 광 발광으로 생성된 빛의 확산을 향상 시켜 휘도를 올릴 수 있다. 현재는 무기물이 PET위에 올려진 베리어 필름을 양자점 필름의 위, 아래에 위치하여 양자점을 외부의 수분과 산소로부터 보호하고 있다. 이러한 베리어 필름은 양자점 필름 타입 광 발광 디스플레이의 생산 단가를 올리는 주범으로 보다 간단한 형태의 베리어 필름으로 대체하는 연구들이 기업체를 중심으로 활발히 진행되고 있다.

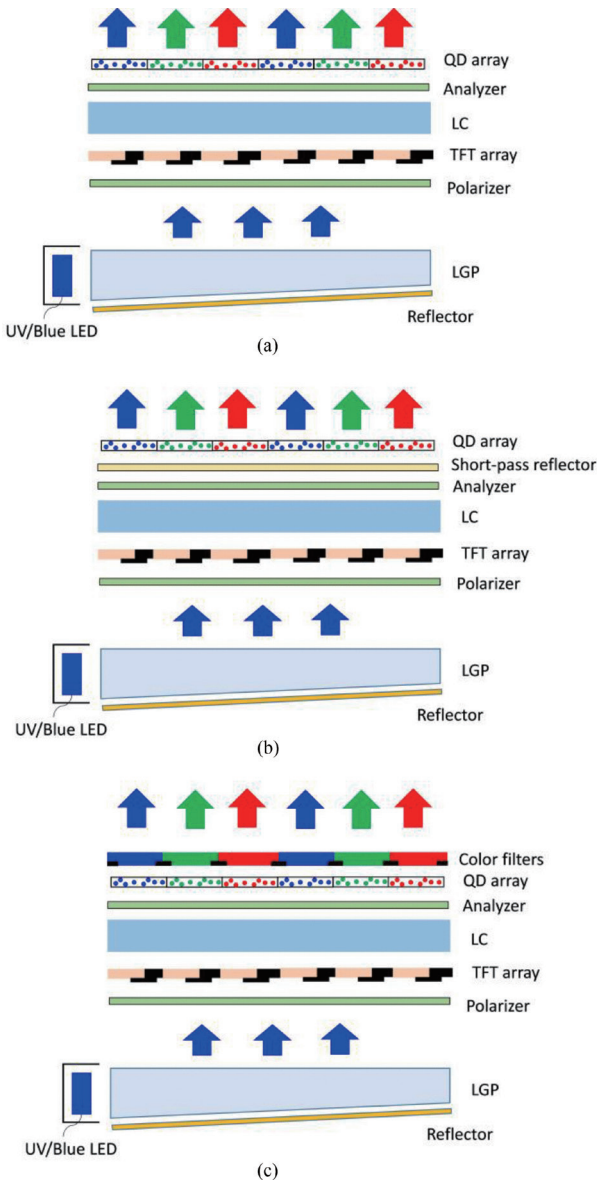
### 3-3. 양자점 온칩 타입 광 발광

위와 같이 필름으로 양자점 형성 시 디스플레이 되는 전면적에 넓게 적용되므로 양자점의 사용량이 많아지게 되어 생산 단가가 상승되게 된다. 이를 극복하기 위한 방법의 하나로 GaN 청색 LED의 encapsulation 시 현재 사용되고 있는 siloxane과 양자점을 섞어 칩 위에 올려져 디스플레이에 적용되는 모델이 활발히 연구되어 지고 있다. 이 모델에서는 양자점이 LED 빛 및 열에 의해 기능 저하가 일어나기 때문에 양자점의 신뢰성이 매우 중요하게 요구된다. 최근에는 필름 및 온칩의 중간 형태로 새롭게 개발된 무기 인광체를 온칩 형태로 넣고 다른 색의 양자점을 필름 형태로 하는 광 발광 디스플레이가 시장에 소개되었다 [21]. 온칩 형태의 광 발광은 생산 단가 인하

및 효율 향상 측면에서도 장점이 있어 현재 및 향후에도 꾸준히 주목 받으며 연구가 되어질 것이라 전망된다.

### 3-4. 양자점 포토레지스트 타입 광 발광

일반적인 구조의 LCD 패널의 경우 BLU(Backlight unit)로부터 나오는 빛의 2/3 정도가 color filter(CF)에 의해서 흡수가 이루어져서 광 효율 측면에서 좋지 않다.



[Fig. 3] 양자점 색변환을 적용한 세가지 유형의 디스플레이 개략도. (a) 기본 구조; (b) 후면 발광을 재사용하기 위한 반사판; (c) 주변광에 의한 양자점의 여기를 방지하기 위한 Color Filer 층[23, 24].

이런 문제점을 해결하기 위한 대안으로 양자점을 CF로 응용하는 연구가 진행 중이다. 양자점 CF를 적용한 LCD의 경우 일반적인 LCD에 비해 광효율의 향상 뿐만 아니라 양자점의 등방향 발광 특성으로 시야각이 좋아지며, 액정의 두께를 줄일 수 있어 응답속도도 향상된다고 보고 되었다 [22]. 하지만, 양산화를 위해서는 여전히 극복해야 할 과제들이 많다. 먼저 양산적인 관점에서 고농도의 양자점이 분산되어 있는 millbase 제작이 어렵다. 일반적인 양자점의 경우 리간드로 긴 탄소 사슬을 갖고 있어 용매 선택에 있어 제한이 있다. 따라서 리간드 치환을 통해 용매나 원료들과 상용성 및 안정성을 향상시킬 필요가 있다. 패널 제조 공정에서는 R, G, B 패턴형성을 위한 photo-lithography가 필요한데 공정 중 post baking 공정의 높은 온도에 양자점이 노출이 되기 때문에 열 안정성이 우수한 양자점 개발이나 보다 낮은 온도에서 진행 가능한 공정 개발이 필요하다. 다른 한편, 디스플레이 구동 관점에서의 문제점으로는 완벽한 색변환을 위해서는 양자점 패턴의 두께가(~10 $\mu\text{m}$  이상) 두꺼워야 한다. 그 밖에 양자점의 후면 산란으로 인한 효율 저하, 청색 광원의 빛샘 및 태양빛의 흡수에 의한 양자점의 발광으로 인한 명암비 감소도 반드시 해결해야만 하는 과제들이다. 산업계와 학계에서도 관련 연구가 활발히 진행 중이다. 먼저 후면 산란의 경우 양자점 CF 뒷면에 청색 빛은 투과하고 적색과 녹색 빛을 반사시키는 반사판을 삽입하면 된다 (그림 2(b)).

BLU로부터 나오는 청색 빛은 중간에 흡수되지 않고 양자점 CF까지 도달할 수 있게 되며, 청색 빛을 흡수하여 양자점으로부터 적색과 녹색 빛이 후면으로 발광하더라도 반사판을 통해 전면으로 모두 발산할 수 있다 [16]. 야외 환경에서는 태양으로부터 오는 짧은 파장의 빛에 의해 양자점이 여기되어 명암비가 낮아지는 문제가 있는데 이를 해결하기 위해 일반적인 CF 패턴층을 양자점 CF위에 형성시킴으로써 야외의 시인성을 개선 할 수도 있다 (그림 2(c)). 이 경우 공정이 복잡해져서 비용상승뿐만 아니라 지속적인 Photo-lithography 공정으로 인해 양자점의 성능이 떨어질 수 있다. 지금까지 살펴본 바와 같이 양자점 CF는 QDEF 기술에 비해 광효율이나 구동 측면에서도 장점이 있다. 하지만 양산화를 위해서 난제들이 산재해 있어 양자점 소재뿐만 아니라 패널 구조 및 공정 개선 등이 병행되어야 할 것이다. 최근 양자점의



열안정성이 비약적으로 개선되면서 온칩 타입의 광 발광 기술이 재조명을 받고 있다. 공정의 단순함뿐만 아니라 가격측면에서도 유리하기 때문에 온칩 타입이 양자점의 광 발광을 응용하는 다음 디스플레이가 될 것이라 예상된다.

#### 4. 양자점 전계발광

양자점을 활용하는 디스플레이의 마지막 단계는 전계발광 특성을 이용한 Quantum Dot Light Emitting Diodes(QLED)라고 해도 과언이 아니다. 1994년 A. P. Allivisatos 연구그룹에서 CdSe 기반 양자점 발광 소자가 학계에 소개된 이래로 양자점 합성 및 재료개발, 발광 원리에 대한 이해, 소자 구조의 개발 등 많은 연구를 통해서 현재 상용화 되어 있는 인광 유기발광소자(OLED)에 버금가는 성능의 연구 결과들이 발표되고 있다.[25] 최초의 OLED 기술이 발표된 후, 상용화까지 30년째 걸리지 않았고 QLED의 경우 발광층으로 양자점을 사용하는 것을 제외하고는 OLED와 기본적인 구조가 동일하다. 이런 관점에서 QLED의 양산화는 가까운 미래에 이루어질 것이라고 보여지지만, 해결해야 할 과제들이 아래와 같다.

- 친환경 청색 발광체의 개발
- ETL, HTL과 같은 공통층 개발
- 고효율 구동을 위한 구조 최적화
- 각 층 및 화소 형성을 위한 기술

##### 4-1. 전계 발광의 정의 및 QLED

전계발광은 optical bandgap을 갖는 반도체 물질에 전자를 주입하거나 강력한 전기장을 걸어줄 때 발광하는 것을 의미한다. anode의 정공과 cathode의 전자가 반도체 물질로 이동하여 만나면 여기자(Exciton)가 형성되면서 에너지가 빛의 형태로 방출된다. 이러한 원리에 의해 동작하는 발광 소자를 발광 다이오드라고 명명하는데, 이는 전류가 한쪽 방향으로 흐르기 때문이다. 발광하는 반도체 물질로 양자점을 사용하는 경우 양자점 발광 다이오드(QD-LED)라고 명명한다. QD-LED는 단순하게 Anode, 정공 주입층, 정공수송층, 발광층, 전자수송층, 그리고 Cathode로 구성된다. 그밖에 효율을 높이기

위해 추가로 전하량의 균형을 맞추기 위해 부도체의 고분자를 삽입하거나 기능성을 부여하는 계면층을 도입하는 경우도 있다. 현재 보고된 red, green, blue의 양자점 발광 다이오드의 효율은 아래와 같다.

[Table.1] 색상별 EQE\*

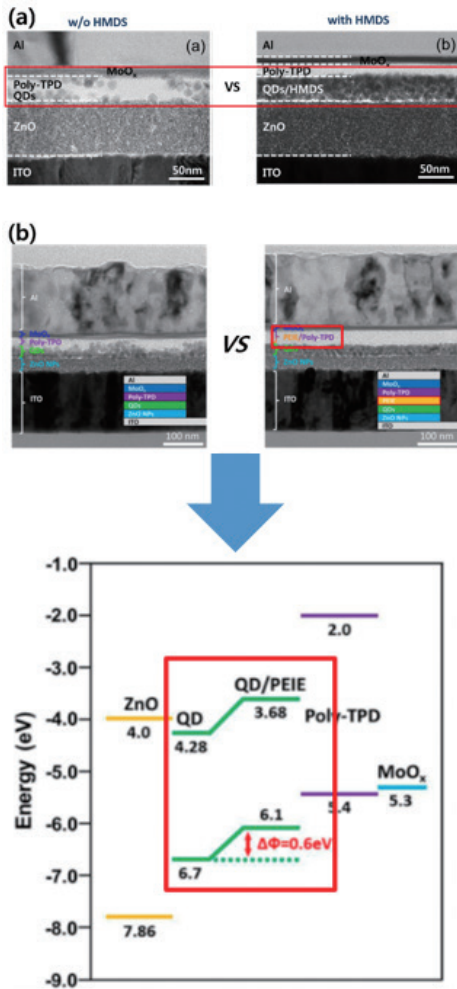
	Red	Green	Blue
CdSe 양자점	21 <sup>[28]</sup>	21 <sup>[29]</sup>	15 <sup>[30]</sup>
InP 양자점	2.5 <sup>[31]</sup>	3.46 <sup>[17]</sup>	

\* EQE: External quantum efficiency

위의 표 1에서 나타난 바와 같이 비카드뮴계 양자점을 이용한 청색발광소자는 거의 보고가 되지 않고 있으며, 있더라도 매우 효율이 낮아서 이 분야에 대한 집중 연구가 필요한 상황이다.

##### 4-2. 전계 발광 양자점 소자 구현 기술

앞에서도 기술하였듯이, QLED는 발광층을 제외하고 OLED와 구조적으로 유사하여 OLED의 양산 노하우를 적용하면 큰 어려움이 없어 보일지 모른다. 하지만 발광층인 양자점의 경우 현재 OLED의 기상 증착 공정으로는 막을 형성할 수 없다. 이 때문에 다양한 막 형성 기술이 연구되고 있다. 고효율의 소자를 구현하기 위해서는 다층 박막 형태의 구조가 필요하며, 양자점이 용매에 분산되어 있어 양자점 용매에 대해 아래의 공통층들이 파괴되지 않아야 하는 기술이 필요하다. 이는 위에서 언급한 바와 같이 해결해야 할 이슈들 중 특히 용액 공정 기반의 QLED를 제작할 경우, 양자점 층 상위 막 형성 시에도 용매에 대한 막이 손상되지 않아야 한다. 이를 위해 적층되는 성분들을 서로 orthogonal solvent system으로 막을 형성하고 있다. 효율적인 다층 박막을 형성하기 위해 그림 2(a)과 같이 양자점에 Hexamethyl disilazance (HMDS)를 섞어 열 경화 시켜줌으로써 표면 거칠기 개선 및 표면 특성을 소수성에서 친수성으로 개질시켜 상부층 용매에 의한 막의 손상도 막아주고 [26], Polyethylenimine ethoxylated (PEIE) 층을 양자점과 정공수송층(HTL) 사이에 삽입하여 양자점 층 보호 뿐만 아니라, Lowest Unoccupied Molecular Level (LUMO)의 Level도 상승시켜 보다 정공의 주입이 용이하게 소자를 제작하여 높은 효율을 보여준 예도 있다



[Fig. 4] Interlayer를 적용한 고효율 소자들[19,20].

[27]. 이는 위에서 언급한 고효율 구동 소자를 제조하기 위한 방법 중 interlayer를 이용하여 전자와 정공의 이동도를 조절하고, 최적의 소자 구조를 만들어 줄 수 있는 기술 중 하나이다. 현재 양자점 발광 소자에서는 정공과 전자의 이동도 차이가 크고, 이로 인해 발광층에서의 여기자 생성이 어려워져 효율 및 성능에 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 매우 얇은 Insulator를 Interlayer로 전자수송층과 발광층 사이에 도입하여 전자와 정공의 이동도를 조절하여 양자점 소자의 효율을 상승시킨 연구 보고가 있다 [28].

지금까지는 유기발광소자에 사용하기 위해 개발되었던 정공수송층, 정공주입층, 전자수송층등의 공통층을 사용하여 소자를 제조, 연구하고 있지만 양자점 발광소자에

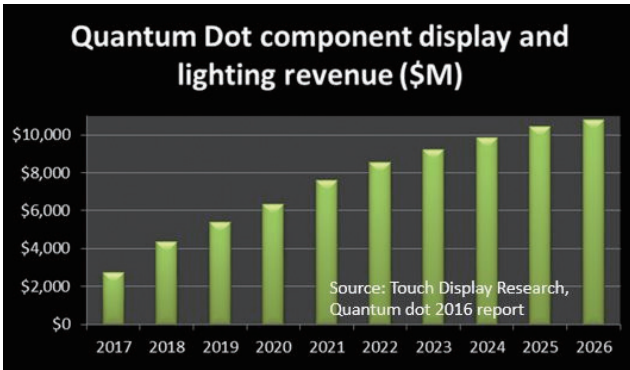
대한 관심이 커지면서 이에 맞는 공통층의 개발 요구가 커지고 있다. 몇몇 국책 과제 등을 시작으로 이러한 요구에 맞는 해결책을 내놓기 위한 노력들이 시도되고 있으며, 양자점 발광소자에 대한 관심이 더욱 커질수록 산업계에서의 재료 개발 참여가 늘어날 것이라고 예측된다.

위에서 언급된 지식들을 기반으로 full color display를 구현하기 위해서는 R, G, B pixel을 정교하게 화소를 형성 할 수 있는 기술이 필요하다. 가장 현실적인 대안은 ink-jet 프린팅 방법일 것이다. 이미 용액공정 기반의 OLED 연구에 있어 상당 부분 기술이 진척되어왔고, 용액공정이 불가피한 양자점에 있어 더할 나위 없이 적합한 공정이라고 할 수 있다. 초기 연구에 있어서 용액 공정에 따른 용매에 의한 하부층의 손상, coffee ring effect, pin-hole, 노즐 막힘 등 Ink-Jet 프린팅의 원론적인 문제에 봉착하였으나 최근 이러한 문제점을 극복한 연구 사례들이 발표 되고 있다. 용액 공정에서 다층 박막을 형성하기 위해서는 용매가 아래층을 손상하지 않는 orthogonality가 매우 중요하다. 이런 측면에서 ZnO를 전자수송층으로 사용하는 inverted QLED는 ink-jet 프린팅에 적합한 플랫폼이라고 할 수 있다 [32]. 여기에 polyetherimide(PEI)로 ZnO 표면 개질을 통해 표면 에너지를 높이고, 적합한 용매 선정을 통하여 표면장력을 줄여 wetting 성을 개선함으로써 균일한 두께의 양자점 박막을 보고한 바 있다 [33]. 이와 같이 공정적으로는 상당부분 개선이 되었지만 소자

성능면에서는 cell 단위의 소자에 비해 열등하다. 공정에서 적용할 수 있는 용매의 확보도 중요하며, 이를 채우기 위한 pixel define layer와의 상용성 등도 중요하다. 하지만 국내/외 디스플레이 제조사들도 ink-jet 프린팅을 통한 QLED 상용화를 위해 공격적인 투자를 하고 있기 때문에 빠른 시일 내 양산화를 할 수 있을 것으로 기대된다.

### 5. 산업계 동향 및 맺음말

2020년 NHK가 BT2020의 색재현이 가능한 방송을 송출하게 되고 디스플레이 업체들은 이를 구현할 수 있는 기기를 제공해야 하는 상황이다. 디스플레이 업체들은 2019년에는 상품이 출시 되어야 하므로 현재쯤이면 최종 후보군을 가지고 보다 효과적인 구현 방법을 저울질하



[Fig. 5] 양자점 시장의 예측 수요[34].

고 있을 것이다. 양자점의 1세대를 이끌었던 QD vision, Nanosys, Nanoco와 같이 기술을 기반으로 설립된 미국, 영국 회사들은 글로벌 기업들에게 인수합병 되거나, 꾸준히 유사 소식들이 들리고 있다. 이와는 대조적으로 우리나라를 포함한 중국 및 일본과 같은 동아시아 국가에서는 새로운 양자점 제조사들이 런칭을 준비하고 있으며, 특히 중국의 경우 산업계에서는 공격적인 투자를 진행하고 있고 학계에서도 많은 인원들이 연구를 진행하며 각종 학회에서 많은 발표물들을 산출하고 있다. 오랜 시간 디스플레이업계에서 가장 높은 자리를 차지하고 있던 우리나라도 현 속도를 살펴보면 중국의 추격을 따돌리기는 어려울 수 있다는 위기 의식을 가져야 할 때다.

양자점 디스플레이는 추후 발전 가능성에 이 글에서 언급한 바와 같이 다양한 모델들이 제시되고 있으며, OLED의 가장 큰 대안이자 차세대 디스플레이라는 데에는 이의를 제기할 자가 없다고 판단된다. 양자점 디스플레이 시장은 향후 10년 안에 5배 정도의 성장을 할 것으로 예상되고 있다. 지금까지는 좋은 위치에서 시장을 선도하고 있으나 이를 지켜나가기 위해서는 보다 체계적이고 공격적인 투자와 연구가 이루어져야 할 것이다.

**References**

[1] L. E. Brus, *J. Chem. Phys.*, **79**, p5566 (1983)  
 [2] L. E. Brus, *J. Chem. Phys.*, **80**, p4403 (1984)  
 [3] K. Gradkowski, N. Pavarelli, T.J. Ochalski, D.P. Williams, J. Tatebayashi, G. Huyet, D.L. Huffaker, *Appl. Phys. Lett.* **95**,061102, (2009).  
 [4] M. F. Frasco, *Sensors*, **9**, p7266 (2009)  
 [5] N. Kim, W. Na, W. Yin, H. Jin, T. Ahn, S. Cho, H. Chae, *J. Mater. Chem. C*, **4**, p2457 (2016)

[6] <http://www.samsung.com/us/>  
 [7] L. Shao, Y. Gao, F. Ya, *Sensors*, **11**, p11736 (2011)  
 [8] The Restriction of Hazardous Substances Directive 2002/95/EC  
 [9] J. Kim, O. Voznyy, D. Zhitomirsky, E. Sargent, *Adv. Mater.*, **25**, p4986 (2013)  
 [10] D. V. Talapin, J. Lee, M. V. Kovalenko, E. V. Shevchenko, *Chem. Rev.*, **110**, p389 (2010)  
 [11] V. I. Klimov, *Nanocrystal Quantum Dots* CRC Press: 2010  
 [12] N. Kim, J. Lee, H. An, C. Pang, S. Cho, H. Chae, *J. Mater. Chem.*, **2**, p9800 (2014)  
 [13] Y. Kang, Z. Song, X. Jiang, X. Yin, L. Fang, J. Gao, Y. Su, Fei Zhao, *Nano. Res. Lett.* **12**, p154 (2017)  
 [14] Jang E, Jun S, Jang H, Lim J, Kim B, Kim, *Adv. Mater.*, **22**, p3076 (2010)  
 J. Park, P. Prabhakaran, K. Jang, Y. Lee, J. Lee, K. Lee, J. Hur, J. Kim, N. Cho, Y. D. Yang, K. Lee, *Nano Lett.*, **10**, p2310 (2010)  
 [15] H. Wang, S. Lin, A. Tang, B. Singh, H. Tong, C. Chen, Y. Lee, T. Tsai, R. Liu, *Angew.Chem. Int Ed.*, **55**,p7924 (2016)  
 [16] Z. Ning, O. Voznyy, J. Pan, S. Hoogland, V. Adinolfi, J. Xu, M. Li, A. Kirmani, J. Sun, J. Minor, K. Kemp, H. Dong, L. Rollny, A. Labelle, G. Carey, B. Sutherland, I. Hill, A. Amassian, H. Liu, J. Tang, O. Bakr, E. Sargent, *Nature materials*, **13**, p822 (2014)  
 [17] J. Lim, M. Park, W. Bae, D. Lee, S. Lee, C. Lee, K. Char, *ACS Nano*, **7**, p9019 (2013)  
 [18] F. Pietra, N. Kirkwood, L. Trizio, A. Hoekstra, L. Kleiberger, N. Renaud, R. Koole, P. Baesjou, L. Manna, A.Houtepen, *Chem. Mater.*, **10**, 1021 (2017)  
 [19] S. Díaz, F. Gillanders, K. Susumu, E. Oh, I. Medintz, T. Jovin, *Chem. Eur. J.*, **23**, p263 (2017)  
 [20] J. R. Lakowicz *Principles of Fluorescence Spectroscopy*. Springer: 2007  
 [21] J. He, H. Chen, Y. Wang, S. Wu, Y. Dong, *SID Symp. Dig. Tech. Papers*, **47**, p349, (2017)  
 [22] J. P. Yang, E. L. Hsiang, H. M. Philip Chen, *SID Symp. Dig. Tech. Papers*, **47**, p21, (2016)  
 [23] H. J. Kim, M. H. Shin, J. S. Kim, Y. J. Kim, *SID Symp. Dig. Tech. Papers*, **47**, p827, (2016)  
 [24] X. Dai, Z. Zhang, Y. Jin, Y. Niu, H. Cao, X. Liang, J. Wang, X. Peng, *Nature*, **515**, p96, (2014)  
 [25] J. S. Steckel, P. Snee, S. Coe-Sullivan, J. P. Zimmer, J. E. Halpert, L.-A. Kim, V. Bulovic, M. G. Bawendi, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **45**, p5796 (2006)  
 [26] Y. Fu, D. K. Kim, H. S. Moon, H. Yang, H. Chae, *J. Mater. Chem. C.*, **5**, p522 (2017)  
 [27] D. Kim, Y. Fu, W. Lee, H. K. Chung, H. Yang and H. Chae, *ACS Nano*, **11**, p1982 (2017)  
 [28] X. Dai, Z. Zhang, Y. Jin, Y. Niu, H. Cao, X. Liang, L. Chen, J. Wang, X. Peng, *Nature*, **515**, p96 (2014)  
 [29] A. Titov, K. Acharya, C. Wang, J. Hyvonen, J. Tokarz, P. Holloway, *SID Symp. Dig. Tech. Papers*, **47**, p58, (2017)  
 [30] L. Qian, Y. Yang, W. Cao, C. Xiang, X. Xie, Z. Liu, S. Chen, L. Wu, X. Yan, *SID Symp. Dig. Tech. Papers*, **47**, p55, (2017)  
 [31] J. Jo, J. Kim, K. Lee, C. Han, E. Jang, Y. Do, H. Yang, *Opt. Lett.*, **41**, p3984 (2016)  
 [32] J. Han, D. Ko, M. Park, J. Roh, H. Jung, Y. Lee, Y. Kwon, J. Sohn, W. K. Bae, B. D. Chin and C. Lee, *J. Soc. Inf. Disp.* **24**, p545 (2016)  
 [33] C. Jiang, Z. Zhong, B. Liu, Z. He, J. Zou, L. Wang, J. Wang, J. B. Peng and Y. Cao, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8**, p26162 (2016)  
 34. Touch Display Research homepage [http://touchdisplayresearch.com/?page\\_id=2553](http://touchdisplayresearch.com/?page_id=2553)