

REVIEW

페로브스카이트 발광체의 디스플레이 응용과 개발동향

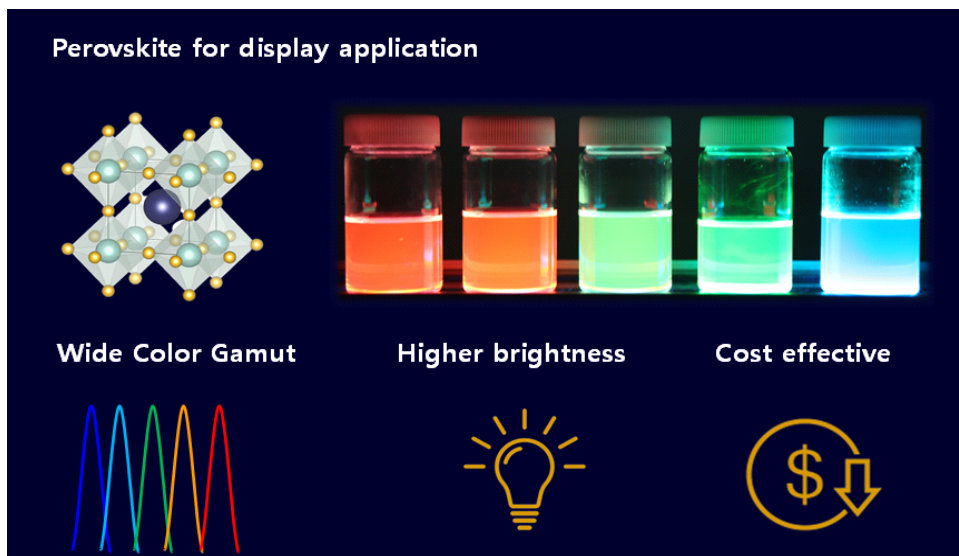
김태준, 이문희*

페로레드(주)

Display Application and Development Trend of Perovskite Emitters

Taejun Kim, Mun Hee Lee*

PEROLED Co., Ltd., Seoul, Korea



ABSTRACT

Metal Halide Perovskites are receiving great attention as a next-generation emitter for display due to their excellent optoelectronic characteristics such as high photoluminescence quantum yield and narrow emission spectrum. Many research groups and companies are trying to apply perovskite emitters to displays, but for commercialization, some obstacles like low stability must be overcome. Herein, the advantages of applying perovskites in display devices are reviewed. Development progress of perovskite display using a color conversion film and limitations of current perovskite display technologies are summarized. Finally, strategies to improve the stability of perovskite color conversion film are described.

Key Words: Perovskite, Display, Stability, Color conversion film

*Correspondence: mhlee@peroled.co.kr



1. 서론

시장에서는 더욱 현실감 있는 디스플레이를 구현하기 위하여 점점 높은 수준의 색영역을 요구한다. 이전 세대 디스플레이에서 표준 색영역으로 이용되던 sRGB, DCI-P3 등의 규격은 UHD 환경에서 표준으로 이용하기에 적합하지 않았고, 이에 ITU(International Telecommunication Union)에서는 2012년 Rec.2020이라는 UHD 환경에서의 색 영역 기준을 제정한 바 있다[1]. 현재 대부분의 TV 디스플레이는 백색광을 기반으로 컬러필터를 통하여 RGB 색상을 구현하는 방식이 이용된다. 가장 일반적인 방식인 LED 백라이트를 이용한 LCD의 경우, Blue LED에 Yttrium Aluminum Garnet (YAG) 형광체를 결합하여 백색광을 얻는 방식이고, 양자점(Quantum Dot, QD)과 유기발광다이오드(Organic Light Emitting Diode, OLED) 방식은 각각 청색 LED를 기반으로 적색, 녹색 QD를 합쳐 백색광을 얻는 방식과 복수 색의 Tandem 구조를 이용하여 백색광을 구현하는 방식으로 나뉜다[2-4]. 높은 색영역을 표현하기 위해서는 기반이 되는 백색광의 순도가 높아야 하나, 현재 이용되고 있는 방식 모두 Rec.2020 색영역을 만족할 만큼의 백색광을 구현하기 어려운 상황이다[5].

차세대 디스플레이용 발광체의 시장성을 고려할 때 발광체의 전력소모와 응용범위도 중요한 요소로 고려할 수 있다. 이전 세대 디스플레이 기술인 PDP가 사장된 요인들 중에는 높은 전력소모와 좁은 응용범위가 있다. PDP 디스플레이는 낮은 단가와 단순한 공정과 같은 장점을 가지고 있었지만, 높은 전력소모와 이로 인한 높은 발열과 같은 문제가 있었다. 또한 응용범위가 대형 TV 디스플레이에 한정된다는 단점으로 인하여 경쟁 기술이었던 LCD에 주도권을 내주었다[6]. 모바일 기기의 보급과 기기의 대형화, 고성능화로 인해서 전력소모가 적은 디스플레이의 중요성은 더욱 커진 상황이다. AR/VR 기기에 응용되는 초소형 디스플레이를 비롯한 넓은 분야의 디스플레이에 적용이 가능할

지도 차세대 디스플레이 기술에 중요한 요소로 작용할 것이다. 이에 차세대 디스플레이 적용을 위해서는 높은 순도의 색을 표현할 수 있어야 하며, 전력소모는 낮고 다양한 크기에 디스플레이에 적용될 수 있는 발광소재의 연구개발이 뒤따라야 한다. 따라서 본고에서는 차세대 디스플레이용 발광소재로서의 할라이드 페로브스카이트의 특성을 소개하고 현재 연구의 이슈와 앞으로의 연구개발 방향을 제시하려고 한다.

2. 디스플레이 발광소재로서의 페로브스카이트

ABX₃ 결정구조의 물질인(A: 양이온, B: 중심금속, X: 음이온) 페로브스카이트는 뛰어난 광학적, 전기적 특성으로 태양전지[7-9], 광검출기[10-12] 등 광전자소재 분야에서 연구되고 있다(Fig. 1). 그 중에서도 A 물질로 Cs⁺, MA⁺(CH₃NH₃⁺, Methylammonium), FA⁺(CH(NH₂)₂⁺, Formamidinium)와 같은 양이온, B물질로 Pb, X물질로는 Cl⁻, Br⁻, I⁻와 같은 할로젠 원소를 이용하는 금속 할라이드계 페로브스카이트(Metal halide perovskite, MHP) 소재는 OLED, QD와 같은 현 세대 디스플레이 소재보다 고순도의 색을 표현할 수 있는 특성을 가지고 있어 차세대 디스플레이 소재로서 유망하게 연구되고 있다. 이와 더불어 높은 흡광계수, 할라

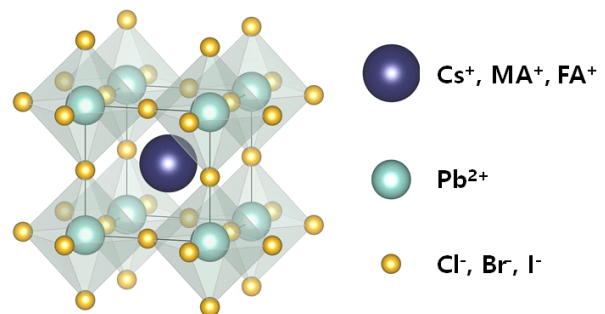


Fig. 1. Structure of metal halide perovskite.



이드 이온 변화를 통한 간편한 발광파장 조정, 비교적 저렴한 소재 가격과 용액 공정으로 대량 생산이 가능한 특성은 페로브스카이트의 디스플레이 적용에 더욱 이점이 된다.

2.1. 발광 성능

페로브스카이트 발광체는 높은 광발광 양자수율 (Photoluminescence Quantum Yield, PLQY) 수치를 가지고 있기 때문에 디스플레이 응용 시 높은 전력 효율을 기대할 수 있다(Fig. 2). 페로브스카이트를 PL(Photoluminescence)용 발광체로 응용하려던 초기 단계에는 PLQY가 20% 수준으로 비교적 낮았지만, 연구가 시작된 지 수년만에 상용화가 가능한 수준인 90% 이상으로 매우 빠르게 향상되었다. 최근 연구되고 있는

페로브스카이트 발광체는 PLQY가 100% 수준에 달한다[13-15]. PLQY가 높다는 것은 동일 전력으로 더욱 높은 휘도를 표현할 수 있다는 것으로 디스플레이용 발광체의 상용화 가능성을 평가할 때 매우 중요한 지표로 작용한다. 상용 디스플레이 발광체들과 페로브스카이트 발광체의 특성을 Table 1에 나타내었다.

Rec.2020 색영역은 Red는 630 nm, Green은 532 nm, Blue는 467 nm 파장의 빛으로 설정되어 있다. 각 원색의 빛이 반치폭(Full width half maximum, FWHM)이 좁을수록 더욱 넓은 색 영역을 확보할 수 있다. 페로브스카이트 발광체는 상용 디스플레이인 QD, OLED 디스플레이용 발광체보다 좁은 반치폭을 가지고 있기 때문에 Rec.2020을 만족할 수 있는 유일한 소재로 기대 받고 있다[16,17].

페로브스카이트 발광체는 QD대비 더욱 높은 흡광계수(extinction coefficient)를 가지고 있다. 동일한 무계를 기준으로 페로브스카이트 발광체는 청색광에서 Cd 계열 QD의 3배, InP 계열 QD 대비 최고 10배 가량의 높은 흡광계수를 가지고 있다[18-20]. 높은 흡광계수는 비용, 넓은 응용성, 밝기와 전력소모 측면의 강점과 연결된다. 페로브스카이트는 QD에 비하여 더욱 적은 발광체로도 동등 이상의 성능을 표현할 수 있다.

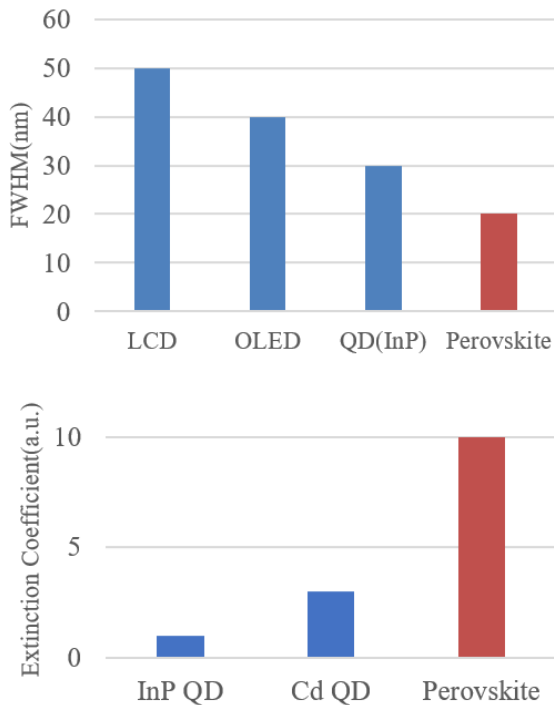


Fig. 2. Comparison of (a) full width half maximum (FWHM), (b) extinction coefficient of perovskite and conventional luminous materials.

Table 1. Comparison of commercial phosphors and perovskite

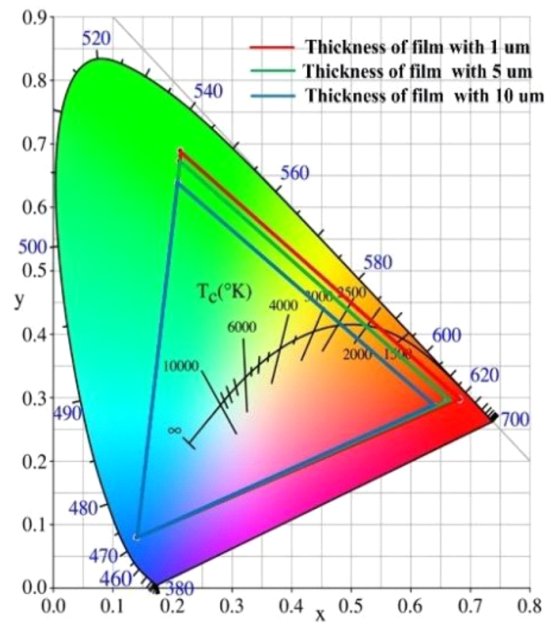
	Organic LED	Cd based QD	InP based QD	Perovskite
PLQY	90%	>90%	>90%	>90%
FWHM	70~90 nm	25~40 nm	35~50 nm	15~25 nm
색영역	60% Rec.2020	90% Rec.2020	85% Rec.2020	>95% Rec.2020
흡광계수 (상대값)	-	0.3	0.1	1
합성온도	고온	고온	고온	상온 합성 가능



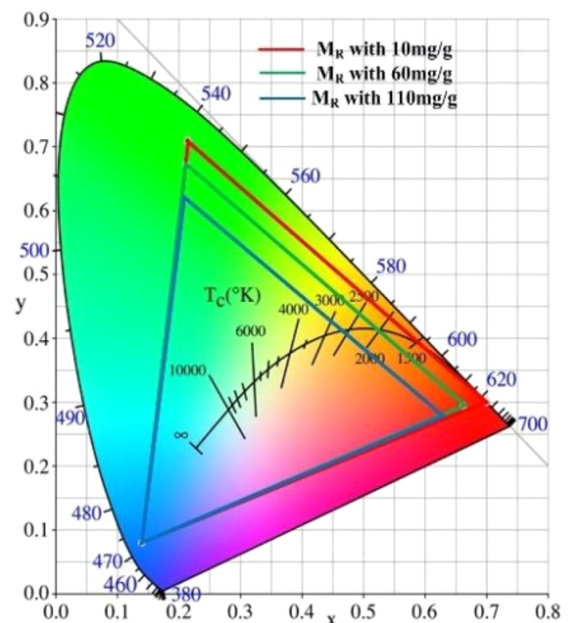
이를 통해 디스플레이 구성에 필요한 발광체 소모량을 줄일 수 있으며, 페로브스카이트 원재료 자체의 낮은 재료비와 시너지를 일으켜 가격적인 측면에서 더욱 강점이 있다. 또한 적은 발광체 소모량으로 더욱 얇은 색변환층을 구성할 수 있어 초소형 디스플레이에 응용할 수 있다는 장점이 있다. AR/VR 기기에 이용되는 초소형 디스플레이를 구성하기 위해서는 일반적인 디스플레이보다 더욱 얇은 발광층이 필요하다. QD를 초소형 디스플레이에 응용할 경우 상대적으로 낮은 흡광계수로 인하여 백라이트를 온전히 변환하기 위해서는 많은 양의 발광체를 이용하여 비교적 두꺼운 색변환층을 구성해야 한다. 이때 발광체의 이용량이 많을수록, 그리고 색변환층이 두꺼울수록 디스플레이의 색품질이 낮아지는 문제가 있기 때문에 QD는 초소형 디스플레이 적용에 어려움이 있다(Fig. 3)[21]. 반면 페로브스카이트 발광체는 더욱 적은 사용량과 얇은 색변환층으로도 백라이트의 온전한 변환이 가능하여 초소형 디스플레이에도 응용이 가능하다. 또한 높은 흡광계수는 밝기와 전력소모 측면에서도 이점을 가져온다. 동일한 백라이트 환경에서 더욱 많은 빛을 흡수하고 변환하기 때문에 더욱 밝은 디스플레이를 표현할 수 있다. 이는 밝기가 중요한 아웃도어 환경에서의 사용성을 높여주고, 디스플레이의 전력소모를 줄여준다. 이는 특히 전력소모가 중요한 모바일 기기 응용 시 강력한 특성이 된다.

2.2. 공정 적합성

상용화된 QD가 입자의 크기 제어를 통하여 방출 파장을 조정하는 반면, 페로브스카이트 발광체는 할로젠 원소의 조성 변화를 통하여 방출 파장의 조정이 가능하다. 할로젠 원소의 변화에 따른 방출 파장은 Fig. 4와 같다. 할로젠 원소 중 I의 비율이 높아질수록 적색 파장, Br⁻의 비율이 높아질수록 녹색 파장, Cl⁻의 비율이 높아질수록 청색 파장의 빛을 방출하며 할로젠 원



(a)



(b)

Fig. 3. The CIE 1931 color coordinates chart for (a) different thickness of QDs-PMMA matrix; and (b) the different mass ratio of QDs to PMMA. Adapted with permission from [21]. Copyright 2020, MDPI.

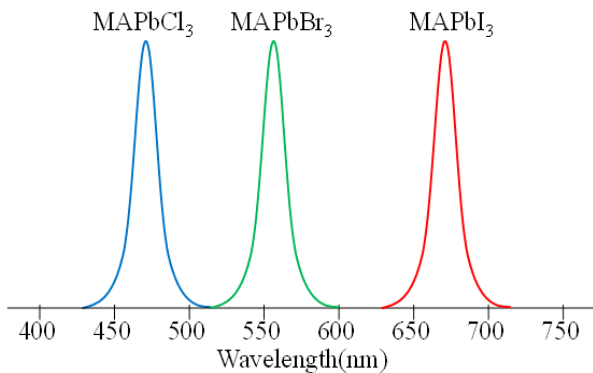


Fig. 4. Emission wavelength of MAPbX₃ (X=Cl, Br, I) perovskite.

소의 비율 조정을 통하여 가시광선 영역의 대부분을 표현할 수 있다. 할로젠 조성의 혼합을 통하여 모든 가시광선 영역대의 파장을 표현할 수 있다. 입자 크기의 정밀한 조정이 필요한 QD에 비하여 간단한 방법으로 파장을 조절할 수 있기 때문에 공정비용을 절감할 수 있다.

페로브스카이트 발광체의 또 다른 공정상 이점은 합성과정을 저온 용액공정으로 진행 가능하다는 점으로, 대면적 생산에 유리하다는 강력한 경쟁력이 있다. 공유결합으로 이루어진 QD의 경우 합성 시 높은 온도와 긴 반응시간이 필요하다. 또한 고품질의 QD를 합성하기 위해서는 정밀한 공정제어를 통하여 core-shell 구조의 균일한 성장을 유도해야 한다. 반면 페로브스카이트 발광체는 상온에서 빠른 속도로 합성이 가능하며 공정비용의 절감이 가능하다[22].

3. 페로브스카이트의 디스플레이 응용 방식

페로브스카이트는 일반적으로 두 가지의 서로 다른 발광방식으로 디스플레이에 적용할 수 있다. 하나는 외부 광원으로부터 에너지를 공급받아 발광하는 Photoluminescence(PL) 방식이고, 다른 하나는 전기로부터 에너지를 공급받아 발광하는 Electroluminescence(EL) 방식이다.

3.1. Photoluminescence (PL)

Photoluminescence방식은 외부 광원을 페로브스카이트에 조사하여 페로브스카이트의 photoexcitation을 유도하여 optical bandgap에 해당하는 빛을 방출하는 방식으로 이용한다. 발광체가 방출하는 빛의 에너지는 흡수하는 빛의 에너지보다 작기 때문에, 일반적으로 에너지가 높은 청색 백라이트를 발광체가 흡수한 후 녹색, 또는 적색광으로 변환하여 백색광을 구현하는 형태로 디스플레이에 응용된다. QD를 이용한 QLED TV가 발광체를 PL 방식으로 이용한 대표적인 예이다.

발광체를 PL 방식으로 디스플레이에 적용하는 방식은 QD의 상용화 과정에서 여러 가지 방식이 논의되었다[23]. QD를 LED칩 표면에 코팅하는 On chip 방식, QD를 유리관에 넣어 LED와 어느 정도 거리를 두는 On edge 방식, QD를 필름화 하여 도광판 위에 위치하는 On surface 방식(색변환 필름 방식) 등을 그 예로 들 수 있다. 이중 On chip 방식과 On edge 방식은 발광체의 사용량이 적다는 장점이 있으나 발광체가 광원에 가깝게 위치해야 하는 특성상, 높은 열과 빛에 노출되어 작동 신뢰성이 확보되지 않았기 때문에 현재 주류로 이용되는 방식은 아니다. 따라서 QD를 이용한 디스플레이가 가장 처음 대중화된 방식은 색변환 필름 방식이다. 이 방식은 앞의 두 방식에 비하여 발광체의 사용량이 많은 단점이 있지만 광원으로부터 거리를 둘 수 있고, 비교적 낮은 열 안정성으로도 적용할 수 있으



며 기존의 LCD 공정을 변형하지 않은 채로 응용할 수 있기 때문에 주류로 이용되고 있다. 페로브스카이트 발광체도 QD와 비슷하게 색변환 필름 방식을 적용한 디스플레이로 가장 처음 상용화될 것으로 기대하며, 실제로 현재 발표된 페로브스카이트 디스플레이 시제품도 대부분 색변환 필름 방식을 통하여 제작되었다 [24,25].

컬러필터 방식도 페로브스카이트 발광체를 PL 방식으로 응용할 수 있는 방안으로 고려되고 있다. 컬러필터 방식은 Fig. 5(b)와 같이 페로브스카이트 발광체를 컬러필터 소재로 이용하여, 청색 백라이트를 직접 RGB로 변환하는 방식이다. 해당 방식은 색변환 필름 방식에 비하여 발광체 소모량이 적고 색변환 과정이 줄어들어 전력효율이 더욱 향상될 것이라고 기대하고 있지만, 색변환 필름 방식보다 더 높은 발광체 안정성이 전제되어야 한다.

3.2. Electroluminescence (EL)

Electroluminescence 방식은 전자와 정공을 페로브스카이트층으로 주입하여 형성된 여기자(exciton)가 페로브스카이트의 밴드 갭(band gap)에 해당하는 빛을 방출하는 방식으로 이용한다. EL 방식의 경우 광원을 사용하지 않기 때문에 컬러필터나 색변환층과 같은 구조가 필요하지 않아 더욱 얇은 디스플레이 구성이 가

능하고, 더욱 효율적인 전력 사용이 가능할 것으로 기대된다. OLED의 작동방식이 발광체를 EL형태로 이용하는 대표적인 예이다(Fig. 6).

페로브스카이트 발광체를 이용한 발광소자는 2014년 Richard H. Friend 그룹에 의하여 상온에서 0.1%의 외부 양자효율(External quantum efficiency, EQE)로 최초로 보고된 이래로 급속도로 발전하여 2015년에는 이태우 교수 연구진에 의해 최초의 고효율 EL 소자(EQE=8.50%)[26], 2021년에는 23.4%의 EQE를 확보한 결과들이 보고되었다[27-29]. 이태우 교수 연구진은 또한 900 mm²의 대면적 발광 소자에서도 21% 이상의 EQE를 갖는 페로브스카이트 발광 소자를 보고하

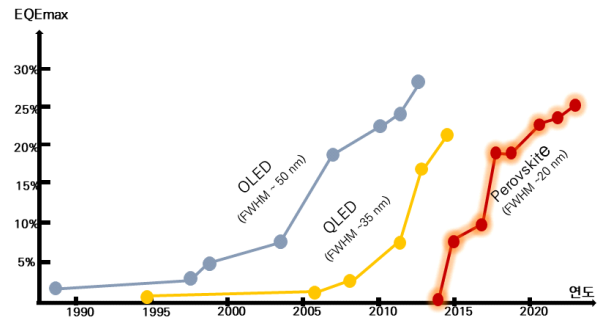


Fig. 6. Yearly peak external quantum efficiency (EQE) growth for perovskite-based light-emitting diodes (PeLEDs) and as well as those of current lighting technologies (OLED and QLED) Adapted with permission from [31]. Copyright 2021, De Gruyter.

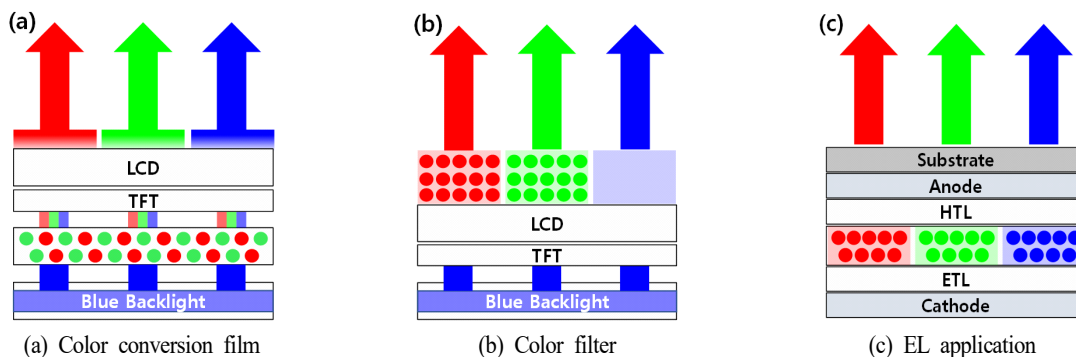


Fig. 5. PL and EL application of perovskite.



Table 2. Reported perovskite display prototype

Group	Blue source	Green source	Red source	Size	Ref.
Seoul National University	Blue LED	Perovskite film	Red QD	28"	[5]
		Perovskite film	Red LED	7"	
Quantum solutions	Blue LED	Perovskite film	KSF on blue chip (direct lit)	7"	[32]
		Perovskite film	KSF on blue chip (edge lit)	7"	
		Perovskite film	KSF in Perovskite film	7"	
Zhijing Nanotech	Blue LED	Perovskite film	KSF on chip	55"	[33]
	Blue mini LED	Perovskite film	Red Perovskite film	32"	[34]
Nanolumi	Blue mini LED	Perovskite film	KSF on chip	32"	[35]
Avantama	Blue mini LED	Perovskite film	KSF on chip	-	[36]

기도 하였다[30]. OLED 또는 QD를 EL로 활용하는 방식이 발견 시점부터 상용화 수준의 효율을 달성하기 까지 상당한 기간이 소요된 것과 대비하여 페로브스카이트의 EL방식 응용은 매우 빠른 효율 상승을 보이고 있다(Table 2)[31].

4. 사업화를 위한 페로브스카이트 발광체 및 필름 개발동향

앞에서 설명한 바와 같이 페로브스카이트 발광체는 디스플레이 응용에 있어서 뛰어난 특성을 가지고 있다. 각국의 기업들은 이런 특성을 디스플레이를 비롯한 광학장비들에 적용하기 위하여 연구개발을 진행 중이다.

4.1. 디스플레이 분야 응용

현재까지 발표된 페로브스카이트 응용 디스플레이는 대부분 청색 백라이트와 적색 형광체를 기반으로 녹색 페로브스카이트 발광체를 적용하여 순도 높은 백색 백라이트를 구현하는 방식으로 제작되었다. 모든 디스플레이는 앞서 PL 방식 응용방안 중 하나로 설명한 색변환 필름 방식으로 적용되었으며, 그중 일부는

Mini LED를 채용하여 디스플레이의 색영역과 더불어 명암비까지 확보한 제품을 선보이기도 하였다.

서울대학교 이태우 교수 연구진은 Consumer Electronics Show(CES) 2020에서 녹색 페로브스카이트 색변환필름과 적색 QD를 이용한 디스플레이를 전시하였다. 제작된 디스플레이는 4K 해상도와 Rec.2020 기준 90% 이상의 높은 색영역을 보여주었다[5].

사우디아라비아의 Quantum Solutions는 녹색 페로브스카이트 색변환 필름과 다양한 종류의 백라이트 조합을 이용한 7" LCD 시제품을 제작하였다. 청색 백라이트와 녹색 페로브스카이트 필름을 동일하게 이용하고, 적색 발광체의 구성을 서로 다르게 조합한 4가지 종류의 디스플레이를 제작하여 각 구성의 장단점을 확인하였다[32].

중국의 Zhijing Nanotech는 광학필름 기업인 Hefei Lucky, TV 제조사인 TCL과 협력하여 페로브스카이트 색변환 필름을 이용한 55" LCD TV 시제품을 발표하였다. 해당 제품은 청색 LED와 On-chip 형식으로 적용된 KSF, 녹색 페로브스카이트 색변환 필름을 이용하였다[33]. Zhijing Nanotech는 또한 녹색과 적색 페로브스카이트 색변환 필름을 동시에 적용한 32" LCD 디스플레이를 발표하였다[34].



싱가폴의 Nanolumi는 2019년 페로브스카이트를 활용한 녹색 색변환필름을 출시하였다. 또한 해당 필름을 이용한 32" LCD 디스플레이 시제품을 2020년 공개하였다. Nanolumi에 따르면 해당 디스플레이는 90% Rec.2020 이상의 색영역을 보였으며, 최고 밝기 2,000 nits 이상을 표현할 수 있었다[35].

스위스 기업인 Avantama는 CsPbBr₃, FAPbBr₃와 같은 페로브스카이트 발광체를 판매하고 있다. Avantama는 청색 LED와 On-chip 형식의 KSF, 녹색 페로브스카이트 색변환 필름을 이용하여 LCD 디스플레이를 제작하였으며, 90% Rec.2020 이상의 색영역과 2,200 nits의 최고 밝기를 구현했다고 발표하였다[36].

4.2. 디스플레이 외 분야의 응용

Quantum Solutions는 페로브스카이트의 우수한 광전자적 성능을 PL 방식으로 응용하여 UV Sensor, X-ray Scintillator에 적용하려는 움직임을 보이고 있다. UV Sensor의 경우, Silicon 기반의 광검출기가 녹색광에 대해 높은 감도를 지니나 자외선에 대해서는 감도가 떨어지는 단점을 보완하기 위하여 페로브스카이트를 이용한다. 페로브스카이트를 광검출기에 코팅하여 자외선을 녹색광으로 변환하면, UV에 대해서도 높은 감도를 지닌 광검출기를 제작할 수 있다. X-ray Scintillator의 경우 페로브스카이트가 X-ray를 가시광선으로 변환할 수 있는 특성을 이용한다. 페로브스카이트를 통하여 변환된 가시광선은 광검출기나 PMT (photomultiplier tube)를 통해 쉽게 관측될 수 있다.

Zhijing Nanotech는 페로브스카이트를 태양전지의 효율을 향상시키는 목적으로 활용할 수 있다고 홍보하고 있다. 일반적으로 사용하는 실리콘 태양전지의 경우, 자외선 영역의 흡수가 부족하여 태양광을 최대한으로 활용할 수 없지만, 페로브스카이트를 이용하여 자외선을 가시광선으로 변환할 경우 태양광 변환 효율이 증가할 수 있다.

5. 페로브스카이트 디스플레이의 당면 과제와 해결 방안

5.1. 문제점

이와 같이 세계 여러 기업에서 페로브스카이트를 디스플레이용 발광체로 상용화하려는 움직임이 있으나 상용화를 위해서는 소재의 낮은 안정성 및 이로 인한 기기의 짧은 작동 수명에 대한 개선이 이루어져야 한다. 디스플레이용 페로브스카이트 발광체는 특히 디스플레이 구동환경인 고온, 고습, 고광속 환경에서의 안정성이 확보되어야 하는 과제가 남아있다. 예를 들어 MAPbI₃ 페로브스카이트는 고온에서 PbI₂ + CH₃NH₂ + HI 형태 또는 PbI₂ + CH₃I + NH₃ 형태로 분해될 수 있다[37]. 물분자는 페로브스카이트 표면을 공격하여 표면결함을 유도하고, 입자 간의 뭉침을 유도하여 페로브스카이트의 발광성능을 저해한다[38]. 또한 빛에 의해 생성된 O₂⁻는 MAPbI₃를 CH₃NH₂ + PbI₂ + I₂ 형태로 분해하는 등 빛에 의한 붕괴도 관찰된다[39,40].

페로브스카이트 발광체를 연구하는 업체들은 디스플레이 적용 과정에서 낮은 안정성에 의한 문제점들을 다수 제기하였다. Quantum Solutions는 페로브스카이트 발광체를 50°C 환경에서 3시간만 노출시켜도 PL intensity가 기존의 5%~20% 수준까지 감소하는 문제점을 지적하였다. 또한 고온과 지속적인 청색광 노출 환경에서 PLQY가 수일 안에 0% 수준까지 급격히 감소하는 문제도 지적하였다[41]. Avantama 역시 페로브스카이트 발광체의 디스플레이 응용 시 고광속 조건에서의 신뢰성 테스트가 반드시 필요함에도 불구하고 충분한 연구가 진행되지 않았다는 점을 강조하였다[42].

5.2. 해결방안

연구진들은 이러한 문제점을 해결하기 위하여 페로브스카이트 발광체를 외부 환경으로부터 보호하기 위한 다양한 방법들을 연구하고 있다. 발광체 또는 필름

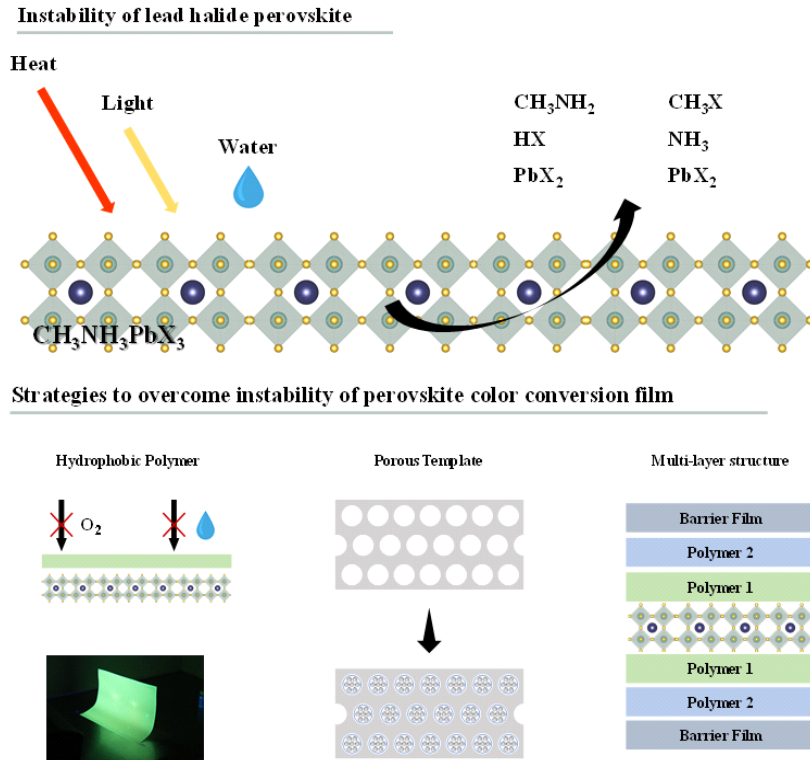


Fig. 7. Schematic illustration describing instability of LHP and the strategies to improve the stability of perovskite color conversion film.

의 소재, 구조의 다변화 등 다양한 접근을 통하여 안정성을 높이려는 방법들이 연구되고 있다(Fig. 7).

5.2.1. 고분자 도입을 통한 발광체 보호

페로브스카이트 발광체를 외부 환경으로 보호하기 위한 보편적인 방법으로 고분자를 이용하여 발광체를 감싸는 방법이 있다.

발광체를 둘러싼 고분자는 산소, 물로부터의 접촉을 차단함으로써 입자의 안정성을 향상한다.

Maksym V. Kovalenko 그룹은 polymethyl methacrylate(PMMA), polystyrene(PS), styrene-ethylene-butylene-styrene block co-polymer(SEBS), a cyclic olefin copolymer(TOPAS)와 같은 4가지 종류의 고분자를 도입하여 고분자의 종류가 페로브스카이트 발광체의 발광성과 안정성에 미치는 영향을 확인하였다[43]. Yajie Dong

그룹 또한 swelling-deswelling microencapsulation 방법을 통한 페로브스카이트 필름의 제작방법을 제시하면서 PS, PMMA, polycarbonate (PC), acrylonitrile butadiene styrene(ABS), cellulose acetate (CA), polyvinyl chloride (PVC)와 같은 여러 종류의 고분자를 이용하여 필름을 제작함으로써 다양한 페로브스카이트-고분자 조합으로 구성된 필름의 안정성을 확인하였다[44].

Haizheng Zhong 그룹은 MAPbBr_3 페로브스카이트와 Polyvinylidene fluoride(PVDF)를 이용한 연구결과를 발표하였으며[45,46], 최근 연구에서는 발광 파장 조정과 안정성 확보를 위하여 페로브스카이트 A site로 $\text{Rb}_x\text{Cs}_{1-x}$ 를 이용하고 PMMA를 고분자 매트릭스로 도입하는 등 입자와 레진의 다양한 조합을 연구하고 있다[47].

배병수, 이태우 교수 공동 연구진은 methacrylate계



열 고분자를 이용하여 물 또는 산·염기 환경에서 600 일 이상, 85°C, 85% 습도의 고온·고습 환경에서 100 일 이상 안정적인 PLQY를 유지하는 페로브스카이트 발광체를 보고하였다[48].

페롤레드(주)는 페로브스카이트 발광체 합성 및 응용에 관한 핵심기술과 특허를 보유하고 있으며, 해당 기술을 바탕으로 독자적인 입자와 레진의 조성을 통하여 고온, 고습 환경에서 1,000시간 이상 가동 후에도 초기 Intensity의 90% 이상을 유지하는 고안정성의 녹색 페로브스카이트 색변환 필름을 개발하였다. 동 필름은 고광속 환경 하에서도 상당 시간 초기 Intensity의 85% 이상을 유지하는 높은 안정성을 보였다. 해당 필름은 적색 QD와 조합되어 고순도의 백색 백라이트를 표현하는 LCD디스플레이에 응용할 수 있을 것으로 기대한다.

5.2.2. 다공성 구조체를 이용한 발광체 보호

페로브스카이트 발광체의 열적 안정성과 고광속 환경에서의 안정성을 확보하기 위하여 입자를 다공성 구조체로 감싸는 방법도 연구되고 있다. 다공성 실리카 [49,50]와 Metal organic framework(MOF)[51-53]가 대표적으로 연구되고 있는 물질이다.

Quantum Solutions의 연구진들은 페로브스카이트 발광체와 다공성 실리카 입자, Isobornyl acrylate(BOA)를 혼합하여 복합체를 형성하고, 복합체를 분쇄 후 아크릴계 레진으로 다시 필름화 하여 색변환 필름을 제작하는 방식을 제시하였다. 해당 색변환필름은 450 nm, 150 mW/cm²의 고광속 환경에서 1,000시간 동안 초기 대비 70%의 PL Intensity를 유지하는 안정성을 보였다[54]. 동 연구진은 추가적으로 다공성 실리카 입자 내부에서 페로브스카이트 발광체를 합성하고 용융을 통해 실리카의 공극을 밀봉하는 방식으로 높은 안정성의 페로브스카이트 색변환 필름을 제작하였다. 해당 필름은 450 nm, 200 mW/cm²의 고광속 환경에서

240시간 동안 안정적인 PL intensity를 보였다[55].

5.2.3. 필름 제작방법과 구조 변경을 통한 안정성 향상

페로브스카이트 색변환 필름을 제작하기 위하여 일반적으로 이용되는 방법은 합성된 페로브스카이트 발광체를 고분자와 혼합하여 경화하는 방식이다. 필름의 형성방식 또는 구조의 변화를 통하여 페로브스카이트 색변환 필름의 안정성을 강화하려는 연구도 이어지고 있다(Fig. 8).

Haizheng Zhong 그룹은 페로브스카이트 색변환 필름의 *in-situ* 제작방법을 제안하였다. 반면, 해당 방법은 페로브스카이트 전구체와 고분자 매트릭스를 용매에 혼합하여 페로브스카이트가 포함된 필름을 제작하는 방식이다. Zhijing Nanotech는 해당 방법을 도입하여 발광체들의 응집을 방지함으로써 높은 발광성과 안정성을 확보할 수 있음을 주장하였다[45,56]. 동 연구진은 페로브스카이트 색변환 필름 제작 시 용매 휘발과정에서 생기는 미세기공들이 산소/수분과의 접촉을 늘리고, 안정성을 저하하는 점에서 착안하여 용매를 이용하지 않는 페로브스카이트 색변환 필름 제작방법을 제안하기도 하였다[57]. Zhi-Kuang Tan 그룹은 페로브스카이트 발광체를 레진에 고르게 분산시키기

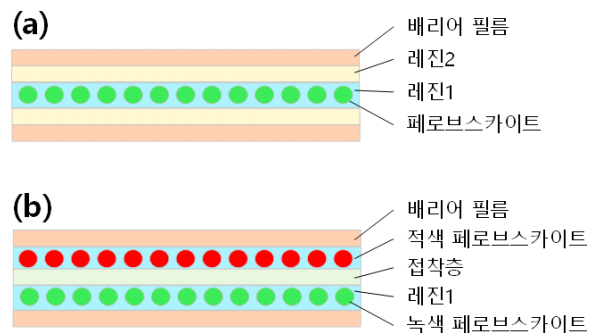


Fig. 8. Structure of (a) multi-layered green perovskite color conversion film, (b) red-green hybrid perovskite color conversion film.



위하여 페로브스카이트 발광체 자체를 광개시제 역할로 이용하여 제작한 페로브스카이트-PS 필름을 보고하였다. 해당 필름은 초기 PLQY 44%에서 24시간 물속에 보관된 이후 36%로 떨어진 안정성을 나타내었다[58].

색변환 필름에 배리어 필름을 도입하거나 필름을 여러 겹으로 구성하여 발광층의 외부 환경으로부터의 노출을 차단하려는 시도도 여러 업체로부터 이루어지고 있다[59]. Avantama는 고온, 고습, 청색광에 대한 안정성을 향상하기 위하여 다층으로 구성된 색변환 필름 구조를 제시하였다[60]. Avantama는 또한 적색과 녹색 페로브스카이트 발광체를 단일 레진에 혼합할 경우, 발광성능 감소가 일어나는 현상을 방지하기 위하여 적색과 녹색 페로브스카이트 색변환 필름을 각각 제조 후 분말화하고 새로운 레진에 분산하여 적-녹 단일 층 페로브스카이트 필름을 제작하는 방안을 제시하기도 하였다[61].

6. 결론 및 전망

페로브스카이트 소재는 차세대 디스플레이용 발광체로 상용화될 수 있는 강력한 후보이다. 페로브스카이트 디스플레이의 특성은 크게 넓은 색 영역, 낮은 전력소모, 낮은 재료비라는 키워드로 정리할 수 있다. 페로브스카이트 발광체는 상용화된 어떤 디스플레이 발광체보다도 좁은 반치폭의 빛을 표현할 수 있으며, 높은 흡광계수를 가진 소재이기 때문에 상용화가 이루어질 경우 색영역과 밝기, 전력소모 측면에서 현세대 디스플레이를 뛰어넘는 성능을 보이면서도 재료비는 더욱 낮은 새로운 디스플레이 시장을 창출할 수 있을 것이다. 페로브스카이트 디스플레이의 뛰어난 성능은 일부 업체들의 시제품 제작으로 증명이 되었지만, 상용화까지 도달하기 위해서는 소재의 고온, 고습, 고광속 환경에서의 안정성 확보가 반드시 이루어져야 한다. 현 수준보다 더욱 높은 발광성능과 안정성을 확보하기 위해서는 기존에 연구되었던 물질보다 더욱 견고하게

페로브스카이트 입자를 보호할 수 있는 고분자 소재와 필름 구조가 요구된다.

페롤레드(주)를 비롯한 페로브스카이트 업체들은 소재의 안정성 향상을 위하여 연구개발을 진행하고 있으며, 일부 업체는 고습 환경과 같은 특정 조건에서 디스플레이 제조사가 요구하는 신뢰성 시험 조건을 만족하는 등의 유의미한 결과를 달성하였다. 이는 페로브스카이트 소재가 처음 발광체로 응용되었을 시점보다 월등히 향상된 안정성이며, 현재 상용화된 디스플레이 소재인 OLED, QD 소재가 발견 시점부터 상용화까지 20년 가까운 시간이 소요된 점과 비교하였을 때 굉장히 빠른 성능향상을 보이고 있다. 이러한 빠른 발전속도로 보아 머지않은 시일에 페로브스카이트를 활용한 디스플레이 제품의 상용화가 이루어질 것으로 생각하며, 페로브스카이트 디스플레이는 낮은 가격과 높은 성능으로 디스플레이 시장에 큰 파급효과를 가져올 것이다.

기호설명

- MHP: Metal halide perovskite
- EL: Electroluminescence
- EQE: External quantum efficiency
- FWHM: Full width half maximum
- OLED: Organic light emitting diode
- PL: Photoluminescence
- PLQY: Photoluminescence quantum yield
- QD: Quantum dot

ACKNOWLEDGEMENTS

Author Contributions

TJK and MHL drafted the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.



Funding

This work was supported by the National Research Foundation (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (2020M3H4A3082483).

Declarations of Competing Interests

The authors declare that they have no competing interests.

AUTHORS



김태준
2013 ~ 2020년: 서울대학교 재료공학부
학사
현재: 페롤레드(주)
[관심분야] 디스플레이, 나노소재, 차세대 디스플레이 발광체, 광전자 소재



이문희
1993 ~ 1997년: KAIST 산업공학과 학사
1997 ~ 1999년: KAIST 산업공학과 석사
현재: 페롤레드(주)
[관심분야] 디스플레이, 나노소재, 차세대 디스플레이 발광체, 광전자 소재

REFERENCES

- [1] ITU-R, Parameter Values for Ultra-High Definition Television Systems for Production and International Programme Exchange, BT.2020-0, 2012.
- [2] Nishiura, S.; Tanabe, S.; Fujioka, K.; Fujimoto, Y. Properties of Transparent Ce:YAG Ceramic Phosphors for White Led. *Opt. Mater.* 2011, 33 (5), 688-691.
- [3] Luo, Z.; Xu, D.; Wu, S. T. Emerging Quantum-Dots-Enhanced LCDs. *J. Disp. Technol.* 2014, 10 (7), 526-539.
- [4] Sasabe, H.; Kido, J. Development of High Performance Oleds for General Lighting. *J. Mater. Chem. C.* 2013, 1 (9), 1699.
- [5] Lee, H.; Park, J.; Kim, S.; Lee, S. C.; Kim, Y. H.; Lee, T. W. Perovskite Emitters as a Platform Material for Down-Conversion Applications. *Adv. Mater. Technol.* 2020, 5 (10), 2000091.
- [6] 한국산업기술발전사. 전기전자; 산업통상자원부. 서울, 2020; pp 106-179.
- [7] Kojima, A.; Teshima, K.; Shirai, Y.; Miyasaka, T. Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells. *J. Am. Chem. Soc.* 2009, 131, 6050-6051.
- [8] Heo, J. H.; Im, S. H.; Noh, J. H.; Mandal, T. N.; Lim, C. S.; Chang, J. A.; Lee, Y. H.; Kim, H.; Sarkar, A.; Nazeeruddin, M. K. et al. Efficient Inorganic-Organic Hybrid Heterojunction Solar Cells Containing Perovskite Compound and Polymeric Hole Conductors. *Nat. Photonics* 2013, 7, 486-491.
- [9] Green, M.; Ho-Baillie, A.; Snaith, H. The Emergence of Perovskite Solar Cells. *Nat. Photonics* 2014, 8 (7), 506-514.
- [10] Dou, L.; Yang, Y.; You, J.; Hong, Z.; Chang, W.; Li, G.; Yang, Y. Solution-Processed Hybrid Perovskite Photodetectors with High Detectivity. *Nat. Commun.* 2014, 5 (1), 5404.
- [11] Ahmadi, M.; Wu, T.; Hu, B. A Review on Organic-Inorganic Halide Perovskite Photodetectors: Device Engineering and Fundamental Physics. *Adv. Mater.* 2017, 29 (41), 1605242.
- [12] Tian, W.; Zhou, H.; Li, L. Hybrid Organic-Inorganic Perovskite Photodetectors. *Small* 2017, 13



- (41), 1702107.
- [13] Schmidt, L. C.; Pertegás, A.; González-Carrero, S.; Malinkiewicz, O.; Agouram, S.; Mínguez Espallargas, G.; Bolink, H. J.; Galian, R. E.; Pérez-Prieto, J. Nontemplate Synthesis of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ Perovskite Nanoparticles. *J. Am. Chem. Soc.* 2014, 136, 850-853.
- [14] Protesescu, L.; Yakunin, S.; Bodnarchuk, M.; Krieg, F.; Caputo, R.; Hendon, C.; Yang, R.; Walsh, A.; Kovalenko, M. Nanocrystals of Cesium Lead Halide Perovskites (CsPbX_3 , X = Cl, Br, And I): Novel Optoelectronic Materials Showing Bright Emission with Wide Color Gamut. *Nano Lett.* 2015, 15 (6), 3692-3696.
- [15] Zhong, Q.; Cao, M.; Xu, Y.; Li, P.; Zhang, Y.; Hu, H.; Yang, D.; Wang, L.; Zhang, X.; Zhang, Q.; et al. L-Type Ligand-Assisted Acid-Free Synthesis of CsPbBr_3 Nanocrystals with Near-Unity Photoluminescence Quantum Yield and High Stability. *Nano Lett.* 2019, 19 (6), 4151-4157.
- [16] Han, T. H.; Jang, K. Y.; Dong, Y.; Friend, R. H.; Sargent, E. H.; Lee, T. W. A Roadmap for the Commercialization of Perovskite Light Emitters. *Nat. Rev. Mater.* 2022, doi: 10.1038/s41578-022-00459-4.
- [17] Kumar, S.; Jagielski, J.; Kallikounis, N.; Kim, Y.; Wolf, C.; Jenny, F.; Tian, T.; Hofer, C.; Chiu, Y.; Shih, C. et al. Ultrapure Green Light-Emitting Diodes Using Two-Dimensional Formamidinium Perovskites: Achieving Recommendation 2020 Color Coordinates. *Nano Lett.* 2017, 17 (9), 5277-5284.
- [18] Lim, S. J.; Zahid, M. U.; Le, P.; Ma, L.; Entenberg, D.; Harney, A. S.; Condeelis, J.; Smith, A. M. Brightness-Equalized Quantum Dots. *Nat. Commun.* 2015, 6 (1).
- [19] Tamang, S.; Lincheneau, C.; Hermans, Y.; Jeong, S.; Reiss, P. Chemistry of InP Nanocrystal Syntheses. *Chem. Mater.* 2016, 28 (8), 2491-2506.
- [20] Maes, J.; Balcaen, L.; Drijvers, E.; Zhao, Q.; De Roo, J.; Vantomme, A.; Vanhaecke, F.; Geiregat, P.; Hens, Z. Light Absorption Coefficient of CsPbBr_3 Perovskite Nanocrystals. *J. Phys. Chem. Lett.* 2018, 9 (11), 3093-3097.
- [21] Zhao, Z.; Wang, X.; Yang, K.; Fan, F.; Wu, D.; Liu, S.; Wang, K. Analysis of Factors Affecting Optical Performance of Gan-Based Micro-Leds with Quantum Dots Films. *Crystals* 2020, 10 (3), 203.
- [22] Akkerman, Q.; Rainò, G.; Kovalenko, M.; Manna, L. Genesis, Challenges and Opportunities for Colloidal Lead Halide Perovskite Nanocrystals. *Nat. Mater.* 2018, 17 (5), 394-405.
- [23] Coe-Sullivan, S.; Liu, W.; Allen, P.; Steckel, J. Quantum Dots for LED Downconversion In Display Applications. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2012, 2 (2), R3026-R3030.
- [24] Sinatra, L.; Lutfullin, M.; Lentijo-Mozo, S.; Bakr, O. 62-8: Invited Paper: High Color Gamut Qdot™ LCD Displays with Perovskite Quantum Dots: Devices Architecture, Performance and Reliability. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 2021, 52 (1), 909-911.
- [25] Luechinger, N. 62-10: Invited Paper: How to Further Extend the Image Quality Lead of LCD Displays. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 2021, 52 (1), 914-916.
- [26] Cho, H.; Jeong, S. H.; Park, M. H.; Kim, Y. H.; Wolf, C.; Lee, C. L.; Heo, J. H.; Sadhanala, A.; Myoung, N. S.; Lee, T. W. et al. Overcoming the Electroluminescence Efficiency Limitations of Pe-



- rovskite Light-Emitting Diodes. *Science* 2015, 350 (6265), 1222-1225.
- [27] Tan, Z. K.; Moghaddam, R. S.; Lai, M. L.; Docampo, P.; Higler, R.; Deschler, F.; Price, M.; Sadhanala, A.; Pazos, L. M.; Friend, R. H. et al. Bright Light-Emitting Diodes Based on Organometal Halide Perovskite. *Nat. Nanotechnol.* 2014, 9 (9), 687-692.
- [28] Kim, Y. H.; Cho, H.; Heo, J. H.; Kim, T. S.; Myoung, N. S.; Lee, C. L.; Im, S. H.; Lee, T. W. Multicolored Organic/Inorganic Hybrid Perovskite Light-Emitting Diodes. *Adv. Mater.* 2015, 27 (7), 1248-1254.
- [29] Kim, Y. H.; Kim, S.; Kakekhani, A.; Park, J.; Park, J.; Lee, Y. H.; Xu, H.; Nagane, S.; Rappe, A. M.; Lee, T. W. et al. Comprehensive Defect Suppression in Perovskite Nanocrystals for High-Efficiency Light-Emitting Diodes. *Nat. Photonics* 2021, 15 (2), 148-155.
- [30] Kim, Y. H.; Park, J.; Kim, S.; Kim, J. S.; Xu, H.; Jeong, S. H.; Hu, B.; Lee, T. W. Exploiting the Full Advantages of Colloidal Perovskite Nanocrystals for Large-Area Efficient Light-Emitting Diodes. *Nat. Nanotechnol.* 2022, 17 (6), 590-597.
- [31] Kar, S.; Jamaludin, N. F.; Yantara, N.; Mhaisalkar, S. G.; Leong, W. L. Recent Advancements and Perspectives on Light Management and High Performance in Perovskite Light-Emitting Diodes. *Nanophotonics* 2020, 10 (8), 2103-2143.
- [32] Sinatra, L.; Lutfullin, M.; Lentijo-Mozo, S.; Bakr, O. M. 62-8: Invited Paper: High Color Gamut QDot™ LCD Displays with Perovskite Quantum Dots: Devices Architecture, Performance and Reliability. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 2021, 52 (1), 909-911.
- [33] Chen, N.; Bai, Z.; Wang, Z.; Ji, H.; Liu, R.; Cao, C.; Wang, H.; Jiang, F.; Zhong, H. P-119: Low Cost Perovskite Quantum Dots Film Based Wide Color Gamut Backlight Unit for LCD TVs. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 2018, 49 (1), 1657-1659.
- [34] Li, F.; Ji, H.; Xu, H.; Bai, Z.; Liu, R.; Li, J.; Zhong, H. 16-4: Late-News Paper: High Color Gamut Mini-Led Backlight Demon Based on Dual-Emissive Perovskite Quantum Dots Films. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 2020, 51 (1), 219-221.
- [35] Unboxing the World's First 32" Perovskite 4K HDR MiniLED Display (Prototype). <https://www.youtube.com/watch?v=gYHywDUoiPA> (accessed Jul 3, 2022).
- [36] Luechinger, N. A. 62-10: Invited Paper: How to Further Extend the Image Quality Lead of LCD Displays. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 2021, 52 (1), 914-916.
- [37] Latini, A.; Gigli, G.; Ciccioli, A. A Study on the Nature of the Thermal Decomposition of Methylammonium Lead Iodide Perovskite, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$: An Attempt to Rationalise Contradictory Experimental Results. *Sustainable Energy Fuels* 2017, 1 (6), 1351-1357.
- [38] Mosconi, E.; Azzipiroz, J. M.; De Angelis, F. Ab Initio Molecular Dynamics Simulations of Methylammonium Lead Iodide Perovskite Degradation by Water. *Chem. Mater.* 2015, 27 (13), 4885-4892.
- [39] Shanguan, Z.; Zheng, X.; Zhang, J.; Lin, W.; Guo, W.; Li, C.; Wu, T.; Lin, Y.; Chen, Z. The Stability of Metal Halide Perovskite Nanocrystals—a Key Issue for the Application on Quantum-Dot-Based Micro Light-Emitting Diodes Display. *Nanomaterials* 2020, 10 (7), 1375.



- [40] Lu, M.; Zhang, Y.; Wang, S.; Guo, J.; Yu, W.W.; Rogach, A. L. Metal Halide Perovskite Light-Emitting Devices: Promising Technology for Next-Generation Displays. *Adv. Funct. Mater.* 2019, 29, 1902008.
- [41] Sinatra, L.; Lutfullin, M.; Abbas, A. S.; Pan, J.; Bakr, O. M. P-203: Late-News Poster: Novel Techniques for Highly Stable Luminescent Perovskite Halide Quantum Dots. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 2018, 49 (1), 1681-1684.
- [42] Luechinger, N. A.; Oszajca, M.; Loher, S. 41-4: Perovskite Quantum Dots: Bringing LCD Technology to the Next Level. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 2018, 49 (1), 522-524.
- [43] Rainò, G.; Landuyt, A.; Krieg, F.; Bernasconi, C.; Ochsenein, S. T.; Dirin, D. N.; Bodnarchuk, M. I.; Kovalenko, M. V. Underestimated Effect of a Polymer Matrix on the Light Emission of Single CsPbBr₃ Nanocrystals. *Nano Lett.* 2019, 19 (6), 3648-3653.
- [44] Wang, Y.; He, J.; Chen, H.; Chen, J.; Zhu, R.; Ma, P.; Towers, A.; Lin, Y.; Wu, S. T.; Dong, Y. et al. Ultrastable, Highly Luminescent Organic-Inorganic Perovskite-Polymer Composite Films. *Adv. Mater.* 2016, 28 (48), 10710-10717.
- [45] Wu, X. Gang; Tang, J.; Jiang, F.; Zhu, X.; Zhang, Y.; Han, D.; Wang, L.; Zhong, H. Highly Luminescent Red Emissive Perovskite Quantum Dots-Embedded Composite Films: Ligands Capping and Caesium Doping-Controlled Crystallization Process. *Nanoscale* 2019, 11 (11), 4942-4947.
- [46] Zhou, Q.; Bai, Z.; Lu, W. Gao; Wang, Y.; Zou, B.; Zhong, H. In Situ Fabrication of Halide Perovskite Nanocrystal-Embedded Polymer Composite Films with Enhanced Photoluminescence for Display Backlights. *Adv. Mater.* 2016, 28 (41), 9163-9168.
- [47] Li, F.; Huang, S.; Liu, X.; Bai, Z.; Wang, Z.; Xie, H.; Bai, X.; Zhong, H. Highly Stable and Spectrally Tunable Gamma Phase Rb_x Cs_{1-x}PbI₃ Gradient-Alloyed Quantum Dots in PMMA Matrix through a Sites Engineering. *Adv. Funct. Mater.* 2021, 31 (11), 2008211.
- [48] Jang, J.; Kim, Y. H.; Park, S.; Yoo, D.; Cho, H.; Jang, J.; Jeong, H. B.; Lee, H.; Bae, B. S.; Lee, T. W. et al. Extremely Stable Luminescent Cross-linked Perovskite Nanoparticles under Harsh Environments over 1.5 Years. *Adv. Mater.* 2020, 33 (3), 2005255.
- [49] Wang, H. C.; Lin, S. Y.; Tang, A. C.; Singh, B. P.; Tong, H. C.; Chen, C. Y.; Lee, Y. C.; Tsai, T. L.; Liu, R. S. Mesoporous Silica Particles Integrated with All-Inorganic CsPbBr₃ Perovskite Quantum-Dot Nanocomposites (MP-Pqds) with High Stability and Wide Color Gamut Used for Backlight Display. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2016, 55 (28), 7924-7929.
- [50] Chen, P.; Liu, Y.; Zhang, Z.; Sun, Y.; Hou, J.; Zhao, G.; Zou, J.; Fang, Y.; Xu, J.; Dai, N. In Situ Growth of Ultrasmall Cesium Lead Bromine Quantum Dots in a Mesoporous Silica Matrix and Their Application in Flexible Light-Emitting Diodes. *Nanoscale* 2019, 11 (35), 16499-16507.
- [51] Ren, J.; Li, T.; Zhou, X.; Dong, X.; Shorokhov, A. V.; Semenov, M. B.; Krevchik, V. D.; Wang, Y. Encapsulating All-Inorganic Perovskite Quantum Dots into Mesoporous Metal Organic Frame-



- works with Significantly Enhanced Stability for Optoelectronic Applications. *Chem. Eng. J.* 2019, 358, 30-39.
- [52] Chen, W.; Liu, H.; Fan, R.; Wang, P.; Sun, T.; Yang, Y. Formation and Encapsulation of Lead Halide Perovskites in Lanthanide Metal-Organic Frameworks for Tunable Emission. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2020, 12 (8), 9851-9857.
- [53] Zhang, D.; Xu, Y.; Liu, Q.; Xia, Z. Encapsulation of $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ Perovskite Quantum Dots in MOF-5 Microcrystals as a Stable Platform for Temperature and Aqueous Heavy Metal Ion Detection. *Inorg. Chem.* 2018, 57 (8), 4613-4619.
- [54] Sinatra, L.; Lutfullin, M.; Lentijo-Mozo, S.; Bakr, O. M. 16-5: Late-News Paper: High Flux Stable Perovskite Quantum Dots-Polymer Composite for down-Converting Applications. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 2020, 51 (1), 222-223.
- [55] An, M. N.; Park, S.; Brescia, R.; Lutfullin, M.; Sinatra, L.; Bakr, O. M.; De Trizio, L.; Manna, L. Low-Temperature Molten Salts Synthesis: CsPbBr_3 Nanocrystals with High Photoluminescence Emission Buried in Mesoporous SiO_2 . *ACS Energy Lett.* 2021, 6 (3), 900-907.
- [56] Bai, Z.; Li, J.; Zhang, T.; Li, F.; Liu, R.; Qiu, S.; Zhang, R.; Zhong, H. 44.1: *In-Situ* Fabrication Strategy of Perovskite Quantum Dots for Novel Display Technology. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* 2021, 52 (S1), 295-295.
- [57] Wang, Z.; Fu, R.; Li, F.; Xie, H.; He, P.; Sha, Q.; Tang, Z.; Wang, N.; Zhong, H. One-Step Polymeric Melt Encapsulation Method to Prepare CsPbBr_3 Perovskite Quantum Dots/Polymethyl Methacrylate Composite with High Performance. *Adv. Funct. Mater.* 2021, 31 (22), 2010009.
- [58] Wong, Y. C.; De Andrew Ng, J.; Tan, Z. K. Perovskite-Initiated Photopolymerization for Singly Dispersed Luminescent Nanocomposites. *Adv. Mater.* 2018, 30 (21), 1800774.
- [59] Quantum Solutions, "Technical Data Sheet QDot™ SharpGreen Perovskite QDs Polymer Film", Revised 12/11/2020.
- [60] Lüchinger, N. A.; Fangjian, L.; Mitchell-Williams, T.; Loher, S.; Luminescent Component, US 11,008,508 B2, 2021.
- [61] Lüchinger, N. A.; Weber I.; Loher, S.; Oszejca, M.; Hartmeier, B. Luminescent Component, US 10,326,058 B2, 2019.