1 콜로이드 양자점의 합성 및 이를 이용한 디스플레이 응용

글_방 지원 박사 | 한국세라믹기술원 전자융합본부

1. 서론

나노미터 크기의 재료는 이들의 부피 대비 넓은 표면적, 외부환경과의 특이적인 상호작용에 의하여 벌크 재료와는 열역학적, 물리적, 화학적 특성이 크게 다르다. 또한 거시세계에서는 소재의 특성을 변화시키기 위해서는 소재의 조성을 달리해야 되지만, 나노세계에서는 동일한 소재에서도 물질의 크기를 제어하여 소재의 특성을 조절할 수 있다.

반도체는 빛, 열, 전기 등 외부 에너지에 의해 가전자대의 전자가 전도대로 들뜨게 되면서, 전하의 흐름이 생기거나, 또는 들뜬 전자가 가전자대의 정공과 재결합하면서 빛 또는 열에너지를 방출할 수 있으며, 이때 방출하는 에너지의 크기는 반도체 소재의 밴드갭에 의해 결정된다. 한편, 반도체 소재에서의 전자와 정공의 쌍인 엑시톤(exciton)의 공간적 분포보다 반도체 소재의 크기가 작게 되면, 엑시톤의 에너지는 양자구속효과(quantum confinement effect)에 의해 증가하게 되어 소재의 크기가 작아질수록 밴드갭은 커지게 된다 [1]. 양자점은 통상적으로 양자구속효과를 가지는 0차원 반도체 나노소재를 일컬으며, 이들 양자점에서 들뜬 전자와 정공은 공간적 제약에 의해 복사 재결합을 보다 용이하게 하여, 밝은 빛을 방출하는 효과를 기대할 수 있다. 또한 앞서 언급한 바와 같이, 크기를 조절하여 발광색을 자유롭게 조절가능하며, 유기염료에 비해 높은 색순도 및 밝은 형광을 보이며, 광안정성도 뛰어나다. 더불어 용액상으로 합성된 양자점은 용매에 분산시켜 공정이 가능하다는 이점을 가지고 있다.

양자점은 기상 증착 방법으로 기판위에 양자점을 성장시키거나, 용액상에서 전구체들이 응집되고 이를 캡핑 리간드 또는 계면 활성제를 통하여 콜로이드 형태로 합성할 수 있다. 용액상으로 합성된 콜로이드 양자점은

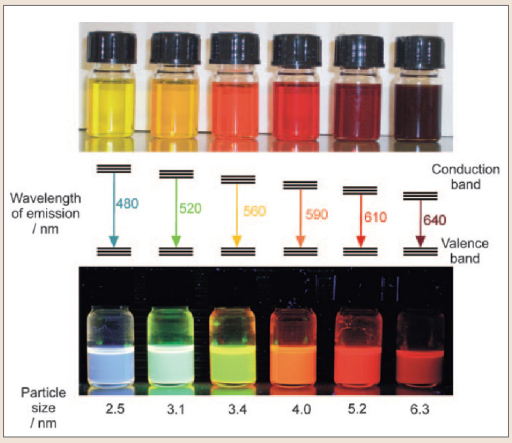

그림 1 ▸ Image of CdSe Quanutum Dot solutions with different sizes (top) under room light and (bottom) under UV light [4].

대량 합성이 용이하고, 인쇄방법으로 다양한 기재에 코팅이 가능하여 발광소자 및 광전소자 등에 보다 널리 활용된다. 용액상에서 합성된 CdSe, CdS 와 같은 카드뮴 칼코지나이드 물질이 가시광선 영역대에서 뛰어난 광학적 성질 및 고 내구성을 가지지만, 카드뮴의 독성 문제 때문에 InP, $CuInS(e)_2$ 등과 같은 비카드뮴계 양자점의 합성에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 본 고에서는 콜로이드 양자점의 합성과 양자점 소재를 이용한 디스플레이 응용에 대해 살펴보고자 한다.

2. 콜로이드 양자점 합성

2.1 고온 열분해법에 의한 양자점 합성

고온 열분해법에 의한 양자점 합성은 1993년 미국 MIT의 Bawendi 연구진에 의해 보고된 방법으로, 고온의 유기용매에 Cd 및 Se 전구체를 과포화 상태로 주입하게 되면, CdSe 핵 형성 및 성장이 일어난다. 또한 양자점 주변을 캡핑 리간드가 둘러싸면서 이들의 표면 에너지를 낮추어 벌크로의 성장을 억제하게 된다 [2,3]. 전구체의 농도가 충분한 환경에서 양자점의 성장은, 크기가 작은 불안정한 입자는 크기가 큰 입자에 비해 상대적으로 빨리 성장하게 되면서 결과적으로는 용기내의 양자점 입자의 크기가 균일해진다. 크기분포가 균일한 양자점은 유사한 밴드갭을 가져 발광 반치폭(full width at half maximum)이 좁은 순수한 컬러 표현이 가능하다. 또한 고온 열분해 합성법에서는 일반적으로 200℃~350℃ 정도의 고온에서 결정성장이 이루어짐으로써 결정결함이 최소화된 고결정성 양자점 소재를 합성할 수 있어 발광효율도 증가한다.

한편, 반응 온도, 전구체의 농도, 리간드의

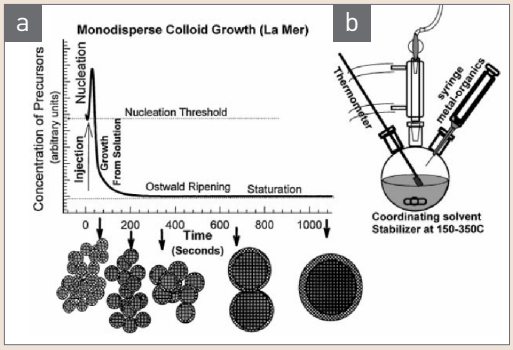

그림 2 ▸ (a) Cartoon depicting the stages of nucleation and growth for the preparation of monodisperse QDs in the framework of the LaMer model. As QDs grow with time, a size series of QDs may be isolated by periodically removing aliquots from the reaction vessel. (b) Representation of the simple synthetic apparatus employed in the preparation of QD samples [3].

종류 및 양 등을 조절하여 양자점 핵 형성 농도 및 성장 속도를 제어하여 양자점의 크기 조절이 가능하여, 그림 2와 같이 CdSe 양자점의 크기를 2 nm 부터 6 nm 까지 조절함으로써 이들의 발광파장대역을 청색부터 적색까지 자유롭게 변화시킬 수 있다 [4]. 뿐만 아니라, 합성 시, 양자점 결정구조 및 결정면과 리간드 반응성을 제어하여 특정 결정 방향으로 성장을 촉진 또는 억제하여 구형이 아닌, 1차원 구조의 막대모양, 2차원 구조의 판상형, 사면체 구조의 네 개의 면에 막대가 성장한 테트라파드 모양 등 다양한 형태의 나노소재의 합성이 가능하다.

수 나노미터 크기의 양자점은 매우 큰 부피 대비 표면적을 가지고, 이에 따라 양자점의 표면에 의해 이들의 물성이 크게 좌우된다. 표면에서의 결정결합이 끊어진 dangling bond에 의해 양자점 밴드갭 내에 새로운 결함 에너지 준위를 가지게 되고, 여기된 전자와 정공이 띠 끝에서 복사 재결합 하지 못하고 결함 에너지 준위로 트랩되는 과정을 유도하게 되어 결과적으로 양자점의 발광효율을 감소시키게 된다. 또한 양자점의 높은 표면 에너지로 인하여 표면에서의 산화, 식각 등 다양한 부 반응이 쉽게 일어나 양자점의 내구성이 취약하게 된다. 양자점의 표면을 보호하고 양자점의 발광효율을 증대시키기 위해 양자점 core에, 이들 양자점의 밴드갭보다 더 큰 밴드갭을 가지는 껍질 양자점을 쌓은 핵/껍질 구조의 양자점이 널리 보고되어 있다. 일예로서, CdSe 핵 양자점에 밴드갭이 큰 ZnS 껍질 양자점을 적층한 CdSe/ZnS (핵/껍질) 양자점에서 광 여기된 전자와 정공은 CdSe 핵 양자점에 잘 포획되어 있어, 복사 재결합 확률이 증대되고 강한 형광특성을 보이고, ZnS 껍질 양자점에 의해 외부 환경으로부터 CdSe 핵 양자점이 보호되어 내구성을 향상 시킬 수 있다. 이와 같이 핵/껍질 구조의 양자점에서 전하가 핵 양자점에 국한되는 type-I 구조의 핵/껍질 양자점은 주로 양자점의 발광특성을 이용하는 디스플레이, 센서 등에 널리 응용된다. 한편 그림 3에서와 같이 핵 층의 전도대와 가전자대의 에너지 준위와 껍질 층의 전도대와 가전자대의 에너지 준위가 교차하는 구조를 가지는 type-II 핵/껍질 양자점에서는 전자와 정공이 핵과 껍질 양자점에 서로 공간적으로 분리되게 되며, 이에 따라 핵과 껍질을 구성하는 소재의 밴드갭보다 더 작은 유효 밴드갭을 가질 수 있어 흡광 및 발광파장의 조절이 보다 용이한 장점이 있으며, 전자와 정공이 공간적으로 분리되어 전하의 이동 및 추출에 유리한 이점을 가지고 있다. 따라서 type-II 구조의 양자점은 근적외선 영역대의 장파장의 발광이 요구되는 바이오 이미징 또는 광전소자로의 응용 연구가 많이 이루어지고 있다 [5].

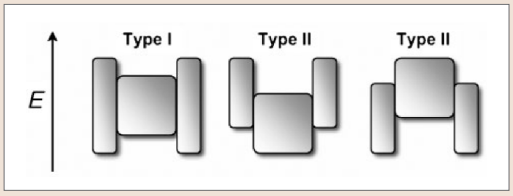

그림 3 ▸ Schematic representation of the energy-level alignment in different core/shell systems realized with semiconductor QDs to date [5].

핵/껍질 구조의 양자점 합성은 핵 양자점이 포함된 반응용기 내에, 껍질 양자점 전구체 용액을 주입하여 핵 양자점 표면에서 껍질 양자점의 성장을 유도한다. 이때 껍질 양자점 전구체의 농도가 임계농도를 넘어 과포화 상태가 되면, 껍질 양자점을 형성하기 위해 주입한 전구체들이 핵 양자점 표면에서 성장을 일으키지 않고, 새로운 nuclei를 형성하여 독립적인 양자점을 형성할 수 있다. 따라서 핵/껍질 양자점 합성을 위해서는 새로운 양자점 형성이 일어나지 않고 기 존재하는 핵 양자점 표면에서 성장이 유도되는 껍질 양자점 전구체의 농도 및 반응 온도 등의 파라미터 조절이 필요하다. 껍질 양자점을 효과적으로 적층하기 위해 양이온 및 음이온 양자점 전구체를 각각 교차적으로 주입하여, 핵 양자점에 양이온과 음이온을 순차적으로 적층하는 SILAR (successive ion layer adsorption and reaction) 코팅법이 널리 사용되고 있다 [6].

2.2 양자점 연속 합성 공정

양자점 소재를 산업계에서 활용하기 위해서는 균일한 특성의 고품질 양자점을 대량생산하는 합성법이 요구된다. 하지만 양자점을 대량합성하기 위해 그림 2B에서 같이 flask 반응기의 용기를 늘리더라도 반응기 내부의 온도를 균일하게 유지하기 어려워 합성된 양자점의 균일도가 떨어지게 된다. 이에 미세 채널을 이용하여 전구체 용액을 지속적으로 흘려주면서 열을 가해 양자점 합성 반응을 연속적으로 보내는 미세 유체 합성법을 통해 양자점을

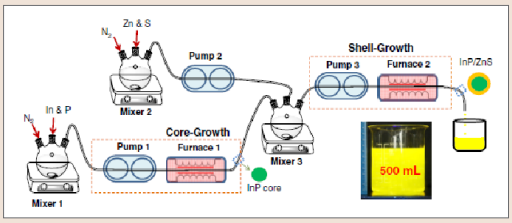

그림 4 ▸ Schematic of a hybrid flow reactor. for InP/ZnS (core/shell) synthesis [7].

연속적으로 합성하는 방법이 연구되고 있다. 즉 전구체 용액을 미세관 안에 지속적으로 흘려주면서 열을 가해 미세관 내부에서 양자점이 합성되어 마치 수돗물 나오듯이 합성된 양자점 용액을 얻는 것이다. 그림 4에서와 같이 미세 유체 반응기를 통하여 InP/ZnS (핵/껍질) 양자점을 합성하기 위해, flask 내에서 In 과 P 전구체를 혼합한 뒤 이들 전구체 용액을 미세 채널로 흘려면서 열을 가해 InP 핵 양자점을 만든 다음, Zn 및 S 전구체 채널과 합쳐진 다음 다시한번 열을 가하여 InP/ZnS (핵/껍질) 양자점을 연속공정으로 합성할 수 있다 [7]. 또한 양자점 연속 합성 공정에서 균일한 입자크기를 가지는 고품질의 양자점 합성을 위해 미세 채널 내부의 유체 흐름을 제어하는 연구들이 활발히 수행되고 있다.

3. 디스플레이 응용

양자점의 뛰어난 발광특성, 높은 발광효율 및 좁은 색순도를 이용하여 고 색재현율의 차세대 디스플레이의 발광 소재로 적용되고 있다.

고색순도의 양자점 기반 발광소재를 사용하여 좀 더 선명하고 자연색에 가까운 디스플레이가 가능하게 되면서, 방송용 표준 카메라가 기록할 수 있는 색 재현 프로파일(DCI)을 그대로 구현할 수 있는 디스플레이가 가능하다. 양자점 디스플레이 응용은 크게 (1) 청색 외부 광원을 흡수하여 녹색 및 적색 파장의 빛으로 변환하는 발광 색 변환용 소재와 (2) 양자점 소재 자체에 전하를 주입하여 이들이 재결합 하여 발광하는 전계 발광용 소재로 분류할 수 있다.

3.1 양자점 광발광 방식의 색 변환 디스플레이 응용

양자점은 높은 발광효율 및 좁은 반치폭과 같은 뛰어난 발광 특성뿐만 아니라, 염료와 달리 밴드갭 이상의 전 파장대역을 강하게 흡수하는 특성을 가지고 있다. 따라서 LCD 기반 디스플레이의 청색 GaN LED 상단에 녹색 및 적색 양자점을 도포하면, 녹색 및 적색 양자점이 청색 백라이트 빛의 일부를 흡수하여 녹색 및 적색 빛으로 변환하여 백색 백라이트(BLU)를 형성하게 되며, 백색광은 다시 편광필름과 컬러필터를 통과하면서 각 빛의 세기를 조절하여 자연색을 표현하게 된다. 양자점 소재는

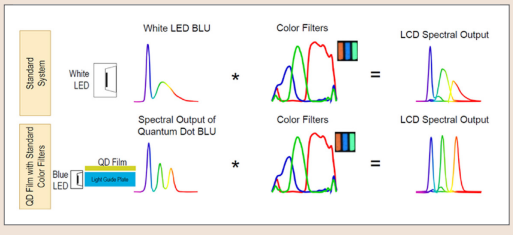

그림 5 ▸ Spectrum comparison of LCD according to BLU using conventional YAG based BLU and QD film (3M Elecronics & Energy Business Group, RoHS Exemption Request 2013-5 Meeting).

YGA 기반의 색변환 형광체에 비해 발광파장 대역폭이 훨씬 좁아 순수한 색 표현에 큰 이점을 가진다 (그림 5). 더불어, 기존 LCD와 대배하여 백색광의 색순도가 높기 때문에 컬러 필터에서 통과하는 효율이 높아져 전체적인 디스플레이의 전력 효율이 상승한다. 양자점이 적용된 LCD 백라이트는 양자점의 성형 방식에 따라 (i) 온-칩 타입, (ii) 레일 타입, (iii) 필름 타입으로 분류할 수 있다 [8].

온-칩 타입은 청색 LED 패키지에 직접 녹색 및 적색 양자점을 도포하여 백색광을 구현하는 것으로(그림 6(a)) 가장 구조가 간단한 장점을 지니고 있으나, LED의 발열 영향에 의한 양자점의 열화 문제와 LED 봉지 수지와의 상용성 문제 때문에 제품화를 위해서는 열화문제를 극복할 수 있는 고내구성의 양자점 소재를

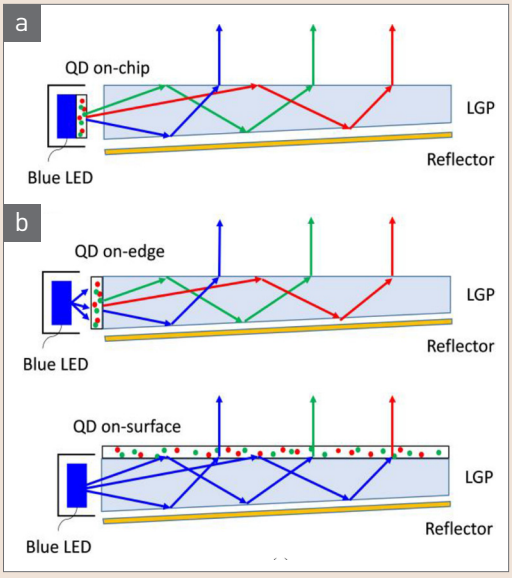

그림 6 ▸ Schematic diagram for three different QD BLU type devices.(a) QD is placed within an LED package. (b) QD is placed between LED and light guide plate,(rai type). (c) QD is placed on the op surface of light guide plate (film type) [8].

개발하고 발열문제 및 상용성 문제를 극복하는 공정 기술이 요구된다. 레일타입은 수 mm의 유리관에 양자점을 밀봉한 뒤 청색 LED 앞에 덧대어 도광판을 통해 백색광을 형성하는 기술로 (그림 6(b)), 양자점의 소모량이 적어 제조비용이 저렴하다는 이점이 있으나, 레일의 가공이 까다롭고 이 구조 역시, 청색 LED 바로 앞에 레일이 존재하여 발열에 의한 양자점 열화 문제가 존재한다. Sony에서 레일타입의 양자점 디스플레이를 적용한 TV 및 모바일 폰을 출시한 바 있다.

필름타입은 양자점을 고분자 수지에 분산하여 시트화 하고, 베리어 필름으로 감싼 양자점 필름을 청색 LED 모듈의 도광판 위에 배치하는 기술로 (그림 6(c)), 열의 영향이 적어 신뢰성을 확보하기가 용이하며, 다양한 화면 크기에 기존의 디스플레이 공정으로 적용이 가능한 기술이다. Nanosys와 3M에서 최초로 기술을 개발하였고, 현재 삼성전자 등에서 출시되고 있는 양자점 TV는 대부분 이 방식을 따른다. 하지만 필름 타입 양자점 부품은 상대적으로 비싼 양자점의 사용량이 많아 대형 디스플레이 모듈 적용에 한계를 보이고 있어, 고효율 양자점 소재 확보 및 공정 기술을 개발하여 양자점 소재 함량을 줄이는 기술 개발이 필요하다.

그림 6에서와 같이 양자점을 LED 위에 도포하여 백색광을 만들어 back light unit (BLU)로 이용하는 방식에서는, 이들 백색광이 다시 컬러필터를 통과하면서 2/3 정도의 빛이 흡수되어 전력소모가 심하며, 컬러필터를 통과할 때 발생하는 청색 빛누출(blue leakage)로 인하

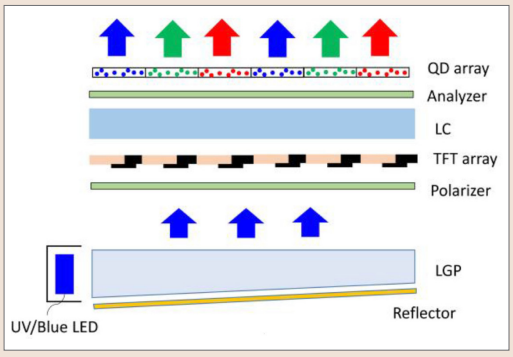

그림 7 ▸ System configuration of a LCD display with patterned QD array [8].

여 녹색, 적색 화소의 색 순도가 다소 감소한다. 이에, 녹색 및 적색 양자점을 혼합하여 도포하는 것이 아니라, 녹색 및 적색 양자점 각각을 따로 직접 화소형성하여 기존 LCD에서의 흡수형 컬러필터 대신에 양자점 컬러변환층을 제작할 수 있다(그림 7). 이 때 청색 LED 광은 그대로 투과하여 청색화소로 사용되고 적색과 녹색은 양자점을 통해 색을 변환하는 방식으로써, 이와 같은 디스플레이는 컬러필터에서 손실되는 광을 최소화 할 뿐 만 아니라 청색 빛누출 현상도 억제하여, 그림 6에서와 같이 양자점을 청색 LED에 도포하여 백색광을 발현하는 양자점 디스플레이에 대비하여 색재현율을 보다 향상시킬 수 있고, 에너지 효율도 향상시킬 수 있다. 양자점 컬러필터 방식의 디스플레이에서 녹색 및 적색 양자점의 화소형성을 위해서는 잉크젯 방식 또는 photo-lithography 방식으로 패턴을 형성할 수 있다. 잉크젯 방식에서는 대면적에서의 필름의 두께 및 균일성 제어가 어려운 단점이 있어 양산 적용에 한계가 있어, 산업계에서는 주로 photo-lithography

방식으로 패턴을 구현하고자 하는데, 이 역시 고농도의 양자점이 분산되어있는 millbase 제작의 한계 및 baking 및 etching 공정에서의 양자점의 신뢰도가 감소하는 문제가 있어, 내열성 및 내화학성이 우수한 양자점 개발 및 낮은 photo-lithography 공정기술이 요구된다.

3.2 양자점 전계발광을 이용한 LED 응용

반도체 소재가 빛을 흡수하여 엑시톤을 형성하고 이들이 복사 재결합 하여 밴드갭 에너지에 대응하는 파장의 빛을 발하는 광발광(photoluminescene)과 달리, 전계발광(electroluminescence)은 외부 전기장에 의해 양 전극에서 전자와 정공이 반도체 소재로 주입되어 엑시톤을 형성하고 이들이 복사 재결합 하여 빛의 형태로 에너지를 방출하는 것을 말한다. 양자점의 전계발광을 이용한 LED (QLED) 소자의 구조는 OLED와 매우 유사하다. 기본적으로 anode, 정공 주입층, QD 발광층, 전자 주입층, Cathode로 구성되며(그림 8(a)), anode와 정공 주입층을 통해 정공이, cathode와 전자 주입층을 통해 전자가 QD층으로 주입되어 빛을 발한다. 콜로이드 양자점 소재를 발광층으로 사용하는 QLED는 매우 좁은 발광폭을 가지는 청색, 녹색, 적색 발광소자에서 각각의 발광이 서로 간섭을 하지 않고 색을 표현함으로써 디스플레이 소자의 색 재현율을 크게 향상시킬 수 있으며(그림 8(b)), 콜로이드 양자점의 표면 개질을 통해 다양한 용매에 분산시켜 전하 수송층의 손상을 최소화하여 용액코팅이 가능하여, 낮은 단가로 대면적 생산이 용이하며 유연 디스플레이 기판에 적용 할 수 있다. 또한 무기물 기반의 양자점은 유기물질에 비해 내구성이 뛰어난 이점이 있다 [9].

1994년 Alivatos 그룹에서 p-paraphenylene vinylene (PPV) 전도성 고분자와 CdSe 양자점이 혼합된 발광층으로 구성된 전계발광 소자에서 양자점의 전계 발광 현상을 최초로 보고하였다 [10]. 하지만 본 소자에서는 양자점 뿐만 아니라 PPV 고분자도 함께 여기(excitation)되어, 두 소재의 발광이 같이 나타나며, 소자의 양자효율(external quantum efficiency, EQE)은 약 0.001%에 불과하다 [10]. 이후 2002년 MIT 연구진들은 유기-정공수송층 /CdSe QDs/유기-전자수송층으로 구성된 적층구조의 QLED 소자를 통해 유기물질의 전계발광을 억제하

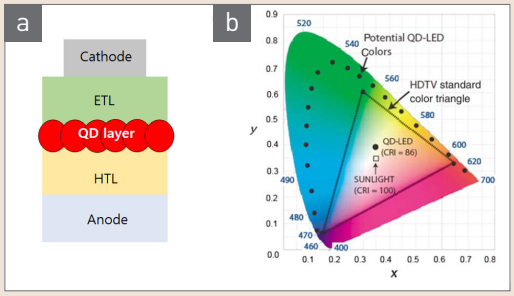

그림 8 ▸ (a) Conventional QLED structure, and (b) comparison of CIE chromaticity diagrams of QLED and standard HDTV [9].

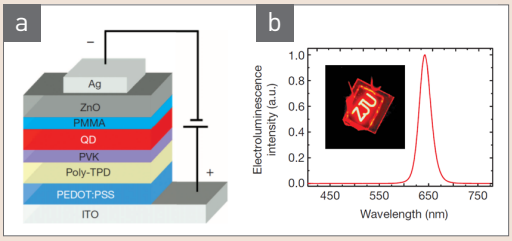

그림 9 ▸ (a) Multilayer QLED device structure and (b) structure, (b) Electroluminescence spectrum at an applied voltage of 3V and, inset, a photograph of a device [13].

고 양자점 전계 발광 특성을 크게 향상시켜, 약 0.52%의 EQE 값을 보고하였다 [11]. 이후 많은 노력에도 불구하고 QLED 소자의 효율이 크게 개선되지 못하였는데, 낮은 효율의 주 원인은 전하 수송층에서 양자점으로 주입되는 전자와 정공의 양이 서로 불균형을 이루기 때문이다. 일반적으로 QLED 소자에서 정공에 비해 전자가 더 빠르게 주입되어 양자점 소재에서 전자와 정공의 양이 불균형을 이루어, 잉여 전자가 존재하기 쉽다. 잉여 전자가 존재하는 양자점에서는 엑시톤이 재결합하면서, 이들이 빛의 형태로 에너지를 방출하지 못하고 잉여 전자에게 에너지를 전이하는 비복사 Auger 재결합 현상이 주도적으로 일어나 전계발광 효율을 감소시키는 것으로 알려졌다[12]. 이에, Peng 그룹에서는 그림 9와 같이 전자 주입층과 양자점 발광층 사이에 부도체인 PMMA 층을 삽입하여 전자의 주입속도를 늦추어, 양자점 소재에 주입되는 전하량의 균형을 맞추었다. 이를 통해 EQE 효율을 21% 까지 향상시켜 OLED와 대등한 효율을 보고하였다 [13].

QLED의 상용화를 위해서는 효율뿐만 아니라, 소자의 안정성을 확보하여 장수명의 소자 구현 기술이 요구된다. 2015년 Lei 그룹에서는 CdSe/ZnS 핵/껍질 구조의 양자점 소재에서 핵/껍질 계면에서 합금구조를 형성하여 2 V 이하의 낮은 전압에서도 전하가 양자점에 주입되어 전계발광을 보이며, 청색, 녹색, 적색 모두 10% 이상의 EQE를 보이는 고효율 QLED 소자를 구현하였다. 특히 본 소자는 낮은 전압에서도 전계발광이 일어나, 구동전압을 낮출 수 있었으며, 이는 소자 수명의 향상효과를 가져왔으며, 적색 발광 소자의 경우 수명이 300,000시간 이상 유지됨을 보였다 [14]. 이와 같이, QLED 소자의 효율과 수명은 지난 20여 년 동안 급속도로 발전하여 QLED의 양산화는 가까운 미래에 이루어 질 것이라고 보여지지만, 아직까지 대부분 Cd 기반의 양자점 소자에서 고특성을 보이며, InP 또는 ZnSe 기반의 친환경 양자점에서는 소자의 효율이 수% 에 머물고 있으며[15], 특히 소자의 수명이 매우 낮은 문제점이 있다. 따라서 QLED의 상용화를 위해서는 고효율 장수명 QLED 소자 구현을 위한 친환경 양자점 소재개발 및 소자 구조 최적화 연구 등이 지속적으로 수행되어야 할 것이며, 이외에도 QLED 화소 형성을 위한 기술이 뒷받침 되어야 할 것이다.

4. 맺음말

본 기고에서는 차세대 고품질 디스플레이용 발광소재로 각광받고있는 콜로이드 양자점 소개 및 양자점 디스플레이 소자의 구조 및 최근 연구동향 등에 대해 알아보았다. 양자점 소재는 벌크에서는 구현하기 어려웠던 뛰어난 광흡수, 높은 색순도, 발광 효율 및 공정적 용이성으로 인해 차세대 발광 소재로 주목 받고 있다. 양자점 소재를 BLU로 활용한 LCD 디스플레이는 이미 제품으로 출시되어 시장을 점유하고 있지만, 여전히 양자점 소재에 대한 기

술적 개발은 요구되고 있는 실정이며, 특히 QLED 분야에서는 상용화를 위해 해결해야 될 문제들이 많이 존재한다. 중금속이 포함되지 않은 비독성 양자점 소재의 효율 및 내구성 확보 뿐만 아니라, 양산화를 위해 고품질의 양자점의 대량생산 공정 기술 확보 및 소자 제조 공정비용 절감 등의 접근이 요구된다.

양자점 기반 디스플레이 분야에 대한 국내 연구는 세계수준으로 올라와 있으며, 보다 체계적이고 공격적인 투자와 연구를 통해 차세대 디스플레이 시장을 선도할 수 있을 것으로 기대한다.

참/고/문/헌

[1] M. T. Nenadovic, T. Rajh, and O. I. Micic, *J. Phys. Chem.*, 89, 397 (1985).

[2] C. B. Murray, D. J. Norris, and M. G. Bawendi, *J. Am. Chem.* Soc., 115, 8706 (1993).

[3] C. B. M., C. R. Kagan, and M. G. Bawendi, *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 30, 545 (2000).

[4] H. Goesmann and C. Feldmann, *Angew. Chem.* Int. Ed., 49, 1362 (2010).

[5] P. Reiss, M. Protière, and L. Li, *Small.*, 5, 154 (2009).

[6] J. J. Li, Y. A. Wang, W. Guo, J. C. Keay, T. D. Mishima, M. B. Johnson, and X. Peng, *J. Am. Chem. Soc.*, 125, 12567 (2003).

[7] K. Kyungnam, J. Sohee, W. Ju Yeon, and H. C. S., *Nanotechnol*, 23, 065602 (2012).

[8] H. Chen, J. He, and S. Wu, *IEEE. J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, 23, 1 (2017).

[9] V. Wood and V. Bulović, *Nano. Rev.*, 1, 5202, (2010).

[10] V. L. Colvin, M. C. Schlamp, and A. P. Alivisatos, *Nature.*, 370, 354 (1994).

[11] S. Coe, W. K. Woo, M. Bawendi, and V. Bulović, *Nature.*, 420, 800 (2002).

[12] W. K. Bae, Y. S. Park, J. Lim, D. Lee, L. A. Padilha, H. McDaniel, I. Robel, C. Lee, J. M. Pietryga, and V. I. Klimov, *Nature. Commun.*, 4, 2661 (2013).

[13] X. Dai, Z. Zhang, Y. Jin, Y. Niu, H. Cao, X. Liang, L. Chen, J. Wang, and X. Peng, *Nature.*, 515, 96 (2014).

[14] Y. Yang, Y. Zheng, W. Cao, A. Titov, J. Hyvonen, J. R. Manders, J. Xue, P. H. Holloway, and L. Qian, *Nat. Photonics.*, 9, 259 (2015).

[15] F. Cao, S. Wang, F. Wang, Q. Wu, D. Zhao, and X. Yang, *Chem. Mater.*, 30, 8002 (2018).

저 / 자 / 약 / 력

성명 방 지 원

학력
2009년 포항공과대학교 화학과 이학사
2013년 포항공과대학교 화학과 이학박사

경력
2013년 ~ 2015년 LG화학기술연구원 과장
2015년 ~ 현재 한국세라믹기술원 선임연구원