

이 사업은 복권기금 및 과학기술진흥기금의 지원을 통한 사업으로 우리나라의 공익적 가치에 기여하고 있습니다.

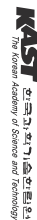


ISBN 979-11-86795-94-1

2024년 석학 커리어 디시전스 과학기술정책제언

페로브스카이트 디스플레이의 신소재 개발과 상업화를 향한 정책 제언

이태우(공학부 정회원, 서울대학교)



2024년 석학 커리어 디시전스
과 학 기 술 정 책 제 언

페로브스카이트 디스플레이의 신소재 개발과 상업화를 향한 정책 제언

이태우(공학부 정회원, 서울대학교)



발행처

한국과학기술한림원
031) 726-7900
kast@kast.or.kr

발행인

유옥준

발행일

2024년 12월

홈페이지

<http://www.kast.or.kr>

디자인/인쇄

경성문화사



이 보고서의 모든 저작권은 한국과학기술 한림원에 있습니다.



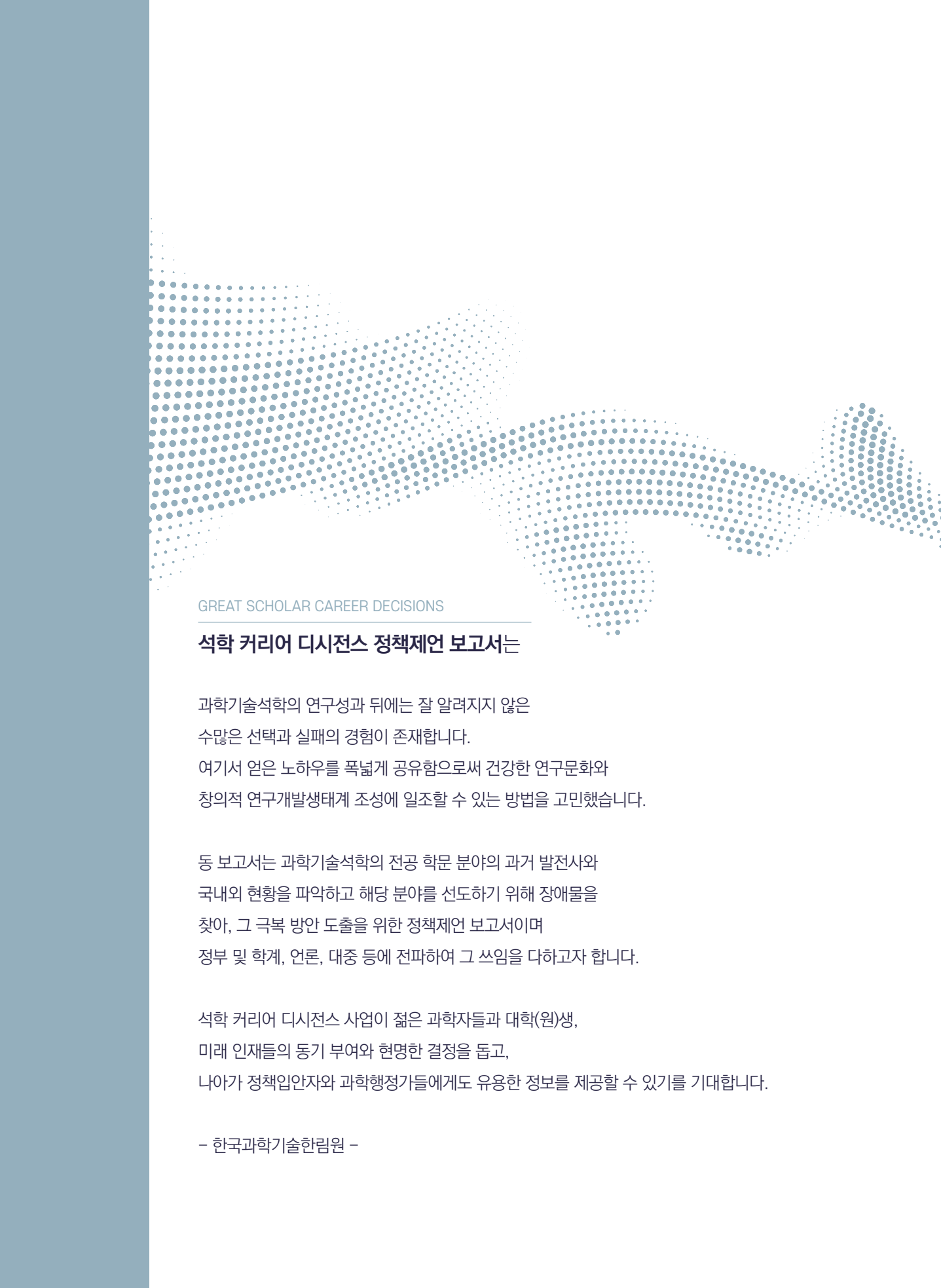
한국과학기술한림원은

대한민국 과학기술분야를 대표하는 석학단체로서 1994년 설립되었습니다.
우리나라 과학기술계를 대표하는 석학집단으로서,
1,000여명의 과학기술분야 석학들이 한국과학기술한림원의 회원이며,
대한민국이 과학기술 선진국으로 도약하여
글로벌 난제를 해결할 수 있는 최첨단 과학기술 업적을 창출할 수 있도록
창의와 도전의 연구개발 생태계를 만드는 데 기여하고자 합니다.

한국과학기술한림원 더 알아보기

-  홈페이지 www.kast.or.kr
-  블로그 kast.tistory.com
-  포스트 post.naver.com/kast1994
-  페이스북 www.facebook.com/kastnews





GREAT SCHOLAR CAREER DECISIONS

석학 커리어 디시전스 정책제언 보고서는

과학기술석학의 연구성과 뒤에는 잘 알려지지 않은
수많은 선택과 실패의 경험이 존재합니다.
여기서 얻은 노하우를 폭넓게 공유함으로써 건강한 연구문화와
창의적 연구개발생태계 조성에 일조할 수 있는 방법을 고민했습니다.

동 보고서는 과학기술석학의 전공 학문 분야의 과거 발전사와
국내외 현황을 파악하고 해당 분야를 선도하기 위해 장애물을
찾아, 그 극복 방안 도출을 위한 정책제언 보고서이며
정부 및 학계, 언론, 대중 등에 전파하여 그 쓰임을 다하고자 합니다.

석학 커리어 디시전스 사업이 젊은 과학자들과 대학(원)생,
미래 인재들의 동기 부여와 현명한 결정을 돕고,
나아가 정책입안자와 과학행정가들에게도 유용한 정보를 제공할 수 있기를 기대합니다.

- 한국과학기술한림원 -



이 태 우
서울대학교 교수
(한국과학기술한림원 정회원)

이태우 교수는 2014년 페로브스카이트 발광 소재와 소자 연구를 개척한 선구자이자, 세계 최고의 효율과 수명을 갖춘 발광 다이오드를 개발한 세계적인 선도 연구자이다. 그의 연구는 페로브스카이트 기반 디스플레이 및 광전소자의 혁신을 이끌며, 차세대 디스플레이 기술의 상용화를 앞당기는 데 기여하고 있다.

특히, 그는 2019년부터 5회 ‘세계에서 가장 영향력 있는 연구자(Highly Cited Researchers, HCR)’로 선정되며, 해당 분야에서의 독보적인 연구성과를 국제적으로 인정받았다.

그의 뛰어난 연구 성과는 다수의 수상 실적으로도 증명된다. 그는 2008년 젊은과학자상(대통령상)을 시작으로 2013년 이달의과학기술자상(장관상), 2021년 한국공학상(대통령상)을 수상하였으며, 같은해 한국과학기술한림원 정회원(Fellow)로 선임되었다. 2020년 미국 Material Research Society (MRS) 석학회원(Fellow)으로 선임되었고, 2023년 경암상에 선정되었다. 또한, 2024년에는 SPIE 석학회원으로 선임되었고, 한화고분자학술상, 나노코리아, 과학기술정보통신부 장관상, 한국물리학회 학술상을 수상하며, 국내외에서 그 학문적 기여를 인정받았다.

이 교수는 연구 성과를 바탕으로 창업에도 적극적으로 나서 SN Display(에스엔디스플레이) 주식회사를 설립하였으며, 2023년, 2024년 CES에서 차세대 TV 및 태블릿 디스플레이 프로토타입을 공개하여 페로브스카이트 발광 소재의 실용화와 산업적 적용을 선도하고 있다.

그는 지속적으로 디스플레이 및 광전자 소재 분야에서 혁신적인 연구를 수행하며, 미래 기술을 주도하는 세계적인 연구자로 자리매김하고 있다.



페로브스카이트 디스플레이의 신소재 개발과 상업화를 향한 정책 제언

1. 페로브스카이트 디스플레이 개요	04
2. 페로브스카이트 자발광 디스플레이 개요	14
3. 페로브스카이트 발광 다이오드의 국내외 연구 현황	20
4. 상업화를 위한 페로브스카이트 디스플레이 기술 개발	56
5. 정책제언	74
6. 결론 및 전망	84
참고 문헌	52

1

페로브스카이트 디스플레이 개요

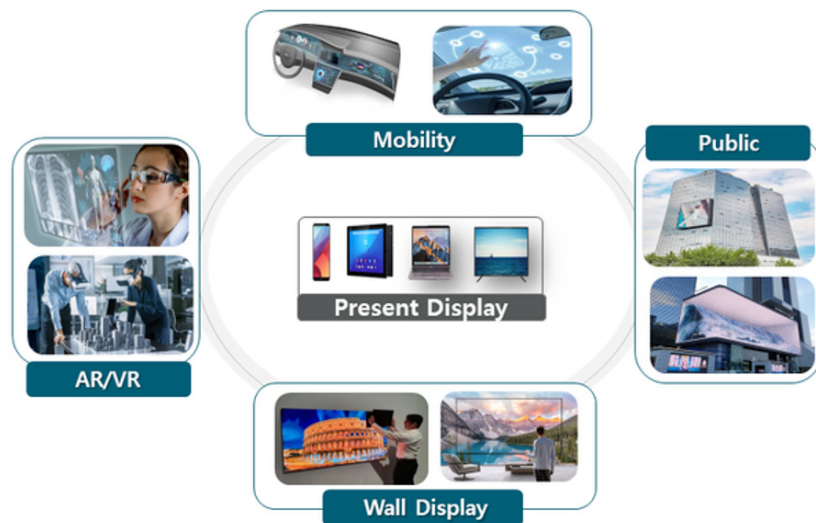
- 페로브스카이트 디스플레이의 필요성
- 페로브스카이트 발광체 개요

페로브스카이트 디스플레이 개요

101 페로브스카이트 디스플레이의 필요성

1.1.1 디스플레이 개요 및 산업 동향

그림 1 디스플레이의 응용 분야



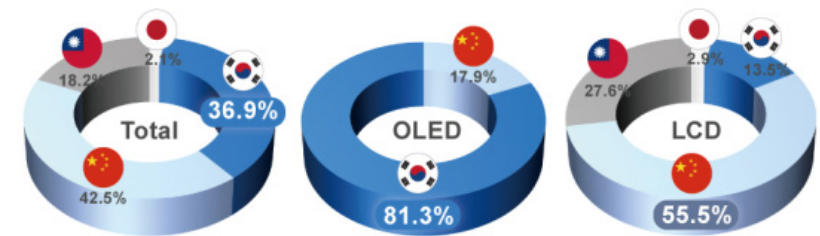
출처: 한국디스플레이협회

고도의 정보화 사회에 있어 디스플레이 기술은 사용자에게 디지털 정보를 전달하는 필수적인 구성 요소임에 생활 곳곳에 사용되고 있다. 전통적인 TV, 스마트폰, 모니터 등은 정보를 표시하여 사용자에게 전달하고, 영화/드라마/게임 등의 엔터테인먼트용 콘텐츠를 소비할 수 있게 해준다. 상업적인 용도로는 대형 디스플레이를 통해 옥외 광고를 제공하거나, 키오스크나 태블릿을 이용해 상품을 표시하고 판매할 수 있다. 터치스크린과 병합되면 정보전달 및 교육용 플랫폼을 제공하는 형태로도 활용 가능하

며, 더욱이 최근에는 차량용 디스플레이를 탑재하여 교통 상황 등을 실시간으로 보여주거나, 헤드마운트 디스플레이를 개발하여 증강현실/가상현실을 구현할 수 있는 차세대 기술들이 선보여지고 있다. 이러한 다양한 활용처로 인해 디스플레이는 지속해서 성장하는 시장으로 평가되며, 전 세계 디스플레이 시장의 규모는 약 1,300억 달러(~180조 원, 출처: OMDIA)로 추산된다.

한편 기술 산업 동향으로서, 국내에서는 디스플레이가 국가첨단전략기술 17개 중 4개에 해당하는 주요한 기술이며(2023.06.02, '국가첨단전략기술 지정 등에 관한 고시'), 2004년부터 2020년까지 대한민국이 세계 시장 점유율 1위를 유지했던 산업이기도 하다. 하지만 정부 지원을 등에 업은 중국업체들에 의해, LCD 기반 중저가 디스플레이 시장이 중국에 추월당하였다. 현재는 OLED 및 양자점 기술의 격차를 이용한 중고가형 디스플레이 시장 점유율로, 2021년부터 세계 시장 점유율 2위를 유지하고 있다. 하지만 OLED 시장 또한 가파른 중국의 성장세로, 수년 내에 한국을 앞설 수 있다는 전망이 예상됨에 따라, 첨단 디스플레이 산업의 초격차를 유지하기 위하여 디스플레이 시장의 패러다임을 바꿀 차세대 디스플레이 기술의 투자와 개발이 시급하다.

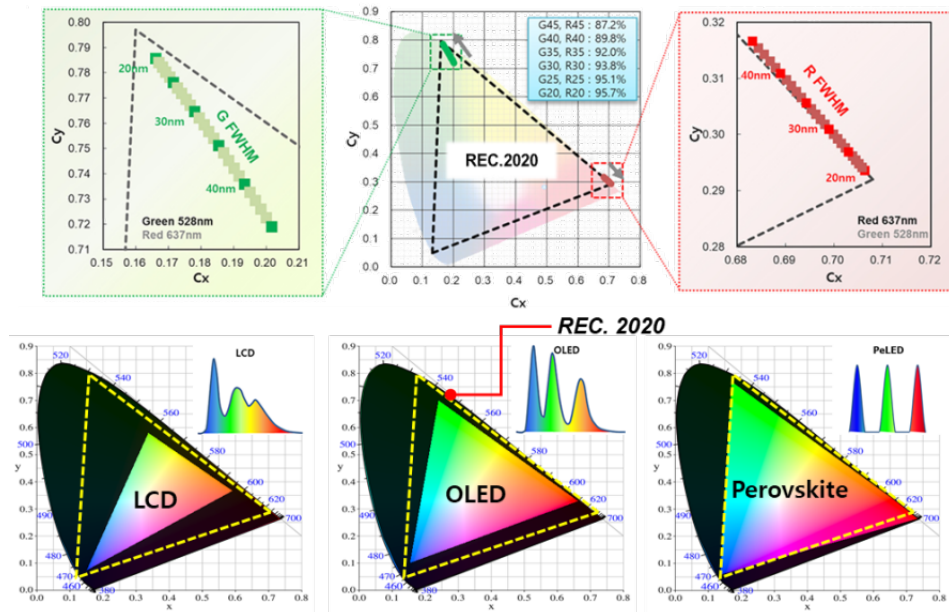
그림 2 디스플레이의 시장 점유율(2022)



출처: 한국디스플레이협회, OMDIA, Invest Korea.

1.1.2 색 재현력의 중요성과 고색순도 페로브스카이트 디스플레이

그림 3 반치폭에 따른 색좌표의 변화 및 디스플레이별 색 영역 비교



출처: Jang, E. et al., 2020. Environmentally Friendly InP-Based Quantum Dots for Efficient Wide Color Gamut Displays. ACS Energy Letters, Vol. 5, pp. 1316-1327.

디스플레이 산업이 발전함에 따라 디스플레이는 단순히 정보 전달을 넘어, 몰입감 있는 초실감적 경험을 제공하는 매체로 자리 잡고 있다. 특히 증강현실 기술의 발전과 함께 TV, 스마트폰 등 전통적인 디스플레이 형태를 넘어 AR, VR 기기와 같은 새로운 초실감형 디스플레이에 대한 수요가 증가하였다. 이러한 디스플레이들은 높은 몰입도를 위해 현실감 극대화를 요구하게 되었다.

디스플레이의 성능을 평가하는 기준으로는 해상도, 명암비, 색 재현력이 있다. 해상도는 이미지를 구성하는 픽셀의 개수를 의미하며, 기존의 해상도 위주의 디스플레이 개발 동향에 따라 현재에는 4k/8k UHD급의 초고해상도 디스플레이가 상용화되어, 실제 사람의 눈으로 구분이 불가능한 수준까지 이르렀다. 명암비는 디스플레이가 가장 밝은색과 어두운색을 잘 구분해 내는지에 대한 지표로서, 백라이트가 없는 자발광 디스플레이인 OLED나 마이크로 LED가 개발되면서 높은 명암비를 구현할 수 있게 되었다. 따라서 색을 완벽하게 재현하기 위한 높은 색 재현율을 가지는 발광체의 필요성이 대두되었다.

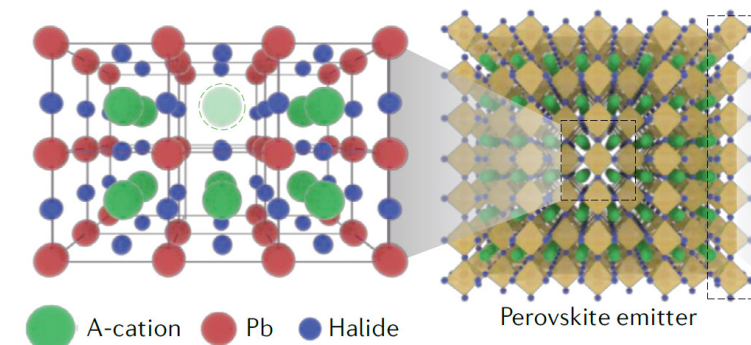
색 재현력이란 디스플레이를 구성하는 RGB(적색/녹색/청색) 빛을 색 기준에 맞게 얼마나 정확하게 표현하는지를 의미한다. 차세대 UHD TV에서 요구하는 색 기준은 국제전기통신연합이 2014년 승인한 Rec. 2020을 따르며, 기존의 OLED는 Rec. 2020의 약 75%, InP 양자점을 사용하는 LED는 약 85% 수준의 낮은 색 재현율을 보이는 한계가 있다.

이러한 낮은 색 재현율의 원인은 디스플레이를 구성하는 발광체의 발광 스펙트럼의 선폭이 넓기 때문이며, OLED 발광체는 통상적으로 ~40nm 이상의 넓은 반치폭(FWHM, 스펙트럼 최댓값의 절반이 되는 지점 간의 폭)을 지니며, InP 양자점 또한 녹색을 표현함에 있어 ~30nm 수준의 반치폭을 지닌다. 이러한 넓은 반치폭은 중심 파장에서 벗어난 다른 색들을 동시에 방출함에 따라 순수한 RGB를 내는 것을 방해한다. 하지만 페로브스카이트(Perovskite) 발광체의 경우, 20nm 이하의 좁은 반치폭을 지니기 때문에, Rec. 2020 색 기준을 95% 이상 만족하는 초고색순도 디스플레이를 구현할 수 있는 발광체로 주목받고 있다.

02 페로브스카이트 발광체 개요

1.2.1 페로브스카이트 발광체의 특징

그림 4 페로브스카이트 결정 구조



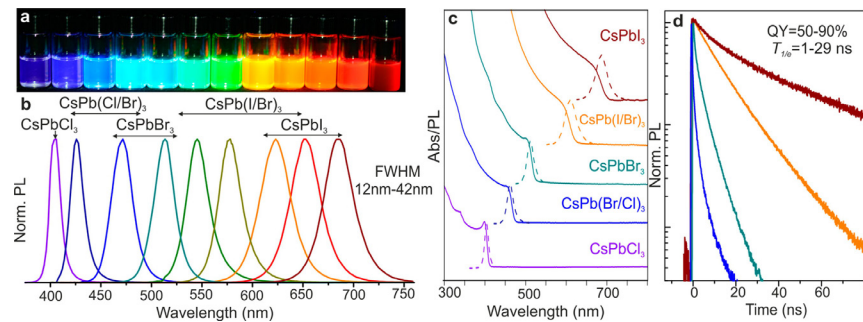
출처: Han, T.-H. et al., 2022. A Roadmap for the Commercialization of Perovskite Light Emitters. Nature Reviews Materials, Vol. 7, pp. 757-777.

페로브스카이트 발광체 재료는 ABX_3 구조의 화학식을 가진다. A는 주로 유기 암모늄 양이온[메틸 암모늄(Methylammonium : MA^+), 포름아미디늄(Formamidinium: FA^+)]이나 알칼리 메탈[세슘(Cs)]로 구성되며, B는 주로 납(Pb)이나 주석(Sn)과 같은 금속 원소가 사용된다. X는 Cl^- , Br^- , I^- 같은 할라이드 음이온이 사용된다. 페로브스카이트 결정 구조의 안정성은 공차 계수(tolerance factor: t)로 표현될 수 있다.

$$t = \frac{R_A + R_X}{\sqrt{2(R_B + R_X)}}$$

R_A , R_B , R_X 는 각각 A, B, X 원소의 유효 반경이다. 일반적으로 공차 계수가 0.8에서 1 이내일 때, 안정적인 페로브스카이트 구조인 cubic 또는 orthorhombic 구조를 가진다. A-site 양이온으로 사용될 수 있는 Cs^+ , MA^+ , FA^+ 이온의 크기는 각각 181 pm, 270 pm, 279 pm이다. Cs^+ 이온의 크기는 상대적으로 작아 주로 공차 계수가 0.8 정도로 줄어들게 되며, 이는 페로브스카이트 팔면체 결정의 기울임을 유도하여 orthorhombic 구조를 가지게 만든다. 할라이드 이온으로 사용될 수 있는 Cl^- , Br^- , I^- 의 유효 반경은 각각 167 pm, 182 pm, 206 pm이다.

그림 5 할라이드 이온 구성에 따른 페로브스카이트 발광 스펙트럼 변화



출처: Protesescu, L. et al., 2015. Nanocrystals of Cesium Lead Halide Perovskites ($CsPbX_3$, $X = Cl, Br, I$): Novel Optoelectronic Materials Showing Bright Emission with wide Color Gamut. Nano Lett, Vol. 15, pp. 3692-3696.

페로브스카이트의 가전자대 최댓값(valence band maximum: VBM)은 Pb 6s와 할라이드의 np 반결합 오비탈에 의해 형성되며, 전도대 최솟값(conduction band minimum: CBM)은 Pb 6p와 할라이드의 ns 반결합 오비탈에 의해 형성된다. 이로 인해 할라이드 음이온 구성을 조절함에 따라 페로브스카이트의 밴드갭을 조절할 수 있으며, 이는 페로브스카이트 발광체가 가시광 전 영역의 색을 구현할 수 있게 하는 특성을 지니게 한다.

1.2.2 페로브스카이트 발광체의 우수성

페로브스카이트는 유기 발광체 및 무기 양자점 발광체 등 기존 발광체들의 본질적인 한계를 극복한 발광체로서 평가받으며 활발히 연구되고 있다. 유기 발광체의 경우, 분자의 화학적 구조나 전자 에너지 상태에 의존하여 넓은 반치폭을 갖게 되어 색순도가 낮다는 발광체로서의 치명적인 한계가 있다. 무기 양자점 발광체의 경우, 양자점의 크기에 의존하여 발광 파장을 자유롭게 조절 가능하지만, 동시에 양자점의 크기 분포에 따라서 반치폭이 넓어진다는 한계가 존재한다. 하지만 페로브스카이트는 상기 명시된 바와 같이 할라이드의 조성 변화로 파장을 조절하며 크기에 비의존적인 발광 특성을 보임에 따라, 발광 스펙트럼의 반치폭이 작다는 특성을 가지며, 가장 높은 색 재현율을 보인다. 뿐만 아니라 높은 발광효율(>90%)과 높은 광흡수율(무기양자점의 약 5-15배) 등의 우수한 광특성을 가지고 있기 때문에 디스플레이 재료로 사용 시 높은 효율을 달성할 수 있고, 타 재료 대비 얇은 두께로도 충분한 색 변환 및 발광이 가능하다는 장점이 있다.

그림 6 페로브스카이트와 다른 발광체와의 비교

	유기 발광체	무기 양자점		페로브스카이트
		카드뮴 기반	비 카드뮴	
반치폭	50 nm	40-25 nm	50-35 nm	< 25 nm
Rec.2020 만족도	~65%	~90%	~85%	~100%
흡광계수($cm^{-1} M^{-1}$)	~1	~10	~5	~20
비용	~45 \$ (very high)	~5 \$ (medium)	~15 \$ (high)	~2 \$ (low)
RoHS 규제	No issue	<0.01% (100 ppm)	No issue	0.1% (1,000 ppm)
생산 시간	~25 h	~5 h	~5 h	~1 h

페로브스카이트 발광체			
✓ A site : 1가 양이온 (ex: Cs, FA, MA) ✓ B site : 전이 금속 (ex: Pb, Sn) ✓ X site : 할라이드 이온 (ex: Cl, Br, I)			
특징	공정적 장점	응용 분야	
장점 • 손쉬운 색 조절 • 크기 비 의존적인 고색순도 • 높은 발광효율 • 높은 흡광계수	• 낮은 생산 비용(재료 및 공정비용) • 간단한 제작 과정 • 대량생산 가능 • 용액/증착 공정 가능 • 기존의 OLED 설비 호환 가능	• 고해상도 디스플레이 • 유연 디스플레이 • 신축성 디스플레이 • 착용형 디스플레이 • AR/VR 디스플레이	
한계 • 낮은 안정성			

출처: 자체 제작 자료

우수한 재료적 이점과 더불어 페로브스카이트는 가격적인 측면에서의 강점이 있으며, 대량생산 및 상업화의 가능성도 높다. 페로브스카이트는 저온, 대기 중의 환경에서 1시간 미만의 시간에 합성이 가능하고, 기존의 인광 OLED 재료의 1/10 이하로 저렴하다는 점에서 경제적 이점이 있다. 또한 페로브스카이트 나노결정을 이용한 색 변환 필름 방식은 기존의 양자점 기반의 합성 및 필름 제작과 호환 가능하다는 점에서 공정상 이점이 존재하며, 기존의 인프라를 활용하여 LCD 디스플레이 내의 색 변환 필름으로 사용하게 될 경우 추가적인 설비 및 공정 도입을 최소화할 수 있다.

1.2.3 페로브스카이트 자발광 소자

페로브스카이트 자발광 소자는 별도의 광원이 필요하지 않으며 페로브스카이트 발광층이 스스로 빛을 방출하는 방식을 이용한다. 전자와 정공은 음극, 양극, 전하 수송층 등을 통하여 발광층인 페로브스카이트층으로 주입되어 여기자를 형성하고, 밴드갭에 해당하는 빛을 발광한다. 이 경우에는 컬러필터, 색 변환층, 백라이트들의 구조를 줄일 수 있기 때문에 디스플레이의 두께를 더 줄일 수 있고, 전력 효율을 증가시킬 수 있다는 장점이 있다. 착용형 디스플레이, 플렉서블 디스플레이와 같은 차세대 디스플레이들은 얇은 두께, 가벼운 무게, 고효율 등을 요구하기 때문에, 자발광 방식이 매우 유리할 것으로 전망되어 자발광 다이오드 개발의 중요성이 대두되고 있다.

발광 다이오드의 주요 평가 지표에는 상기에서 소개되었던 색순도를 포함하여 외부양자효율(EQE), 휘도, 수명 등이 있다. 외부양자효율은 주입된 전자와 정공을 얼마나 효과적으로 빛으로 변환하는지를 나타내는 척도로 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다. 상업화를 위해서는 약 30% 수준의 효율이 요구되며, 이는 상업화된 OLED의 효율 기준으로 산정된 수치이다.

$$EQE = \eta_{int} \cdot \eta_{out} = \frac{\text{디바이스 안에서 생성된 총 광자의 수}}{\text{주입된 총 캐리어의 수}} \cdot \eta_{out}$$

휘도란 광원으로부터 복사되는 빛의 밝기의 척도로 구체적으로 관측자가 광원을 특정 방향에서 볼 때, 얼마나 밝아 보이는가를 나타내는 값이다. 디스플레이의 종류에 따라 요구되는 휘도 수치가 다르며 일반적인 TV는 500~2,000 nit, 핸드폰 400~1,000 nit, 옥외 디스플레이 100~1,000 nit, VR 1,000~100,000 nit 이상이 요구된다.

발광 다이오드의 수명은 성능이 일정 수준 이하로 감소하는 데 걸리는 시간으로, 일반적으로 초기 휘도 100 nit 또는 1000 nit에서 휘도가 50%까지 감소하는 데 걸리는 시간으로 측정한다. 상업화를 위해서 1,000,000시간의 수명이 요구된다.

2

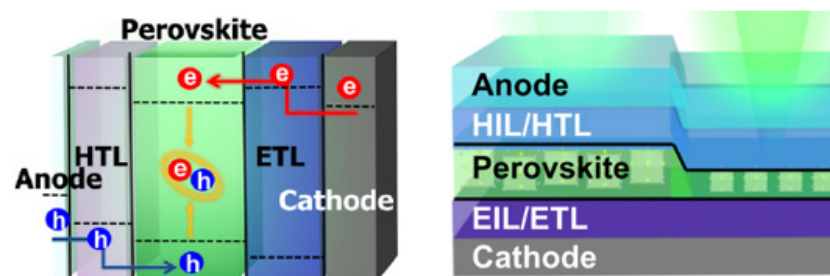
페로브스카이트 자발광 디스플레이 개요

- 페로브스카이트 자발광 디스플레이와 발광 다이오드
- 페로브스카이트 자발광 디스플레이의 발전 과정

페로브스카이트 자발광 디스플레이 개요

101 페로브스카이트 자발광 디스플레이와 발광 다이오드

그림 7 페로브스카이트 발광 다이오드 구조 및 작동 원리



출처: Kim, Y.-H. et al., 2016. Metal Halide Perovskite Light Emitters. PNAS, Vol. 113, pp. 11694–11702.

발광층에 직접적으로 전자와 정공을 주입, 재결합을 유도하여 고유한 색의 빛을 방출하는 자발광 디스플레이는 발광 다이오드의 원리를 기반으로 작동한다. 페로브스카이트 발광 다이오드 구조는 발광층을 중심으로 정공 수송층과 전자 수송층이 샌드위치되어 있는 구조로 되어있으며, 정공 수송층 쪽에는 양극이 접촉되어 있으며, 전자 수송층 쪽에는 음극이 접촉되어 있다. 금속과의 페로브스카이트 발광층 사이의 일함수 차이는 효율적인 전하 주입을 어렵게 한다. 이를 해결하기 위해 일반적으로 정공 수송층과 전자 수송층이 사용된다. 각 전극으로부터 주입된 전하는 수송층을 통해 페로브스카이트 발광층으로 주입되며, 주입된 전하는 페로브스카이트 발광층에서 엑시톤을 형성한 뒤 발광하게 된다. 발광한 빛은 Indium tin oxide(ITO)나 Fluorine doped tin oxide(FTO)와 같은 투명 전극을 투과하여 나오게 된다. Al이나 Ag와 같은 금속 전극은 발광층 내부에 생성된 빛을 반사하여 소자로부터 더 효율적으로 투명 전극으로 빛을 방출할 수 있게 한다.

102 페로브스카이트 자발광 디스플레이의 발전 과정

자발광 디스플레이는 유기 발광체를 발광층으로 사용하는 OLED와, 무기 양자점(QD)을 발광체로 사용하는 QLED가 앞서 연구되고 있었다. 그중 열 증착을 이용한 OLED는 상용화되었고, QLED는 용액 공정으로도 높은 효율을 달성했지만, 여전히 유기 발광체와 무기 양자점의 긴 합성 시간과 비싼 물질의 가격, 제한된 색순도를 해결할 차세대 발광체의 개발이 필요하였다.

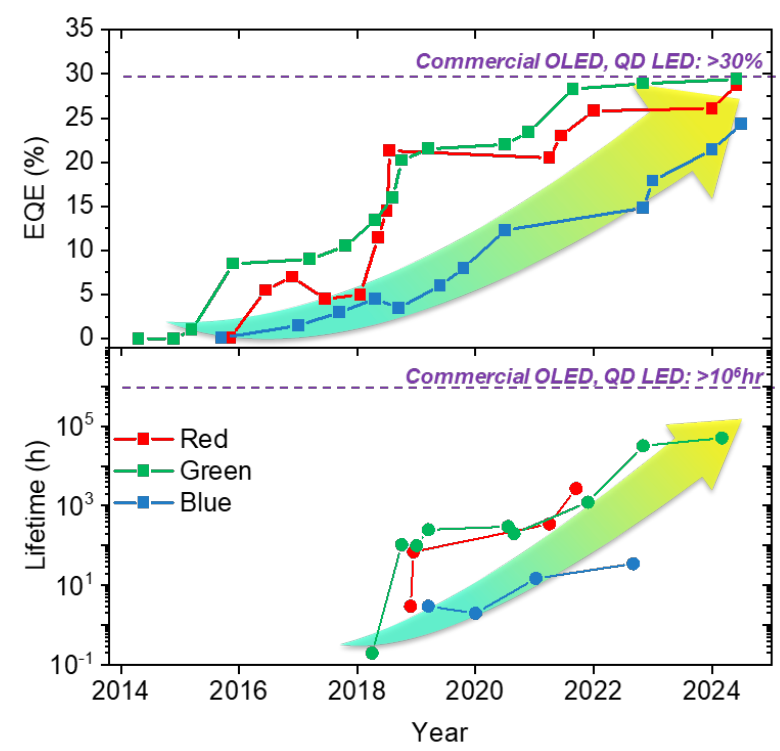
페로브스카이트는 간편한 합성과 높은 색순도의 특성을 가지는 발광체임이 1990년에 밝혀진 바가 있었으나, 그 당시에는 110K 이하의 낮은 온도에서만 전계 발광을 유지한다는 특성에 의해 큰 주목을 받지 못했다. 하지만 2014년 영국 Cambridge 대학교의 Richard H. Friend 교수팀이 여기자를 구속할 수 있는 얇은 페로브스카이트층을 넓은 밴드갭의 전하 수송/주입층 사이에 배치하여, 최대 외부양자 효율(EQE_{max}) = 0.1%, 최대 휘도 L_{max} = 364cd/m² 수준의 밝은 발광소자의 구동에 성공하였고, 그와 비슷한 시기에 서울대학교의 이태우 교수 연구팀이 exciton quenching을 막아주는 정공 주입층을 도입해 최대 외부양자효율 EQE_{max} = 0.125%, L_{max} = 417cd/m²의 밝기의 소자를 개발하였다. 이러한 두 연구는 페로브스카이트가 상온에서도 자발광 디스플레이로 활용될 수 있는 가능성을 보여주었다. 이와 더불어 서울대학교 이태우 교수는 2014년, 페로브스카이트 발광체 재료에 대한 원천 특허(국제공개번호: WO2016072805A1, WO2016072803, WO2016072806A2, 우선일 2014년 11월)를 확보하였으며, 이는 대한민국에서 디스플레이 발광재료의 원천 특허를 확보한 첫 번째 사례로 돋보인다.

이후 2015년, 이태우 교수 연구팀은 고효율의 페로브스카이트 발광소자를 개발하는 데 최초로 성공한다. 기존의 페로브스카이트는 큰 결정립 크기로 인해 여기자 확산과 해리가 심하게 일어나 발광효율이 낮았다. 이에 적절한 첨가물과 반응매를 이용한 나노결정 고정화 공정을 도입해, 99.7nm 크기의 작고 균일한 MAPbBr₃ 박막을 형성시켰다. 이는 여기자 혹은 주입된 전하를 작은 크기의 결정립 안에 구속시켜 확산과 해리를 막고 발광성 재결합을 향상시켜, EQE_{max} = 8.53% L_{max} = 16,936cd/m²의 높은 효율을 Science지에 보고하였다. 이 연구는 이 분야에서 최초의 고효율 논문으로, 이 시점을 기점으로 고효율 페로브스카이트 발광 다이오드의 연구 활동을 폭발적으로 증가하게 되었다.

지난 2022년, 페로브스카이트 발광 다이오드 연구를 선도하는 서울대학교 이태우 교수 연구팀에서 in-situ 코어/셸 구조의 페로브스카이트 형성 기법에 기반하여 녹색 페로브스카이트 발광 다이오드 28.9%로 획기적으로 개선하는 연구를 Nature지에 보고하였으며, 이는 상용화된 유기 발광 다이오드의 효율에 준하는 수준이다. 또한 페로브스카이트 발광 다이오드의 핵심적인 연구 주제는 소자의 수명

을 개선하는 것인데, 페로브스카이트는 약한 이온 결합 특성에 의해 이온의 이동이 쉽게 일어나는 등, 재료 및 소자의 열화로 인해 낮은 수명을 보여주는 것이 페로브스카이트 발광 다이오드의 상용화를 막는 큰 장애물이기 때문이다. 2021년까지 페로브스카이트 발광 다이오드는 1,000시간 정도의 수준만 보고되었지만, 상기 서울대학교 이태우 교수 연구팀의 in situ 코어/셸 구조 페로브스카이트 발광 다이오드는 수명을 3만 시간 이상으로 향상시켰다. 이는 현재에도 세계 최고 수준의 성능이다.

그림 8 페로브스카이트 발광 다이오드 효율 및 수명 동향



출처: 자체제작 자료

3

페로브스카이트 발광 다이오드의 국내외 연구 현황

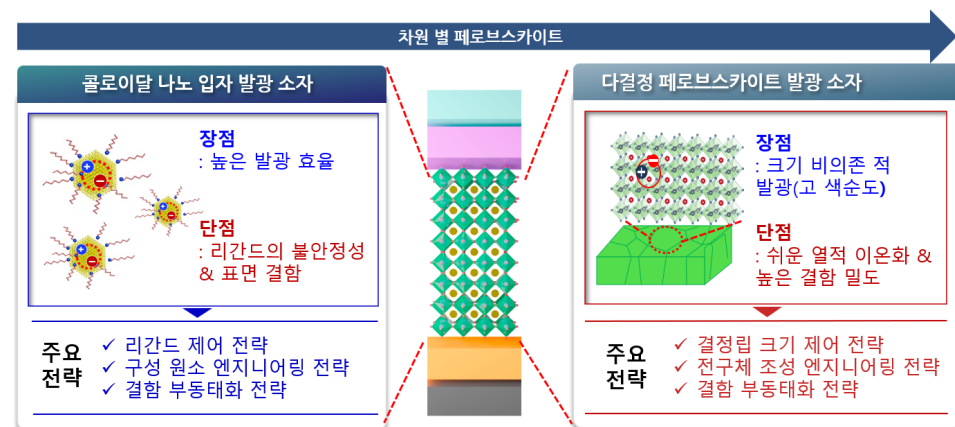
- 페로브스카이트 발광 다이오드 연구의 주요 기술 요약
- 다결정 페로브스카이트 발광 다이오드 개발
- 페로브스카이트 나노입자 발광 다이오드 개발
- 전하 수송층 및 계면 엔지니어링
- 비납계 페로브스카이트 발광 다이오드 개발

페로브스카이트 발광 다이오드의 국내외 연구 현황

101 페로브스카이트 발광 다이오드 연구의 주요 기술 요약

3.1.1 페로브스카이트 발광 다이오드의 발광층 개발

그림 9 차원별 페로브스카이트 발광 다이오드의 장단점



출처: 자체제작 자료

차원별 페로브스카이트

다결정 페로브스카이트 기반 발광 다이오드

다결정 페로브스카이트는 결정립과 결정립 간 경계로 이뤄지며 각 결정립은 서로 다른 결정 방향을 가진다. 다결정 페로브스카이트의 경우 긴 여기자 확산 거리와 낮은 여기자 구속 에너지로 인해서 여기자가 방사성 재결합을 하지 않고 정공과 전자로 나뉘기 쉽다. 따라서 다결정 페로브스카이트를 발광소자로 활용하기 위해서는 크게 두 가지 방향으로 연구가 진행된다. 첫 번째는 결정립 경계와 결정립

내부의 결함을 부동태화하는 것이다. 결함에 의해 여기자의 비방사성 재결합 비율이 증가하면 광발광 효율이 감소하게 된다. 따라서 다결정 페로브스카이트 내에 존재하는 다양한 형태의 결함을 부동태화하는 것이 중요하다. 두 번째는 결정립의 크기를 감소시키는 것이다. 결정립의 크기 감소에 따라 여기자가 정공과 전자로 나뉘지 않도록 공간적으로 제한하며 여기자 구속 에너지를 증가시켜 방사성 재결합 비율을 증가시킬 수 있다. 하지만 결정립 크기가 감소함에 따라 표면적/부피 비율이 증가하기 때문에 결함 밀도도 함께 증가하므로 결함 부동태화 전략과 결정립 크기 감소 전략은 동시에 성립되어야 높은 광변환효율이나 발광소자의 외부양자효율(EQE)을 얻을 수 있다.

페로브스카이트 나노입자 기반 발광 다이오드

페로브스카이트 나노입자는 수 나노미터에서 수십 나노미터 크기로 형성된다. 이들은 페로브스카이트 코어와 표면에 부착된 리간드로 이루어져 있으며, 주로 코어에 따라 발광 특성이 결정되지만, 리간드는 표면 결함과 합성 메커니즘에 영향을 준다. 나노입자는 표면적이 증가함에 따라 표면 결점이 증가하여 발광효율이 감소할 수도 있다. 이러한 이유로 결점을 효과적으로 제어하는 전략이 필요하다. 리간드는 주로 절연성이며, 전하 운반자의 주입과 이동에 영향을 미치므로 발광효율에 중요한 역할을 한다. 따라서 고효율 페로브스카이트 자발광 디스플레이를 개발하기 위해 다양한 리간드 제어 전략이 연구되었다. 한편 페로브스카이트 나노입자는 발광소자에 적합한 다양한 장점을 가지고 있다. 결정 형성과 박막화가 분리되어 있어 다양한 코팅 전략을 적용할 수 있으며, 얇은 발광층을 사용함으로써 광추출 효율을 개선할 수 있었다.

증착 페로브스카이트 기반 발광 다이오드

앞선 다결정 페로브스카이트 및 페로브스카이트 나노입자의 경우 용액 공정을 기반으로 제작됨에 따라, 현재 상용화된 증착 OLED의 생산 프로세스에 적용하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 하지만 열 증착을 이용한 페로브스카이트는 용액 공정 없이 증착만으로 성장할 수 있고, 파인메탈마스크(Fine Metal Mask, FMM)를 이용한 픽셀 형성이 쉽기 때문에 기존의 OLED 설비를 사용할 수 있다는 점에서 상용화에 큰 장점이 있다. 이는 비슷한 용액 공정 기반 무기 양자점 재료와는 다른 페로브스카이트만의 독특한 차별성이다.

비납계 페로브스카이트

비납계 페로브스카이트의 경우 기존에 사용하던 납 기반의 페로브스카이트와 다르게 격자구조의 왜곡이 심하게 나타난다는 단점이 존재한다. 또한 결정화 과정에서 균일하면서 작은 결정립 형성에 어려움이 있기에 이를 돌파하기 위한 연구들이 진행되어 왔다. 비납계 페로브스카이트의 격자구조 안정성을 극대화시키는 방법으로 첨가물 및 전하 밀도 계산을 통한 구조적 안정화를 사용하여 최근 길어진 수명 및 높은 효율을 달성할 수 있었다.

3.1.2 페로브스카이트 발광 다이오드의 구조 및 계면 개발

전하주입/수송층 및 계면 제어

페로브스카이트 LED의 효율성을 저해하는 요소 중 하나인 여러 층이 적층되며 생기는 계면에서 여기자의 비방사성 결합 혹은 계면에서 발생하는 금속성 물질 및 페로브스카이트 할라이드 이온들의 이동을 막는 방법이 지속적으로 연구되어 왔다. 또한, 정공이나 전자가 에너지 장벽 없이 주입될 수 있는 점진적인 구조를 여러 복합층을 이용하여 형성하거나, 첨가물의 양 조절을 통해 가능하게 되어 페로브스카이트 LED의 효율이 크게 증가할 수 있었다.

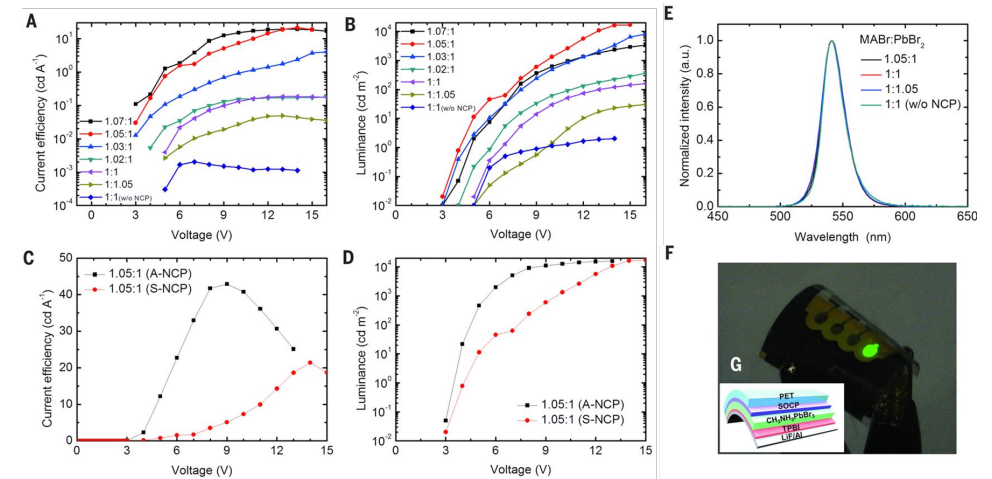
02 다결정 페로브스카이트 발광 다이오드 개발

3.2.1. 결정립 크기 제어 및 결정립 경계 부동태화의 전략

국내 개발

서울대학교 이태우 교수 연구팀은 전구체의 Methylammonium Bromide(MABr)의 비율을 증가시켜 여기자의 비방사성 재결합을 야기하는 금속 납의 형성을 억제하며 향상된 광발광효율의 유기 혼합 페로브스카이트 발광소자를 2015년 보고했다. 또한, Nanocrystal Pinning(NCP) 공정을 도입하여 여기자 확산 거리를 공간적으로 제한하여 방사성 재결합 비율을 늘려 광발광효율을 높였다. 순수 Chloroform을 통한 S-NCP(Solvent-based NCP)와 비교하여 2,2',2''-(1,3,5-benzinetriyl)-tris(1-phenyl-1-H-benzimidazole)(TPBi)를 첨가한 A-NCP(Additive-based NCP)를 통해서 결정립 크기를 150nm에서 50nm로 감소시키고 결정립 경계 내 결합을 TPBi를 통해 부동태화시킴으로써 발광소자의 외부양자효율(EQE)을 향상시켰다.

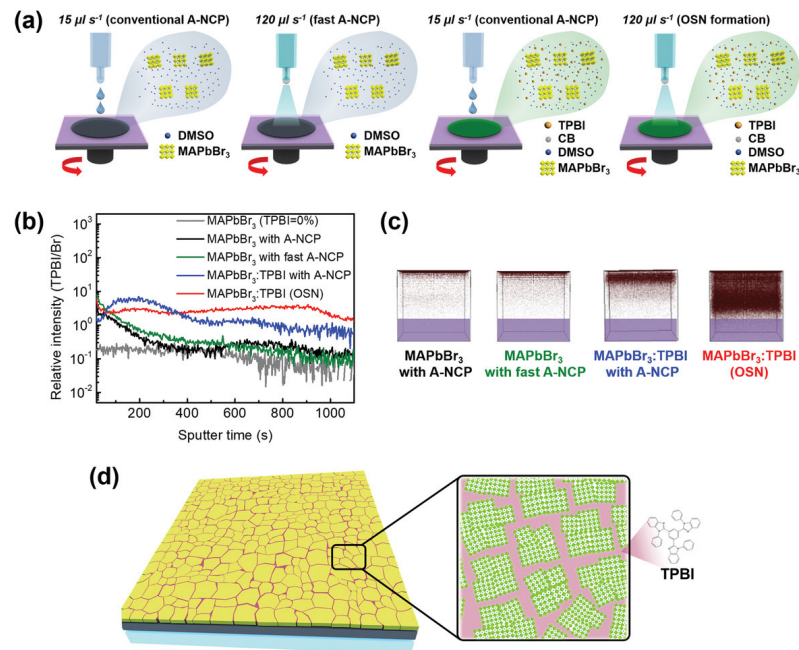
그림 10 결정립 미세화 공정을 통한 페로브스카이트 발광 다이오드 효율 향상



출처: Cho, H. et al., 2015. Overcoming the Electroluminescence Efficiency Limitations of Perovskite Light-emitting Diodes. Science, Vol. 350, pp. 1222-1225.

서울대학교 이태우 교수 연구팀은 Core/Shell 모사 나노입자와 광추출효율 극대화를 통해서 외부 양자효율 21.81%와 전류효율 87.35 cd A^{-1} 의 다결정 페로브스카이트 발광소자를 2019년 보고했다. A-NCP(Additive-based Nanocrystal Pinning) 공정을 통해서 페로브스카이트 격자 내의 결함을 부동태화와 여기자 구속 에너지의 상승을 통해 발광효율을 증가시켰다. 동시에 페로브스카이트 발광소자의 광추출효율을 극대화하기 위해 A-NCP를 통해 박막의 굴절률을 감소시켰으며 반구 렌즈로 매우 높은 외부양자효율(EQE)을 달성했다.

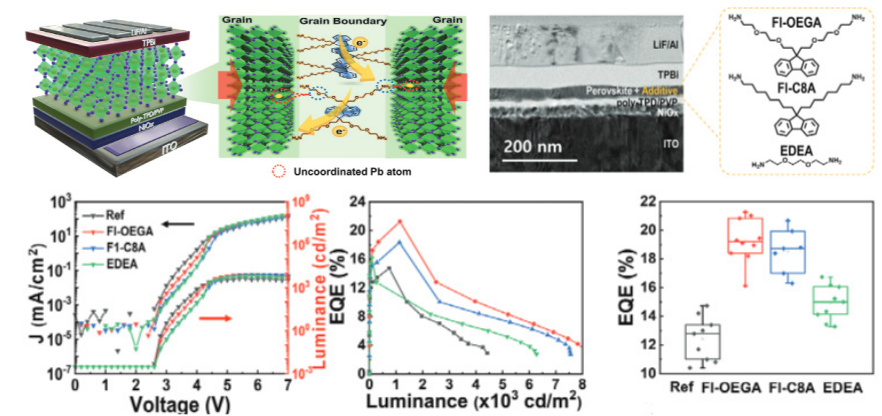
그림 11 A-NCP를 통한 광발광효율 증가와 광추출 효과 증대



출처: Park, M. et al., 2019. Efficient Perovskite Light-Emitting Diodes Using Polycrystalline Core-Shell-Mimicked Nanograins, Adv. Funct. Mater. Vol. 29, p. 1902017.

UNIST 송명훈 교수 연구팀은 다기능성의 반도체 첨가제 도입을 통해 다결정 페로브스카이트 PeLED의 비발광성 재결합을 감소시키고, 결정립 간 전하 이동도를 증가시킴을 보고했다. 다결정성 PeLED에서 비발광성 재결합을 일으키는 결정립계의 잔여 응력을 에너지적으로 결정립계에 존재하기를 선호하는 반도체성 첨가제인 FI-OEGA와 FI-C8A를 도입하여 13% 감소시켰다. 또한 기존의 리간드에 의한 낮은 전하 이동도를 반도체성 첨가제를 사용하여 극복해 외부양자효율(EQE) 21.3%를 보고했다.

그림 12 반도체 첨가제 도입을 통한 결정립 경계 응력 완화 및 전하 이동도 증대

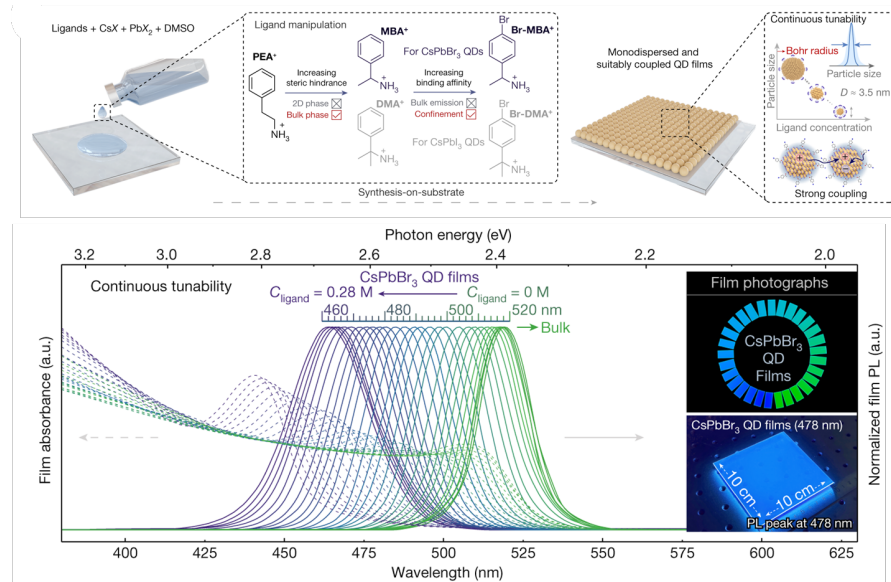


출처: Jang, C. et al., 2022. Multifunctional Conjugated Molecular Additives for Highly Efficient Perovskite Light-Emitting Diodes. Adv. Mater. Vol. 35, p. 2210511.

국외 개발

(중국) Nankai University의 Jun Chen 교수 연구팀과 Mingjian Yuan 교수 연구팀은 리간드 구조 개발을 통해 페로브스카이트와 결합하는 리간드 내 입체 장애 효과와 표면 결합 친화도를 조절하여 기판 내 나노입자를 직접 성장시켰고 청발광 페로브스카이트 발광소자를 제작하였으며 480nm에서 외부양자효율(EQE) 18%와 465nm에서 외부양자효율(EQE) 10%를 보고했다. 리간드 설계에서 정전기적 포텐셜이 높은 두부(head group)의 입체 장애 효과를 통해 저층 페로브스카이트 구조 형성을 억제했고 정전기적 포텐셜이 낮은 미부(tail group)의 할라이드 치환을 통해 표면 결합에너지를 증가시켜 작은 크기의 단분산 페로브스카이트 나노입자를 합성했다.

그림 13 리간드 설계를 통한 입체 장애 및 표면 결합 에너지 조절



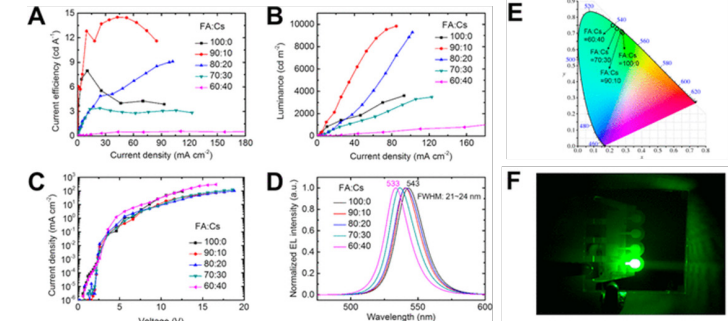
출처: Jiang, Y., Sun, C., Xu, J., Li, S. et al., 2022. Synthesis-on-substrate of Quantum Dot Solids. nature, Vol. 612, pp. 679-684.

3.2.2. 전구체 조성 엔지니어링 전략

국내 개발

서울대학교 이태우 교수 연구팀은 A-site 양이온 중 유기 양이온 Formamidinium(FA)과 무기 양이온 Cesium(Cs)의 비율을 조절하여 박막 표면 형태와 결정 구조를 결정하고 이를 통해 전류효율 14.5 cd A^{-1} 과 좁은 반치폭(FWHM) 21-24nm의 고색순도 다결정 페로브스카이트 발광소자를 2018년 보고했다. FAPbBr₃에 Cs를 도입하여 FA:Cs=90:10의 최적의 비율에서 결정립 크기와 결함 밀도를 감소시켰다. 이를 통해 발광효율을 극대화하고 광조사에 의한 페로브스카이트 구조 변화를 억제했다. 결과적으로 FAPbBr₃ 기반 페로브스카이트에서 무기 양이온 Cs의 도입을 통해서 화학적, 구조적 특성을 조절하여 높은 발광효율의 페로브스카이트 발광소자를 보고했다.

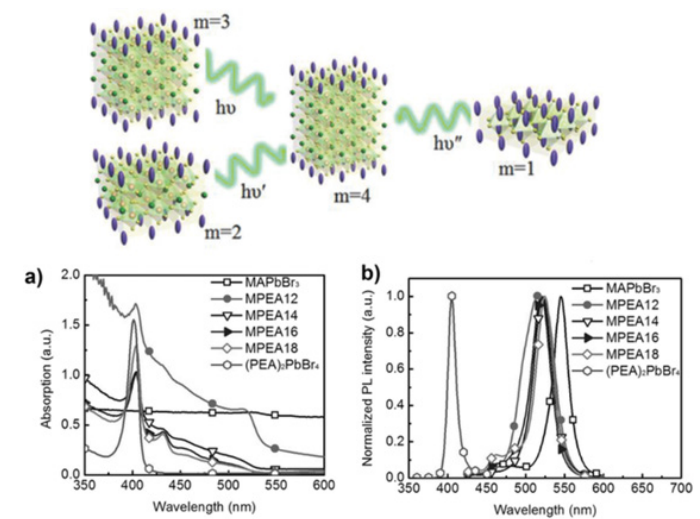
그림 14 유기 양이온 FA와 무기 양이온 Cs 비율 조절을 통한 발광특성 향상



출처: Cho, H. et al., 2018. High-Efficiency Polycrystalline Perovskite Light-Emitting Diodes Based on Mixed Cations. ACS Nano, Vol. 12, No. 3, pp. 2883-2892.

서울대학교 이태우 교수 연구팀은 A-자리 양이온으로서 methylamine과 phenethylamine의 비율을 조절하여, 준-이차원 상을 이용한 페로브스카이트 발광소자를 2016년 세계 최초로 보고하였다. 준-이차원 페로브스카이트는 낮은 밴드갭의 페로브스카이트 준 이차원 상으로의 에너지 전이를 통하여 효율적인 엑시톤 구속과, 낮은 결함 밀도를 보임으로서, 당시 높은 전류효율로 4.390 cd A^{-1} 와 높은 휘도로 2935 cd m^{-2} 를 달성하였다.

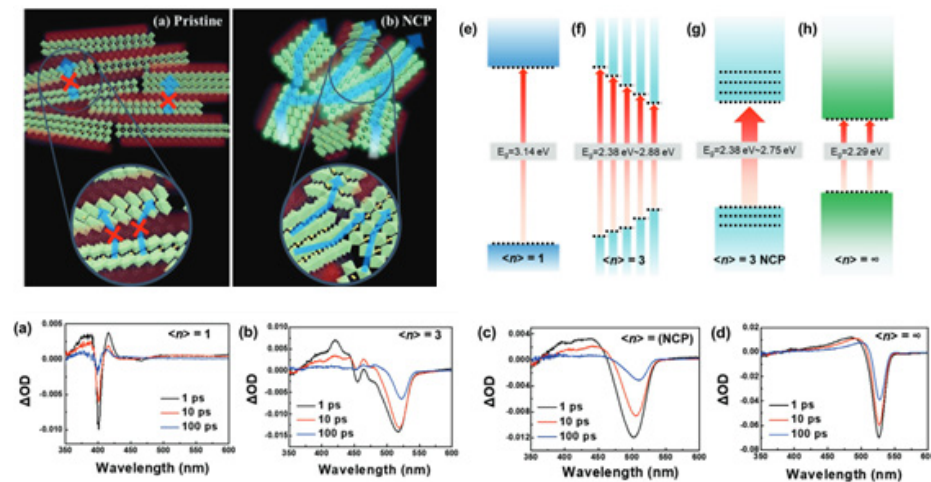
그림 15 유기 양이온의 입체 장애 효과를 이용한 Quasi-2D 페로브스카이트 구조를 통한 효율적인 에너지 전이



출처: Byun, J. et al., 2016. Efficient Visible Quasi-2D Perovskite Light-Emitting Diodes. Adv. Mater, Vol. 28, pp. 7515-7520.

서울대학교 이태우 교수 연구팀은 Ruddlesden-Popper phase(RP-phase) 페로브스카이트의 한계인 절연성 리간드에 의한 낮은 전하 이동도를 극복하기 위해 저차원 페로브스카이트 간 공간적 연결성을 향상시켜 0.35%에서 30.3%로 광발광효율을 높였으며, 발광소자에서 2차원 페로브스카이트에 비해 2,018배, 3차원 페로브스카이트에 비해 673배 높은 20.18 cd A^{-1} 의 전류효율을 2019년 보고했다. 박막 형성 과정 중 Nanocrystal Pining을 통해 저차원 페로브스카이트의 결정 방향을 무작위로 형성했다. 이를 통해 절연성의 유기 리간드의 낮은 전하 이동도를 극복하고 전하 이동 및 주입과 방사성 재결합을 증가시켰다.

그림 16 Quasi-2D 페로브스카이트의 무작위 배향을 통한 효율적인 전하 이동

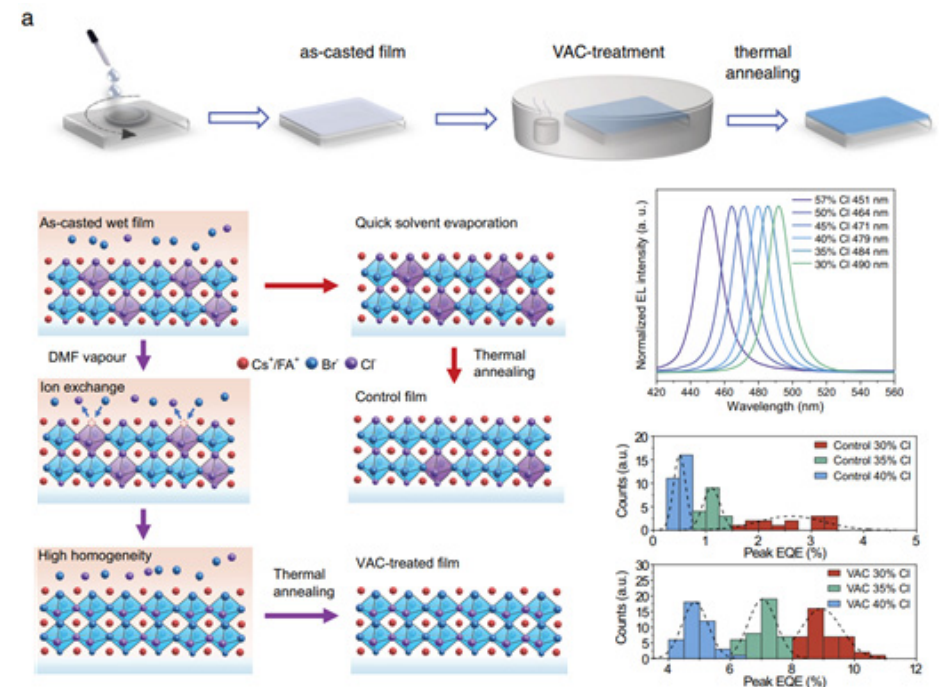


출처: Lee, H. et al., 2019. Efficient Ruddlesden-Popper Perovskite Light-Emitting Diodes with Randomly Oriented Nanocrystals. Adv. Funct. Mater., Vol. 29, p. 1901225.

국외 개발

(스웨덴) Linköping University의 Feng Gao 교수 연구팀과 Weidong Xu 연구팀은 Vapor-assisted 결정화를 통해 혼합 할라이드 청발광 페로브스카이트의 한계점인 낮은 색 안정성을 극복하여 477nm 발광소자에서 11.0%, 467nm에서 5.5%의 외부양자효율(EQE)을 보고했다. 브로민, 염소가 혼합된 청발광 혼합 할라이드 페로브스카이트는 국부적인 조성 불균일과 상분리에 의한 낮은 색안정과 낮은 광발광효율이 가장 큰 문제이다. Vapor-assisted 결정화의 상균질화와 결함을 제거했으며 이로 인해 전기 구동 및 광조사 시 할라이드 이동이 억제되어 높은 색 안정성과 높은 효율을 보고했다.

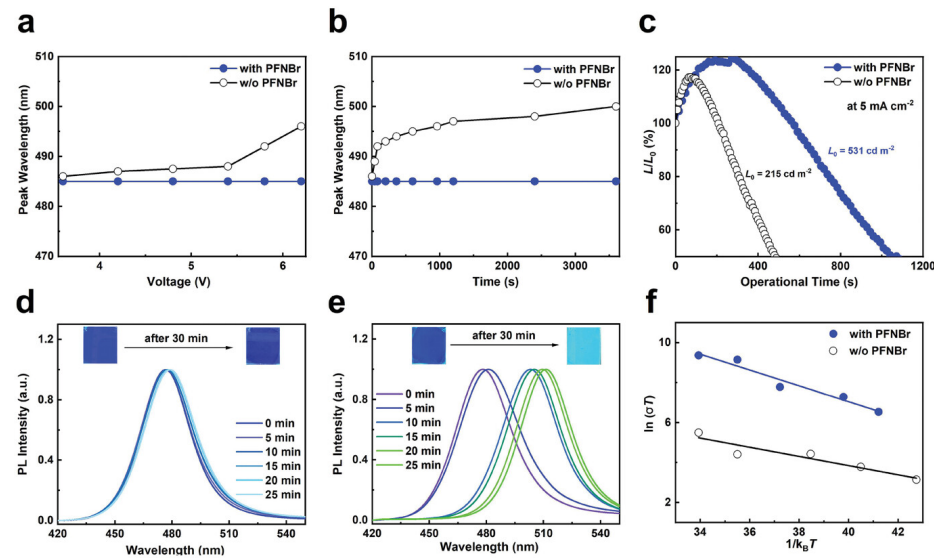
그림 17 Vapor-assisted 결정화를 통한 혼합 할라이드 페로브스카이트 상균질화



출처: Karlsson, M. et al., 2021. Mixed Halide Perovskites for Spectrally Stable and High-Efficiency Blue Light-Emitting Diodes. Nat. Commun., Vol. 12, p. 361.

(중국) Soochow University의 Liang-Sheng Liao 교수 연구팀과 Cambridge의 Richard H. Friend 교수 연구팀은 Fluorene 기반 π -공액 양이온 고분자를 통해 결함으로 인한 비방사성 재결합을 억제하고 혼합 할라이드 페로브스카이트의 상분리를 제어하여 CIE 좌표(0.08, 0.22)의 하늘색 발광소자에서 11.2%(0.12, 0.13)의 청발광소자 8.0%의 외부양자효율(EQE)을 보고했다. π -공액 양이온 고분자 poly [(9,9-bis(3'-(N,N-dimethyl)-N-ethylammonium)-propyl)-2,7-fluorene)-alt-2,7-(9,9-dioctylfluorene)] dibromide(PFNBr)가 결정립 경계에서 양전하와 음전하를 띠는 결함들을 모두 부동태화하고 Quaternary 암모늄 양이온과 브로민 음이온의 정전기적 상호작용으로 할라이드 이온들의 이동을 억제했다.

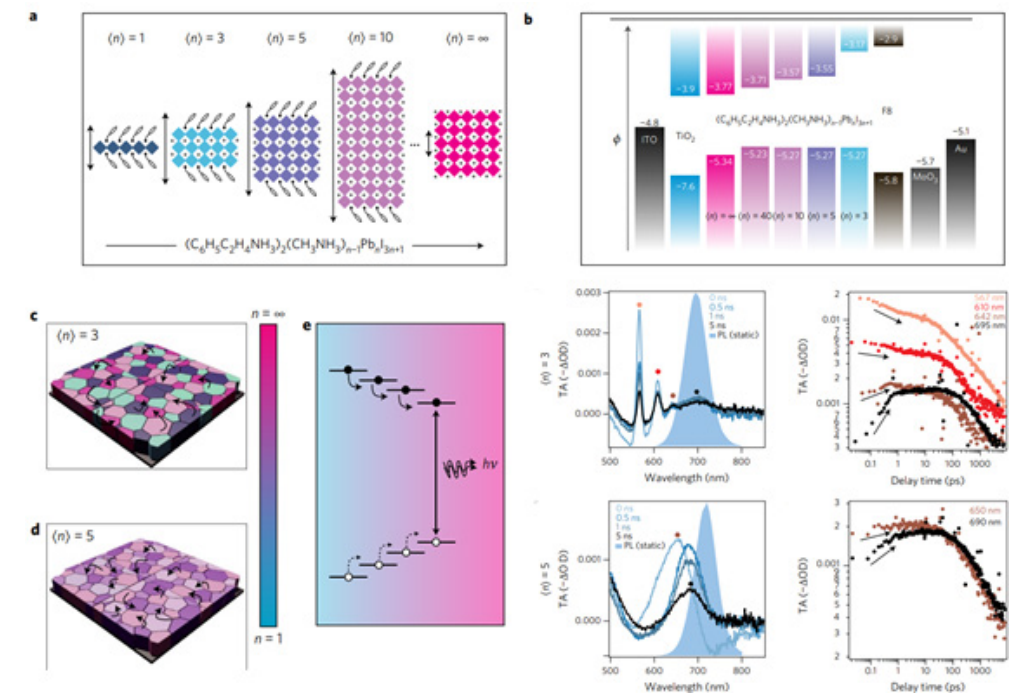
그림 18 Fluorene 기반 π -공액 양이온 고분자를 통한 색안정성 향상



출처: Yuan, S. et al., 2021. Efficient and Spectrally Stable Blue Perovskite Light-Emitting Diodes Employing a Cationic π -Conjugated Polymer. Adv. Mater., Vol. 33, p. 2103640.

(캐나다) 이화여자대학교의 김동하 교수 연구팀과 University of Toronto의 Edward H. Sargent 교수 연구팀은 양자 유사 결정립으로 구성된 Quasi-2D 페로브스카이트를 합성하여 효율적인 에너지 전이를 달성하여 외부양자효율(EQE) 8%를 2016년 보고했다. 입체 장애를 일으키는 양이온인 Phenethylammonium(PEA)을 도입하여, 큰 밴드갭을 가진 페로브스카이트 상에서부터 작은 밴드갭을 가진 페로브스카이트 상으로 에너지가 전이될 수 있도록 했다. 이를 통해 비방사성 재결합을 억제하고 방사성 재결합을 증가시켜 광발광효율을 향상했다.

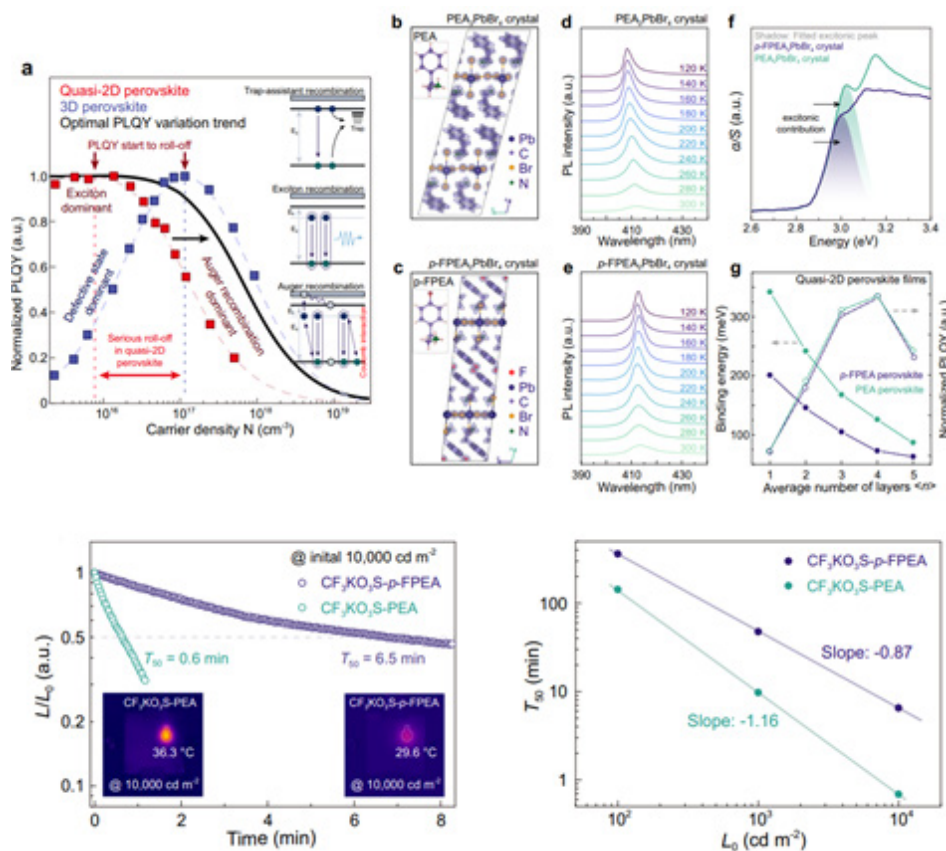
그림 19 Quasi-2D 페로브스카이트의 밴드갭 조절과 효율적인 에너지 전이



출처: Yuan, M. et al., 2016. Perovskite Energy Funnels for Efficient Light-emitting Diodes. Nature Nanotech, Vol. 11, pp. 872-877.

(중국) Nankai University의 Mingjian Yuan 교수 연구팀은 Quasi-2D 페로브스카이트의 리간드 결합 친화도를 조절함으로써 큰 난제 중 하나인 빠른 비방사성 오제 재결합(Auger Recombination)을 억제하여 외부양자효율(EQE) 20.36%와 높은 휘도 $82,480 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 를 2021년 보고했다. Quasi-2D 페로브스카이트의 큰 여기자 구속 에너지로 인한 빠른 오제 재결합 속도를 극복하기 위해 연구팀은 기존 리간드인 Phenethylammonium(PEA)보다 강한 결합 친화도를 갖는 p-Fluorophenethylammonium(p-FPEA)을 사용하여 여기자 구속 에너지를 낮췄다. 이를 통해 비방사성 재결합을 억제하고 방사성 재결합을 증가시켜 광발광효율과 휘도를 향상시켰다.

그림 20 리간드 결합 친화도를 통한 비방사성 오제 재결합 억제



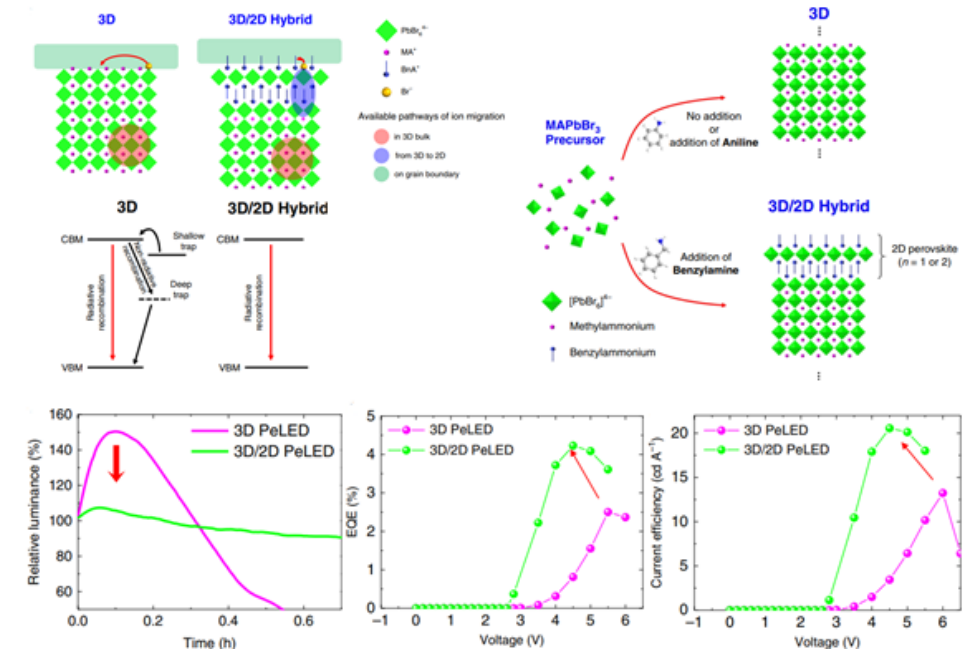
출처: Jiang, Y. et al., 2021. Reducing the Impact of Auger Recombination in Quasi-2D Perovskite Light-Emitting Diodes, Nat. Commun, Vol. 12, p. 336.

3.2.3. 결함 부동태화 전략

국내 개발

서울대학교 이태우 교수 연구팀은 3차원 페로브스카이트를 2차원 페로브스카이트가 감싼 형태의 3D/2D 하이브리드 페로브스카이트 발광소자를 개발하여 20.55 cd A^{-1} 의 높은 전류효율과 구동 수명 $T_{40}=801$ 분의 매우 긴 구동 수명을 2020년 보고했다. Benzylamine(BnA) 소량 도입을 통해 Methylammonium(MA)에서 BnA로의 양성자 전이를 유도하여 Benzylammonium을 합성했다. 이를 통해 3차원 페로브스카이트를 파괴하지 않으며 2차원 페로브스카이트를 형성하였으며 페로브스카이트 격자 내의 결함 형성과 이온 이동을 억제했다. 이를 통해 전기 구동 시 이온 이동에 의한 오버슈팅(Overshooting)을 기존 3차원 페로브스카이트 발광소자의 150%에서 7.4%로 감소시키고 구동 수명을 $T_{40}=38$ 분에서 801분으로 향상시켰다.

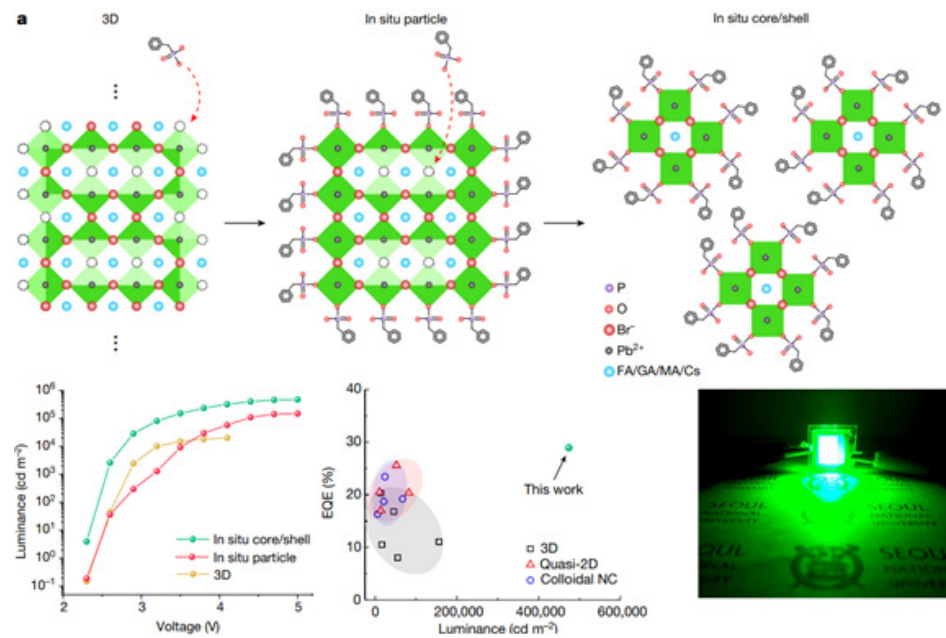
그림 21 3D/2D 하이브리드 구조를 통한 결함 부동태화 및 오버슈팅 억제



출처: Kim, H., Kim, J. et al., 2020. Proton-transfer-induced 3D/2D Hybrid Perovskites Suppress Ion Migration and Reduce Luminance Overshoot. Nat Commun, Vol. 11, p. 3378.

서울대학교 이태우 교수 연구팀은 *in situ* Core/Shell 페로브스카이트 나노입자 형성을 통해 높은 전하 이동과 높은 전하 구속을 동시에 달성할 수 없는 한계를 극복하여 휘도 $470,000\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$, 외부양자효율(EQE) 28.9%, 전류효율 151cd A^{-1} , 구동 수명 $T_{50,100\text{nit}} > 30,000$ 시간의 초고휘도, 초고효율, 고안정성 페로브스카이트 발광소자를 2022년 보고했다. Benzylphosphonic acid를 도입하여 다결정 페로브스카이트의 높은 전하 이동도를 유지하며 결정립을 나노입자화하고 결정립 경계 결함과 결정립 내 결함을 부동태화했다. 결과적으로 페로브스카이트 내 결함으로 인한 비방사성 재결합이 억제되고 여기자 구속 에너지 증가로 광발광효율이 증가했다. 또한 절연성 리간드를 사용하지 않아 높은 전하 이동도로 저전압 구동, 장수명 구동을 가능하게 했으며, 높은 전하 주입으로 인해 초고휘도를 달성했다.

그림 22 *in situ* Core/Shell 페로브스카이트 나노입자

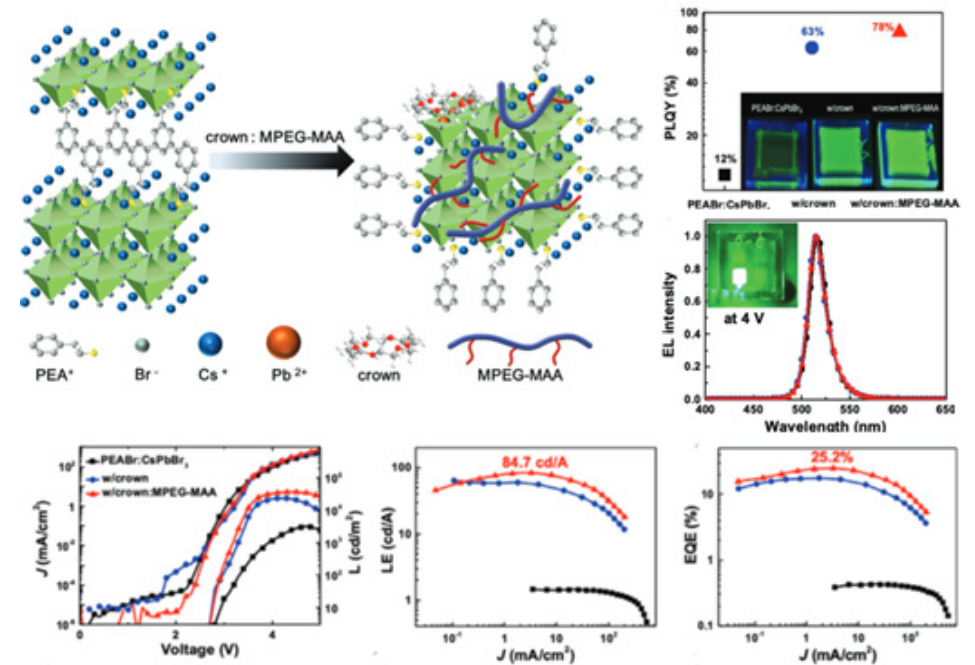


출처: Kim, J. et al., 2022. Ultra-bright, Efficient and Stable Perovskite Light-Emitting Diodes. Nature, Vol. 611, pp. 688-694.

국외 개발

(중국) South China University of Technology의 Lintao Hou, Zhengjian Qi, Shi-Jian Su 교수 연구팀은 Phenethylammonium(PEA) 기반의 Quasi-2D 페로브스카이트 발광소자에 18-crown-6와 poly(ethylene glycol) methyl ether acrylate(MPEG-MAA) 두 가지 리간드를 첨가제로 함께 사용하여 결함을 억제함과 동시에 수분 및 산소 저항성을 향상시켜 외부양자효율(EQE) 25.2%의 고수명 페로브스카이트 발광소자를 보고했다. 18-crown-6과 MPEG-MAA는 고분자화되며 페로브스카이트 나노 결정을 감싸 Core/Shell 구조를 형성했고, 이는 페로브스카이트 결함을 부동태화시켜 결함 밀도를 감소시키고 환경적 안정성을 향상시켰다.

그림 23 이중 첨가제를 통한 결함 억제 및 수분 산소 저항성 향상



출처: Liu, Z. et al., 2021. Perovskite Light-Emitting Diodes with EQE Exceeding 28% through a Synergetic Dual-Additive Strategy for Defect Passivation and Nanostructure Regulation. Adv. Mater, Vol. 33, p. 2103268.

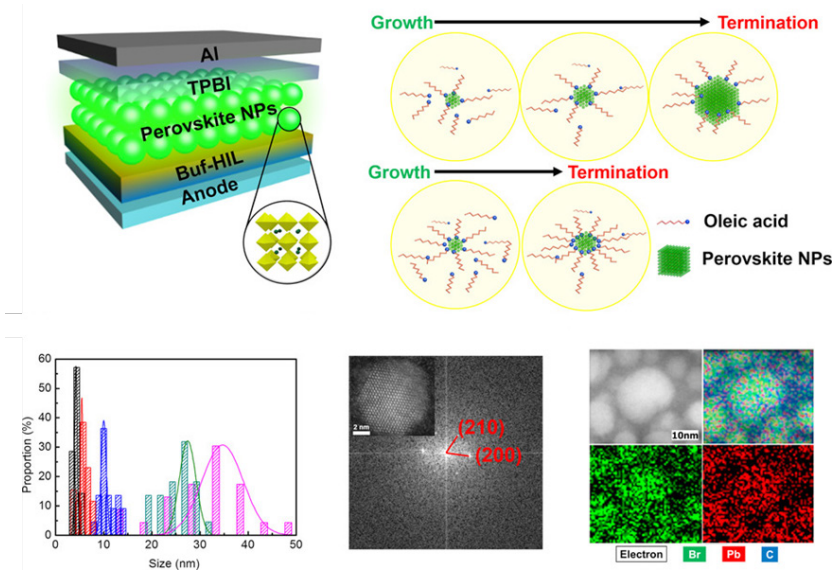
103 페로브스카이트 나노입자 발광 다이오드 개발

3.3.1. 리간드 제어 전략

국내 개발

서울대 이태우 교수 연구팀은 페로브스카이트 나노입자 합성 과정에서 리간드의 양을 조절함으로써 나노입자의 크기를 제어할 수 있는 방법을 발견하였다. 이 방법을 통해 3nm에서 35nm 크기의 다양한 페로브스카이트 나노입자를 성공적으로 제작하였으며, 페로브스카이트 나노입자는 발광효율 (PLQE) 60.5%에 달하는 고효율을 보였다. 특히 물질이 양자점이나 아니냐를 판단하는 기준이 되는 여기자 보어 지름(Exciton Bohr Diameter) 이상의 결정 크기에서 페로브스카이트 나노입자 발광체의 반치폭이 작게 유지되고 효율이 크게 유지되며 스펙트럼의 변화도 거의 없다는 것을 제시하며 페로브스카이트가 양자점의 영역을 벗어났을 때 페로브스카이트 발광재료로서의 장점이 극대화된다는 것을 밝혔다. 연구팀은 이 페로브스카이트 나노입자들을 활용하여 발광소자를 제작하였고, 이는 전기효율 15.5cd A^{-1} 을 달성하였다.

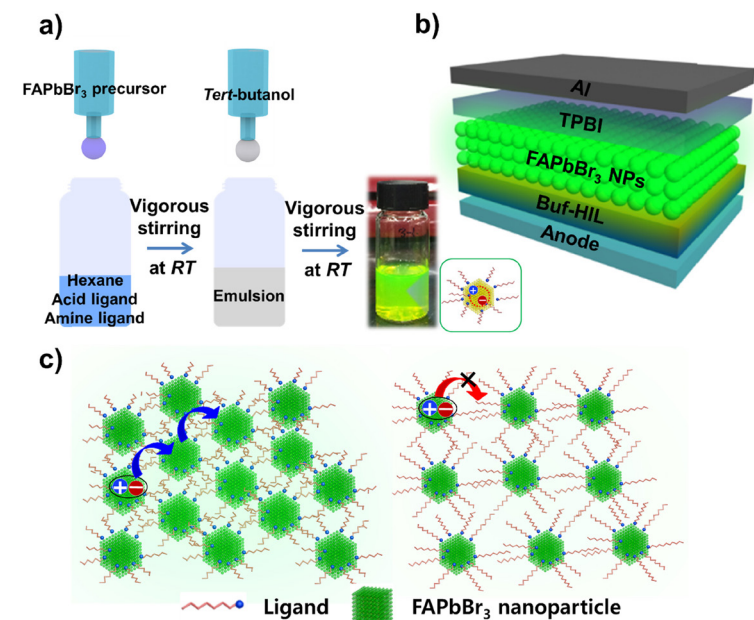
그림 24 리간드 농도 제어를 통한 페로브스카이트 나노입자 크기 제어 연구



출처: Kim, Y.-H. et al., 2017. Highly Efficient Light-Emitting Diodes of Colloidal Metal-Halide Perovskite Nanocrystals beyond Quantum Size. ACS Nano, Vol. 11, pp. 6586-6593.

서울대 이태우 교수 연구팀은 페로브스카이트 나노입자 합성 과정에서 리간드 길이를 조절하여 발광소자의 효율을 개선할 수 있음을 확인하였다. 연구진은 기존의 긴 길이의 리간드를 짧은 리간드로 교체함으로써 페로브스카이트 나노입자의 전하 주입 및 전달 능력을 향상시켰으며, 이를 바탕으로 전기효율 9.16cd A^{-1} 의 페로브스카이트 나노입자 기반 발광소자를 제작하는 데 성공하였다.

그림 25 리간드 길이 제어를 통한 페로브스카이트 나노입자 발광소자효율 개선 전략

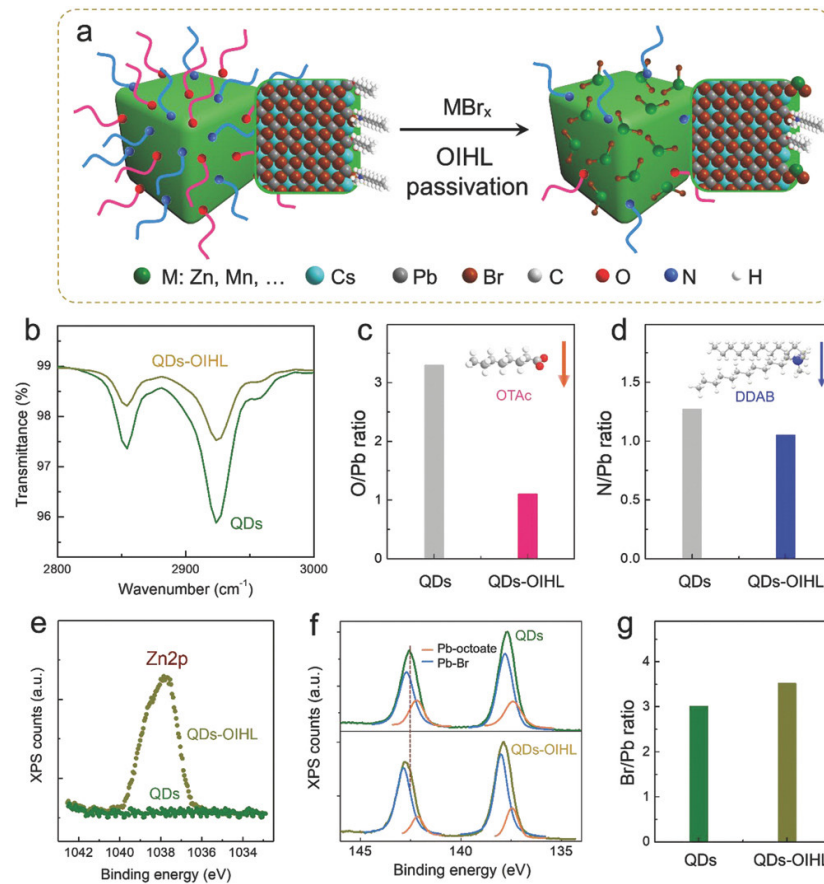


출처: Kim, Y.-H. et al., 2017. High Efficiency Perovskite Light-Emitting Diodes of Ligand-Engineered Colloidal Formamidinium Lead Bromide Nanoparticles. Nano Energy, Vol. 38, pp. 51-58.

국외 개발

Nanjing University of Science and Technology의 Haibo Zeng 교수 연구팀은 페로브스카이트 나노입자의 낮은 발광효율과 전하 수송능력을 동시에 개선하기 위해 짧은 무기 리간드를 도입하는 새로운 전략을 개발하였다. 연구팀은 기존의 긴 유기 리간드 일부를 짧은 무기 리간드로 교체하여 결점을 줄이고, 전하 이동도를 향상시켰다. 이를 통해 외부양자효율 16.48%인 고효율 발광소자를 제작하는 데 성공하였다.

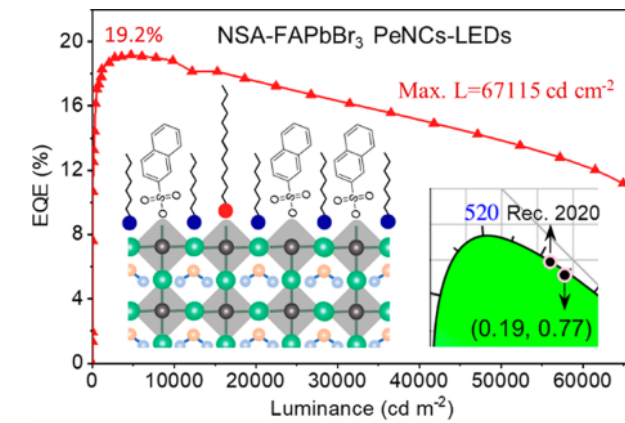
그림 26 유무기 하이브리드 리간드 결합 제어 전략



출처: Song, J. et al., 2018. Organic-Inorganic Hybrid Passivation Enables Perovskite QLEDs with an EQE of 16.48%. *Advanced Materials*, p. 1805409.

Linköping University의 Feng Gao 교수 연구팀은 페로브스카이트 나노입자의 낮은 전하 수송능력을 개선하기 위해 전도성을 갖는 짧은 방향족 리간드로 교체하는 전략을 성공적으로 적용하였다. 연구팀은 기존에 사용되던 긴 절연성 리간드 대신 짧은 방향족 리간드(2-naphthalenesulfonic acid)로 교체하는 데 성공하였으며, 그 결과 전하 이동도가 크게 증가하였고, 외부양자효율 19.2%의 고효율 발광소자를 제작하는 데 성공하였다.

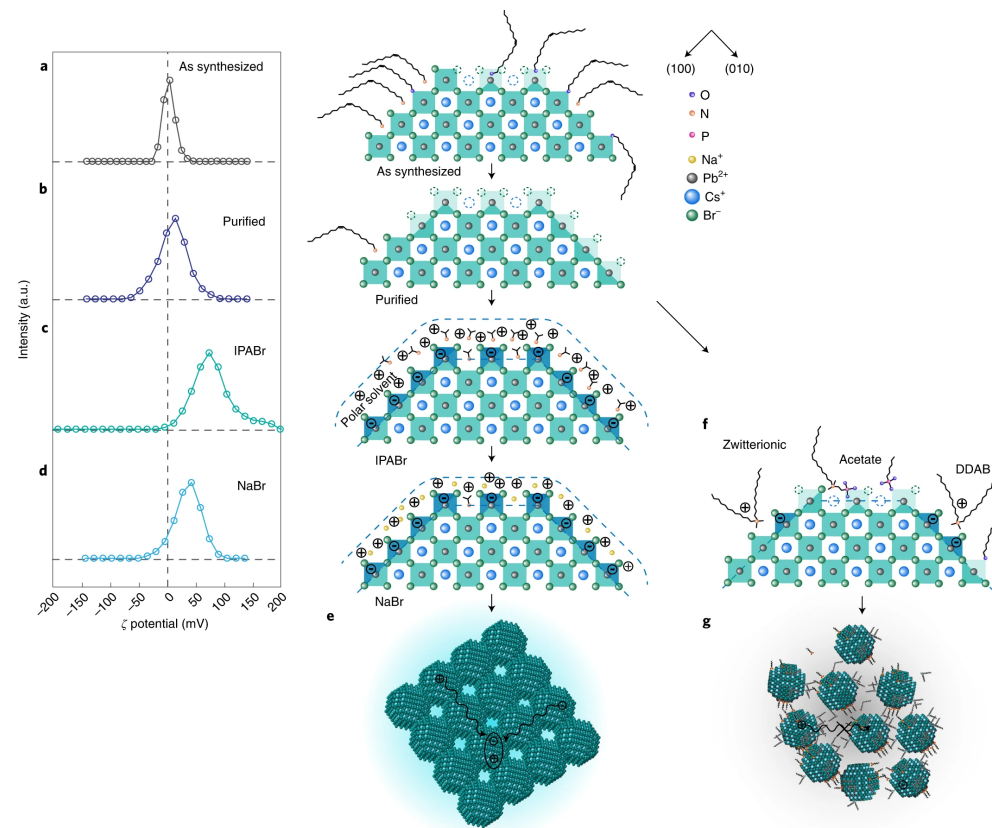
그림 27 유무기 하이브리드 리간드 결합 제어 전략



출처: Zhao, H. et al., 2021. High-Brightness Perovskite Light-Emitting Diodes Based on FAPbBr₃ Nanocrystals with Rationally Designed Aromatic Ligands. *ACS Energy Letters*, Vol. 6, pp. 2395–2403.

University of Toronto의 E.H. Sargent 교수 연구팀은 페로브스카이트 나노입자의 전하수송 능력을 개선하는 새로운 표면처리 전략을 개발하였다. 연구팀은 극성용매에 대한 페로브스카이트의 손상 없이 전하 수송 능력을 개선할 수 있는 양극성 겹질(bipolar-shell)을 도입하여 전하운반자 이동도(charge carrier mobility)를 크게 향상시켰다. 이로 인해 외부양자효율 22%의 고효율 발광소자를 제작하는 데 성공하였다.

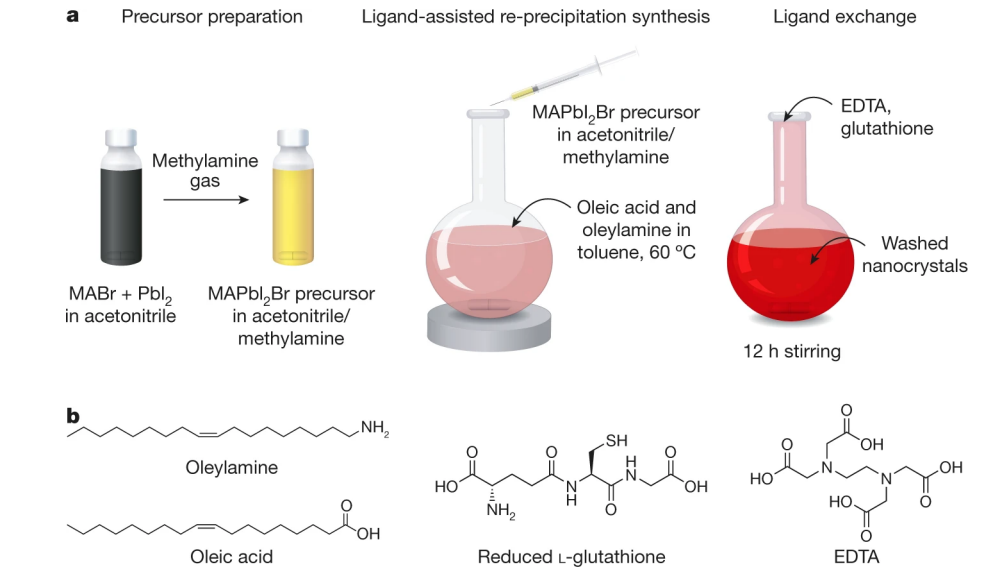
그림 28 전하수송능력 개선을 위한 양극성 겹질 전략 개발



출처: Dong, Y. et al. 2020. Bipolar-shell Resurfacing for Blue LEDs Based on Strongly Confined Perovskite Quantum Dots. Nature Nanotechnology, Vol. 15, pp. 668–674.

University of Oxford의 Henry. J. Sanith 교수 연구팀은 페로브스카이트 나노입자의 결점을 효과적으로 제어하기 위하여 다수작용기(multidentate) 리간드를 도입하는 전략을 개발하였다. 기존의 리간드 대신 도입된 다수작용기 리간드는 나노입자 표면에서 결점을 제거하며, 이를 통해 할로겐 이온의 분리(segregation)를 억제하고 안정적으로 구동하는 외부양자효율 20.3%의 혼합-할라이드(mixed-halide) 페로브스카이트 고효율 소자 제작에 성공하였다.

그림 29 다수작용기(multidentate) 리간드 전략



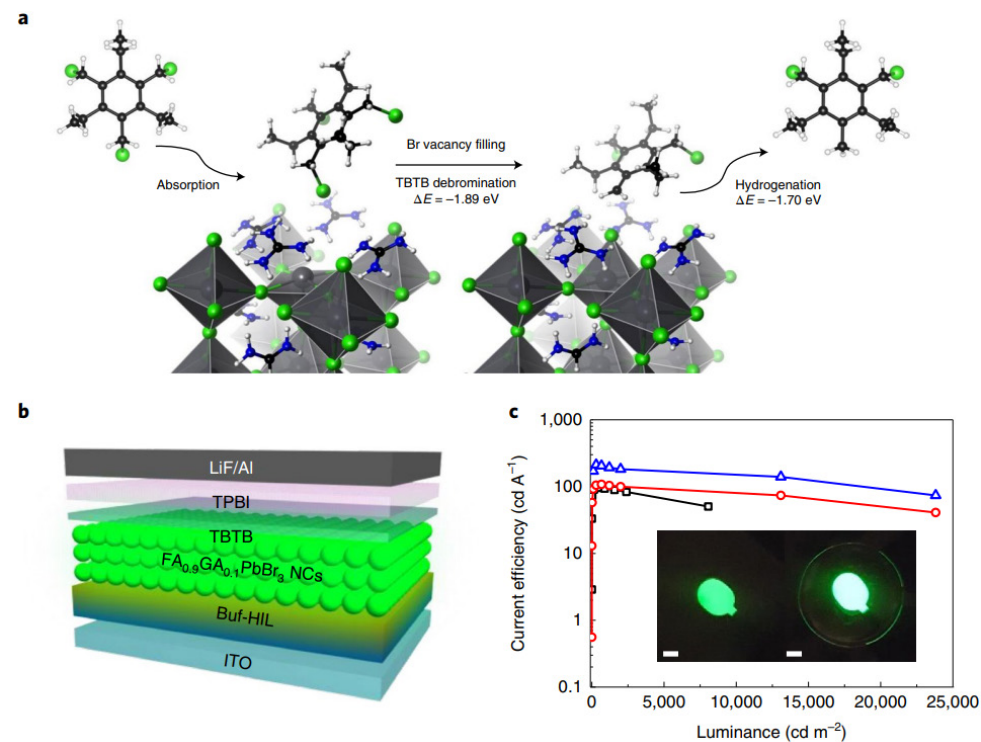
출처: Hassan, Y. et al., 2021. Ligand-Engineered Bandgap Stability in Mixed-Halide Perovskite LED. Nature, Vol. 591, pp. 72–77.

3.3.2. 구성 원소 조성 엔지니어링 전략

국내 개발

서울대 이태우 교수 연구팀은 고효율 페로브스카이트 나노입자와 발광소자 제작을 위한 종합적인 결점 제어 전략을 개발하였다. 연구팀은 FAPbBr_3 페로브스카이트 나노입자에 구아니디늄(guanidinium) 양이온을 도핑하여 나노입자 내부와 표면을 동시에 안정화할 수 있음을 발견하였다. 또한 박막화 과정에서 상부에 1,3,5-tris(bromomethyl)-2,4,6-triethylbenzene을 추가함으로써 박막화 시 발생하는 결점을 제어할 수 있음을 발견하였다. 이러한 전략을 바탕으로, 연구팀은 전기효율 108cd A^{-1} 외부양자효율 23.4%의 세계 최고 효율의 페로브스카이트 나노입자 기반 발광소자를 성공적으로 제작하였다.

그림 30 페로브스카이트 나노입자 결점 제어 전략



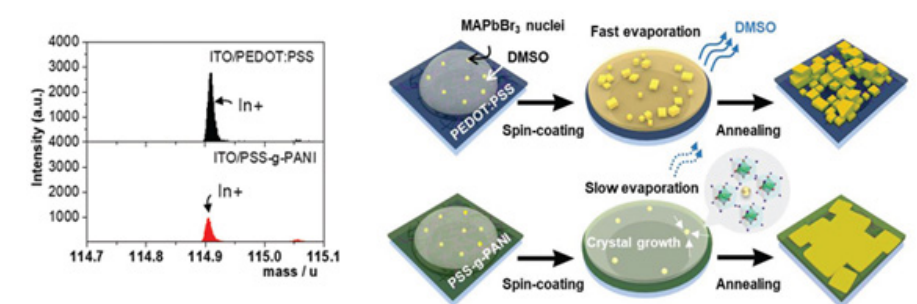
출처: Kim, Y.-H. et al., 2021. Comprehensive Defect Suppression in Perovskite Nanocrystals for High-efficiency Light-emitting Diodes. *Nature Photonics*, Vol. 15, pp. 148-155.

104 전하 수송층 및 계면 엔지니어링 전략

국내 개발

서울대 이태우 교수 연구진은 정공 수송층의 산성 작용기에 의해 생기는 공정도 중 ITO 전극이 식각되는 것을 방지하기 위하여 Polyaniline 첨가제를 도입하였다. 이는 소자 구동 중 ITO 전극 식각 시에 발생하는 금속성 물질들에 의한 페로브스카이트 발광체의 비방사성 결합을 크게 감소시켰으며, 정공 수송층의 더 세분화된 구조를 야기하여 발광효율을 증가시켰다. 또한, 페로브스카이트의 결정화에 영향을 미치는 하부층의 변화를 통해 페로브스카이트 발광체의 결정화가 조절되어 발광 성능이 향상되었다.

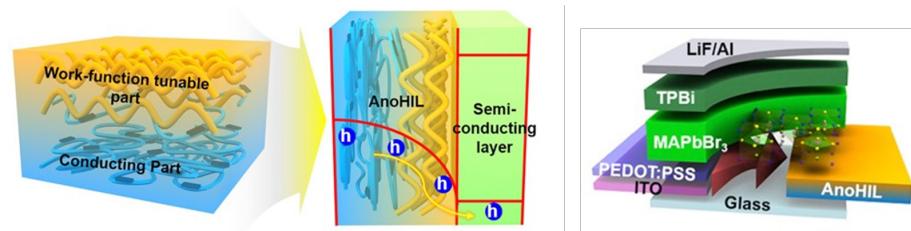
그림 31 Polyaniline 첨가제 도입을 통한 ITO 전극의 식각 감소 및 페로브스카이트 결정화 조절



출처: Ahn, S. et al., 2019. Fine Control of Perovskite Crystallization and Reducing Luminescence Quenching Using Self-Doped Polyaniline Hole Injection Layer for Efficient Perovskite Light-Emitting Diodes, *Adv. Funct. Mater.* Vol. 29, p. 1807535.

서울대 이태우 교수 연구진은 전도성 고분자에 일함수를 조절할 수 있는 PFSA 고분자를 첨가하여 전극과 정공 수송층을 통합시킨 다기능의 단일층 전극을 개발하였다. 이는 PFSA의 첨가 정도를 조절하여 전극의 일함수를 쉽게 변화할 수 있다. 특히 발광 다이오드에서 각 층을 적층 시 생기는 저항을 최소화하기 위한 구조로 OLED 혹은 PeLED 모두에서 공통적으로 사용 가능함을 확인하였다.

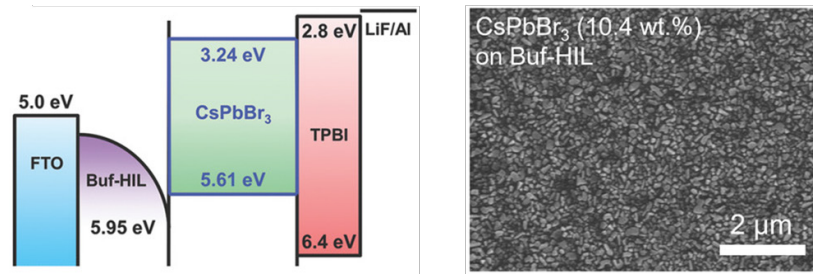
그림 32 전도성 고분자인 PEDOT:PSS에 일함수를 조절할 수 있는 PFSA를 첨가하여 전극과 정공 수송층이 통합되어 에너지 장벽 없는 단일 층



출처: Jeong, S.-H. et al., 2017. Universal High Work Function Flexible Anode for Simplified ITO-free Organic and Perovskite Light-emitting Diodes with Ultra-high Efficiency. NPG Asia Materials, Vol. 9, e411.

서울대 이태우 교수 연구진은 페로브스카이트 결정화를 도울 수 있도록 완충작용을 하는 점진적인 정공 수송층의 도입을 통하여 발광효율을 크게 향상시켰다. 정공 수송층으로 널리 이용되는 전도성 고분자인 PEDOT:PSS에 과불화이오노머(Perfluorinated Ionomer: PFI) 고분자를 첨가하여 정공 주입 및 수송층을 형성하면, 페로브스카이트 박막 형성 시에 계면에서 페로브스카이트 전구체 용액과 반응하여 균일하며 작고 밀도 높은 박막을 형성시킬 수 있다.

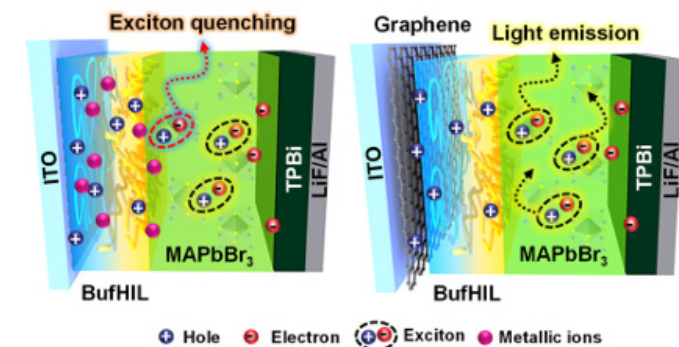
그림 33 점진적인 정공 수송층의 계면에 위치하는 PFI 분자가 페로브스카이트의 성장을 조절하여 균일하고 작은 결정립을 형성



출처: Cho, H. et al., 2017. High-Efficiency Solution-Processed Inorganic Metal Halide Perovskite Light-Emitting Diodes. Adv. Mater, Vol. 29, 1700579.

서울대 이태우 교수 연구진은 그래핀의 불투수성을 활용하여 페로브스카이트 발광 다이오드의 산성을 띠는 정공 수송층에 의한 ITO 전극 식각을 방지하는 화학적인 장벽을 고안하였다. 이는 소자 구동 중 ITO 전극에서 발생하는 금속성 물질이 확산되어 발광층에서 발생한 여기자의 비방사성 결합을 방지하는 역할로 페로브스카이트 발광 다이오드의 소자효율을 향상시켰다.

그림 34 그래핀 계면층을 이용하여 ITO 전극에서 기인하는 금속성 물질의 확산 방지

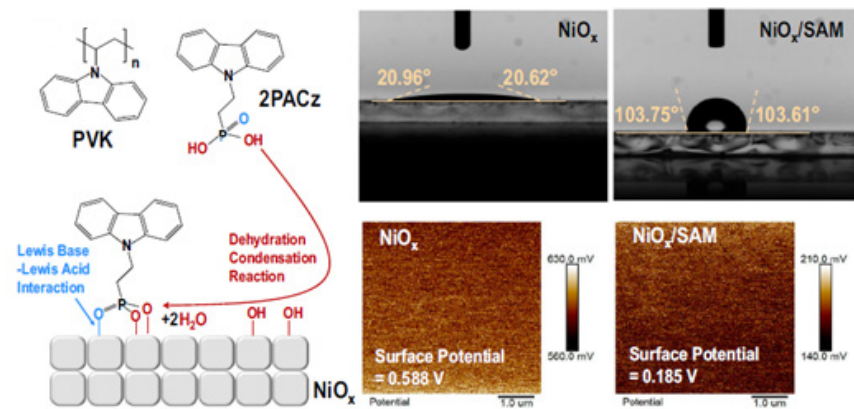


출처: Kwon, S. -J. et al., 2021. Chemically Robust Indium Tin Oxide/Graphene Anode for Efficient Perovskite Light-Emitting Diodes. ACS Appl. Mater. Interfaces, Vol. 13, No. 7, pp. 9074-9080.

국외 개발

(홍콩) Hin-Lap Yip 교수 연구진은 무기 정공 수송층인 NiO_x와 PVK 사이에 2PACz([2-(9H-carbazol-9-yl)ethyl]phosphonic acid)층을 도입하여 유/무기 계면에서 생기는 결함 에너지 준위를 차단하였다. 특히, 2PACz는 자가 조립 분자로서 계면에서의 정전용량과 저항을 줄여 소자에서의 반응 속도가 빨라짐을 보고하였다. 위의 전략으로 연구진은 파란색, 초록색 발광 다이오드에서 각각 14.5%, 26.0%의 외부양자효율(EQE)을 보고하였다.

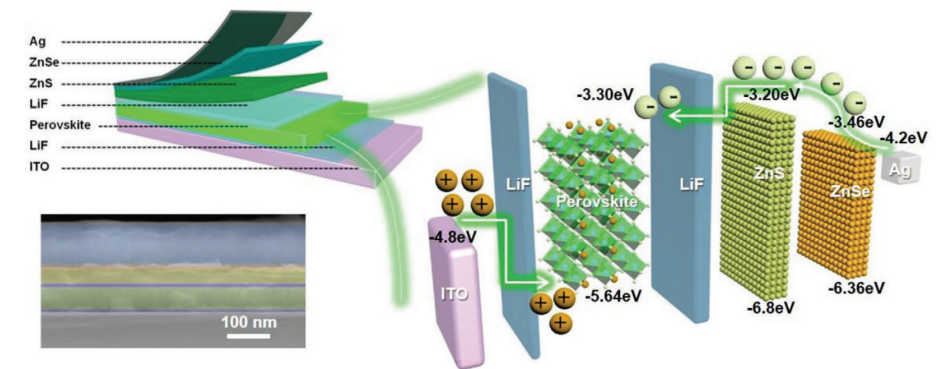
그림 35 NiO_x 정공 수송층과 2PACz 분자 간의 탈수소화 축합반응을 통한 표면 특성 변화 및 표면 전위 조절



출처: Li, Z. et al., 2023. Charge Injection Engineering at Organic/inorganic Heterointerfaces for High-efficiency and Fast-response Perovskite Light-emitting Diodes. Nat Commun, Vol. 14, p. 6441.

(중국) Zhaoxin Wu 교수 연구진은 무기물만을 이용하여 LiF/Perovskite/LiF/ZnS/ZnSe 구조로 페로브스카이트 내부 이온의 이동에 의해서 발생하는 음극의 열화를 방지하였다. LiF층과 ZnS/ZnSe 층의 계단식 전자수송층은 전기장에 의한 페로브스카이트 이온의 이동을 방지할 수 있기에, 이를 통해 휘도 156,155cd·m⁻²와 외부양자효율 11.05%를 달성하였다.

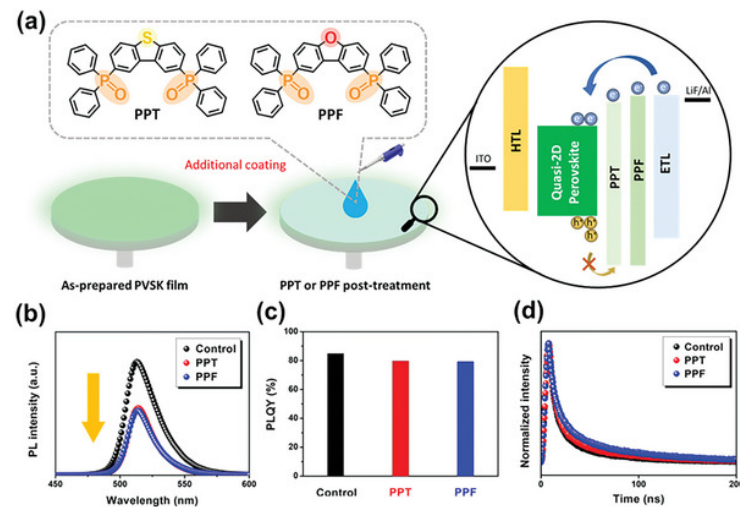
그림 36 LiF층과 계단식 전자수송층에 의해서 페로브스카이트의 이온이 음극으로 이동하는 것을 방지할 수 있는 소자 개발



출처: Zhang, L. et al., 2020. Suppressing Ion Migration Enables Stable Perovskite Light-Emitting Diodes with All-Inorganic Strategy. Adv. Funct. Mater, Vol. 30, p. 2001834.

(대만) Chu-Chen Chueh 교수 연구진은 낮은 전하 주입에 의해서 저휘도, 전압에 따른 빠른 효율 감소라는 Quasi-2D 페로브스카이트의 문제를 해결하기 위해서 전도성이 있는 phosphine 산화물 박막을 페로브스카이트/전자 수송층 계면에 도입하였다. 산화물 박막은 페로브스카이트 표면을 부동태 화시킬 뿐만 아니라 계면을 통해 빠져나가는 정공의 누설을 막으면서 동시에 전자의 주입을 더 빠르게 가능하도록 하여 $70,000\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 이상의 휘도와 10% 이상의 외부양자효율을 기록하였다.

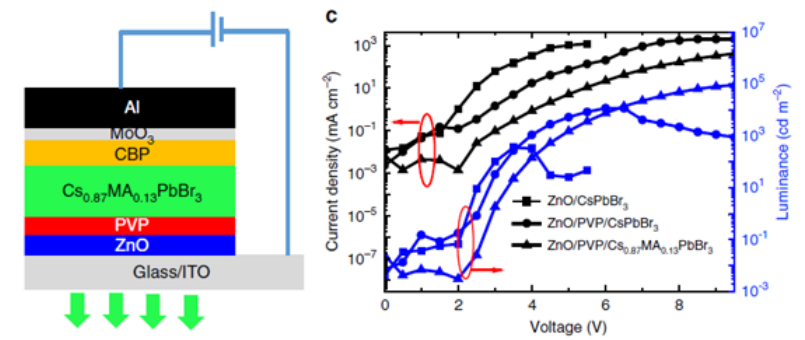
그림 37 PPT, PPF 후처리를 이용한 정공의 누설 방지 및 전자 주입의 효율성 증가



출처: Lin, Y.-K. et al., 2023. Realizing High Brightness Quasi-2D Perovskite Light-Emitting Diodes with Reduced Efficiency Roll-Off via Multifunctional Interface Engineering. Adv. Sci, Vol. 10, p. 2302232.

(중국) Jingbi You 교수 연구진은 무기 페로브스카이트의 낮은 효율이 높은 누설 전류에서 기인한 것을 발견하였고, 이를 개선하기 위하여 친수성이고 절연성을 갖는 polyvinyl pyrrolidone 고분자를 ZnO 전자 주입층 위에 도입하였다. 이를 통해서 $91,000\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 의 고휘도와 10.4%의 높은 외부양자효율을 달성하였다.

그림 38 전자 수송층 위에 PVP 고분자층을 도입하여 높은 누설 전류를 개선한 소자



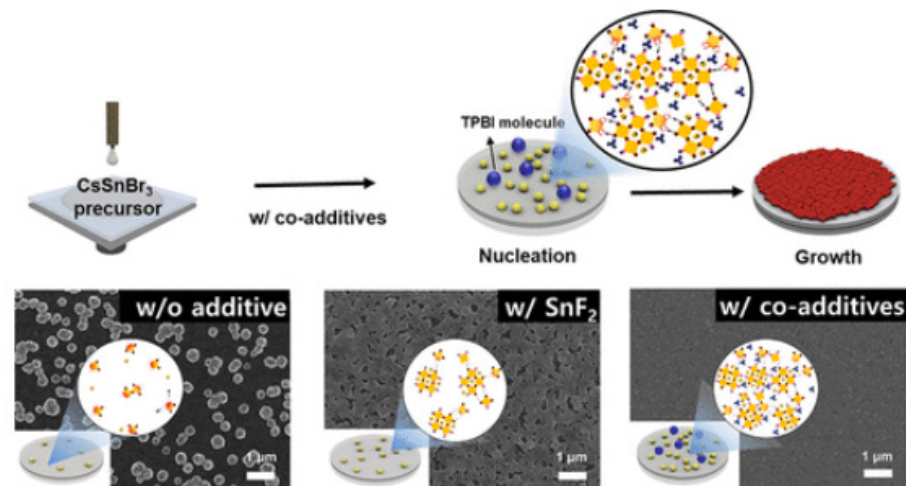
출처: Zhang, L. et al., 2017. Ultra-bright and Highly Efficient Inorganic based Perovskite Light-emitting Diodes. Nat Commun, Vol. 8, p. 15640.

105 비납계 페로브스카이트 발광 다이오드 개발

국내 개발

서울대 이태우 교수 연구진은 결정 성장을 방해하는 첨가제인 SnF_2 및 결정화 과정에서 핵생성 비율을 높이는 공첨가물 TPBi를 사용하여 비납계 CsSnBr_3 페로브스카이트 물질을 개발하였다. 공첨가물을 통해 기존 소자의 휘도 대비 7,500배 밝은 휘도를 기록하였으며, $58\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 에서 30시간의 수명을 보고하였다.

그림 39 결정성장을 방해하는 SnF_2 첨가제와 핵생성 비율을 높이는 TPBi 공첨가제를 사용하여 만든 CsSnBr_3 페로브스카이트

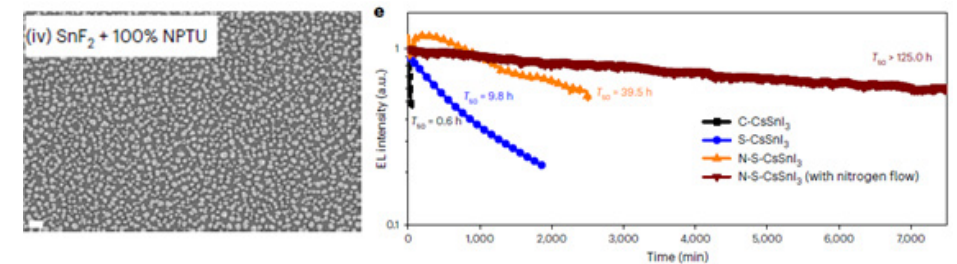


출처: Heo, J.-M. et al., 2022. Bright Lead-Free Inorganic CsSnBr_3 Perovskite Light-Emitting Diodes. ACS EnergyLett, Vol. 7, pp. 2807–2815.

국외 개발

(스웨덴) Feng Gao 교수 연구진은 900nm 이상의 파장대에서 향상된 성능을 보이는 비납계 NIR 발광 다이오드를 개발하였다. CsSnI_3 무기 페로브스카이트를 주석이 과량인 조건에 NPTU 물질을 첨가하여 결정화를 늦추는 방향으로 조절하여 948nm의 파장대에서 $226\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 의 높은 radiance와 $100\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 의 높은 일정한 전류밀도에서 39.5시간의 수명을 보고하였다.

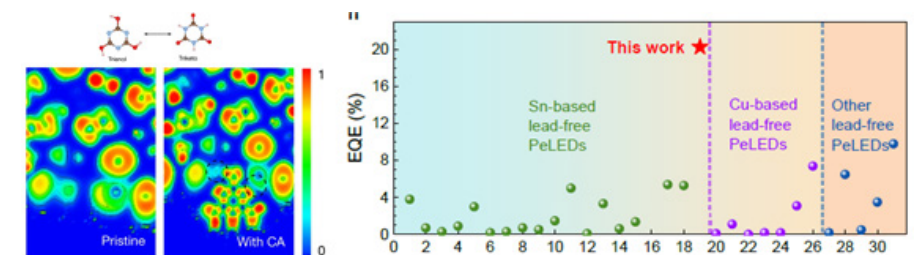
그림 40 NPTU 첨가제 및 주석 과량 조건에서 느린 결정화로 균일한 박막 형성 및 장수명 소자 개발



출처: Yuan, F. et al., 2024. Bright and Stable Near-Infrared Lead-free Perovskite Light-Emitting Diodes. Nat. Photon, Vol. 18, pp. 170–176.

(중국) Ning Wang 교수 연구진은 비납계 페로브스카이트인 TEA_2SnI_4 의 상을 안정화시키기 위하여 호변이성체 혼합물을 도입함으로써 배위결합을 통한 전자 국부화 전략을 개발하였다. 배위결합은 페로브스카이트 표면에서 수소결합을 하는 호변이성체 이량체, 삼량체 형성을 통해서 전자효과를 증폭시키고 기존의 2배에 해당하는 여기자 결합에너지를 갖게 한다. 위 연구진은 위와 같은 전략으로 비납계 페로브스카이트 발광 다이오드의 최고 외부양자효율 20.29%를 달성하였다.

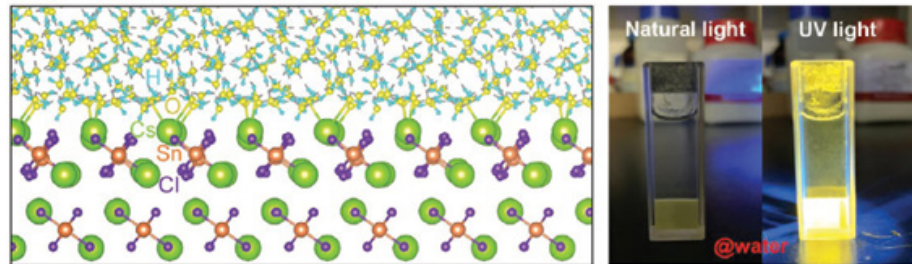
그림 41 호변이성체 혼합물 도입을 통한 페로브스카이트의 여기자 결합에너지 증진과 전자효과 증폭 및 비납계 NIR 발광 다이오드 최고 효율 달성



출처: Han, D. et al., 2023. Tautomeric Mixture Coordination Enables Efficient Lead-Free Perovskite LEDs. Nature, Vol. 622, pp. 493–498.

(중국) Jiang Tang 교수 연구진은 Sn/Te 기반의 비납계 페로브스카이트를 개발하였다. Te 이온이 광중심체가 되고, Sn/Te의 이온 상호교환을 통해 팔면체 결정구조의 Jahn-Teller 왜곡으로 생성되는 자가-고립된 여기자는 95.4%의 높은 광발광효율을 나타내었다. 물-페로브스카이트 계면에서 어떠한 반응도 일어나지 않는 것을 확인하였으며, 따라서 수중환경에서도 안정한 페로브스카이트 발광체를 개발하였다.

그림 42 Jahn-Teller 왜곡을 통해 생성된 자가-고립된 여기자에 의해 수중에서도 안정한 고효율 페로브스카이트 발광체



출처: Tan, Z. et al., 2020. Lead-Free Perovskite Variant Solid Solutions $\text{Cs}_2\text{Sn}_{1-x}\text{Te}_x\text{Cl}_6$: Bright Luminescence and High Anti-Water Stability. Adv. Mater, Vol. 32, p. 2002443.

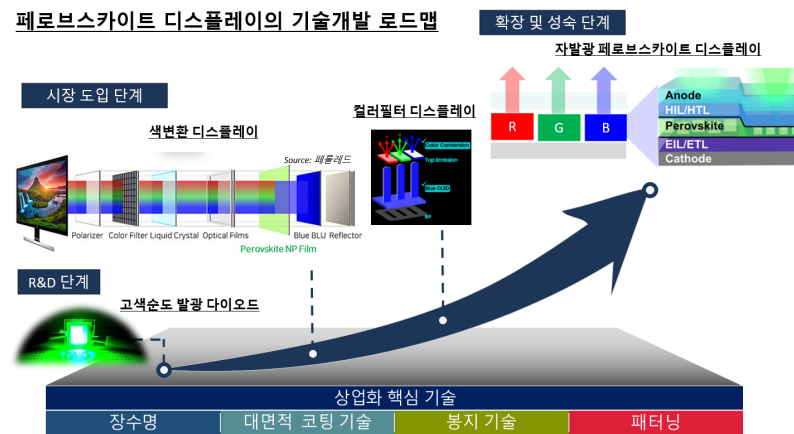
4

상업화를 위한 페로브스카이트 디스플레이 기술 개발

- 페로브스카이트 색 변환 디스플레이 개발
- 안정성 향상을 위한 봉지 기술 개발
- 대면적화 및 탠덤 기술 개발
- 어레이를 위한 패터닝 기술 개발

상업화를 위한 페로브스카이트 디스플레이 기술 개발

그림 43 페로브스카이트 디스플레이의 기술개발 로드맵



출처: 자체 제작 자료

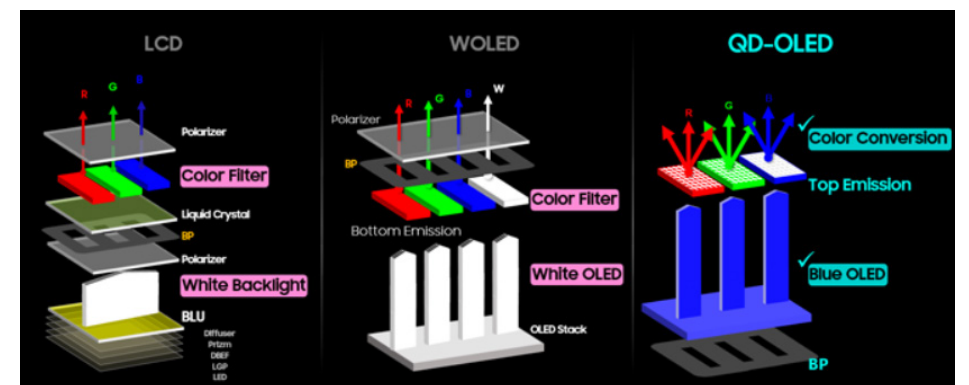
페로브스카이트 디스플레이는 두 가지 발광 방식을 사용할 수 있으며, 하나는 외부 광원을 통해 에너지를 공급받는 광발광 방식이고, 또 다른 하나는 전기로부터 에너지를 받아 직접 발광하는 전계 발광 방식이다. 광 발광 방식의 대표적인 예로는 양자점을 이용해 가장 처음 대중화된 방식인 색 변환 필름 디스플레이이며, 비교적 낮은 안정성으로도 적용할 수 있고 기존의 LCD 공정을 응용할 수 있다. 따라서 색 변환 디스플레이는 페로브스카이트 디스플레이의 가장 빠른 상용화 기술이 될 것으로 기대되고 있다. 하지만 head mounted 디스플레이, 플렉서블 디스플레이와 같은 차세대 디스플레이들은 얇은 두께, 가벼운 무게, 고효율 등을 요구하기 때문에, 궁극적으로는 자발광 방식이 유리하다. 따라서 안정성 개선 및 대면적 코팅, 패터닝 등의 다양한 기술들의 발전 과정을 통해 디스플레이는 컬러필터 디스플레이를 지나 궁극적으로 자발광 디스플레이로의 발전으로 이어질 것으로 전망된다.

101 페로브스카이트 색 변환 디스플레이 개발

4.1.1 페로브스카이트 색 변환 디스플레이 개요

색 변환 디스플레이의 구현을 위해 개발 가능한 디스플레이는 크게 LCD/ WOLED/QD-OLED로 나누어진다. LCD의 경우 RGB가 모두 포함된 백색 광원을 백라이트로 활용하여, 광원의 추출을 위한 컬러필터를 사용하여 RGB 어레이 구조를 구현하게 된다. 이때 액정을 통해 백색 광원의 빛을 통과 하거나 차단하여 화면을 나타낸다. WOLED도 RGB 구현을 위해 같은 컬러필터 구조를 사용하지만 백색 OLED를 광원으로 사용한다는 점에서 차이점이 존재한다. WOLED 구조는 특히 메타社の 퀘스트 및 애플社の 비전 프로에 적용된 구조로, 기본적으로 모든 파장 영역대를 포함하는 백색 광원 중에서 특정 파장만을 필터링하여 사용하기 때문에 발광효율이 이론상 1/3 수준이며, 낮은 효율로 인한 고전력 구동 및 발열 현상이 본질적인 한계점으로 존재한다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 제안된 QD-OLED구조는 청색 OLED 위에 녹색 및 적색 색 변환층을 활용하여, 높은 에너지를 갖는 청색 파장의 빛을 흡수한 후 원하는 파장으로 방출 가능한 광변환층을 활용한다. 이를 위해서 광변환층은 청색 빛을 충분히 잘 흡수하여야 하며, 광 변환효율을 높이기 위해 높은 형광 발광효율을 가져야 한다. 또한, 차세대 색 표준을 만족하기 위해 고색순도의 순수한 녹색 및 적색의 파장을 가지는 빛으로 변환이 가능하여야 한다는 복잡한 조건이 요구된다.

그림 44 청색 유기발광소자를 광원으로 활용한 마이크로 LED의 구동원리

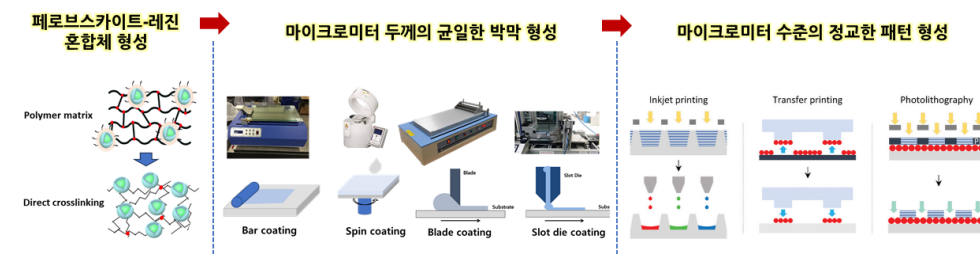


출처: Measuring Color Strength for Wide Color Gamut OLEDs, SID. Vol. 53, No. 1, pp. 1172-1175.

4.1.2. 페로브스카이트 색 변환 디스플레이 제작 방법

RGB 마이크로 LED 구현을 위한 페로브스카이트 색 변환층은 다음과 같은 일련의 공정을 통해 제작할 수 있다. 먼저, 수 마이크로미터 수준의 두께를 갖는 필름의 형성을 위해서 용액의 높은 점도가 요구되며, 이를 만족하기 위한 페로브스카이트-레진 혼합체의 형성이 선행적으로 이루어져야 한다. 패터닝 공정에서 광 패터닝을 활용하기 위해서는 광 패터닝을 위한 광활성 고분자인 레진 분자의 재료 설계가 필수적이다. 혼합체를 형성한 후에는, 바코팅, 스핀코팅, 블레이드 코팅, 슬롯-다이 코팅 등의 대면적 코팅 기술을 통해 균일한 마이크로미터 두께의 필름을 형성해야 한다. 이후, 잉크젯 프린팅, 전사 패터닝, 광 패터닝의 마이크로 패터닝 과정을 통하여 적색 및 녹색 색 변환층을 차례로 패터닝하여 RGB 마이크로 LED를 구현할 수 있다.

그림 45 페로브스카이트 색 변환 디스플레이 제작 공정 모식도



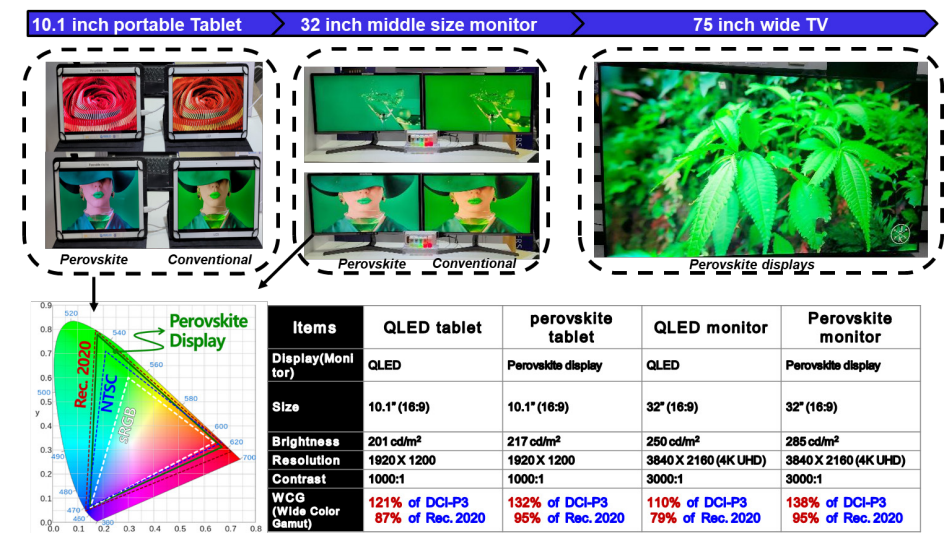
출처: Kim, J. et al., 2023. Recent Advances and Challenges of Colloidal Quantum Dot Light-Emitting Diodes for Display Applications, Vol. 36, p. 2212220

4.1.3. 페로브스카이트 색 변환 디스플레이의 기술 개발

국내 개발

페로브스카이트 색 변환 필름의 상업화는 현재 전 세계적으로 활발히 연구되고 있다. 국내의 경우, 서울대학교 이태우 교수의 SN Display社에서 고효율, 고안정성의 페로브스카이트 색 변환 필름을 개발하였다. 개발된 페로브스카이트 색 변환 필름은 고온고습($\geq 60^{\circ}\text{C}$, 90% RH) 및 고광속($\geq 100 \text{ mW}/\text{cm}^2$) 조건에서 15,000시간 이상 동안 90% 이상의 형광 발광효율을 유지하는 놀라운 성능을 보여주었다(출처: <https://www.sndisplay.com>). 이후 페로브스카이트 색 변환 필름을 적용한 10.1인치 태블릿, 32인치 모니터, 75인치 TV까지의 시제품을 2023년 CES에 보고하였다. 페로브스카이트 색 변환 필름이 적용된 디스플레이는 Rec.2020 색기준의 95% 이상을 만족하는 높은 색 재현력을 나타내었다.

그림 46 페로브스카이트 색 변환 필름이 적용된 디스플레이 시연



출처: 2024 CES(Consumer Electronics Show), SN Display Co., Ltd.

국외 개발

국외의 경우, 2019년 싱가포르의 Nanolumi社에서는 녹색 페로브스카이트 색 변환 필름이 적용된 32인치 미니 LED, 24인치 edge-lit LCD 모니터, 녹색/적색 페로브스카이트 필름이 적용된 10인치 태블릿 시제품을 발표하였다. 2020년 스위스의 Avantama社에서는 녹색 페로브스카이트 색 변환 관련 필름 시제품을 SID에 보고한 바 있으며, KSF 형광체가 도포된 LED 칩과 함께 사용하여 LCD 디스플레이에 적용하려는 연구를 진행 중이다. 영국의 Quantum Solutions에서는 녹색 페로브스카이트 양자점과 고분자의 복합체 필름을 개발 중에 있으며, 520~535nm의 발광 파장 및 80~100%에 이르는 높은 형광 발광효율을 갖는 필름을 개발하였다. 2021년 중국의 Zhijiang Nanotech社에서는 TCL과의 협업을 통해 75인치 QD-LED TV 시제품을 출시하였으며, 페로브스카이트 전구체와 고분자 혼합물을 코팅하는 방식으로 제작하였다. 최근에는 Oxford 대학의 스타트업인 Helio Display社에서 아크릴레이트 필름을 기반으로 한 필름을 개발하였으며, 고색순도를 갖는 고효율 녹색(532nm, 84%) 및 적색(634nm, 83%) 발광 필름 개발에 성공하였다. 또한 일본의 캐논社에서도 페로브스카이트 표면 리간드의 치환 및 광가교가 가능한 단량체의 혼합을 통해 수 um의 두께를 갖는 색 변환 필름을 개발하였으며, 녹색과 적색에서 각각 95%, 90%에 이르는 고효율 필름을 구현하였다.

102 안정성 향상을 위한 봉지 기술 개발

페로브스카이트 디스플레이의 상업화를 위한 큰 장벽 중 하나는 안정성 문제이다. 다른 발광체들과 마찬가지로 페로브스카이트 발광체도 공기 중의 산소와 수분에 취약하여 상용화에 어려움이 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 봉지 기술의 개발은 필수적이며, 이는 고효율과 고내구성을 달성하는 데 중요한 역할을 한다.

봉지재는 다음과 같은 주요 특성을 가져야 한다. 첫째, 높은 내습성과 내산소성을 갖추어야 한다. 봉지재는 외부의 습기와 산소가 박막에 침투하는 것을 차단하여 페로브스카이트의 구조적 안정성을 유지해야 한다. 특히 수분의 경우 WVTR(Water Vapor Transmission Rate)라는 지표로 매우 중요하게 평가될 수 있다. 둘째, 우수한 내열성을 가져야 한다. 봉지재는 고온 환경에서도 안정적으로 작동해야 하며, 변형이나 열화가 없어야 한다. 셋째, 광학적 투명성이 중요하다. 봉지재는 빛의 손실을 최소화하여 발광효율을 유지해야 하며, 자외선에 의한 황변화도 방지해야 한다. 봉지재로는 에폭시 수지 기반, 실리콘 기반, 고분자 기반 재료들이 주로 사용되며, 고분자를 이용하여 발광체를 감싸 외부의 산소, 물로부터의 접촉을 차단함으로써 입자의 안정성을 향상시키는 방법이 가장 활발하게 연구되고 있다.

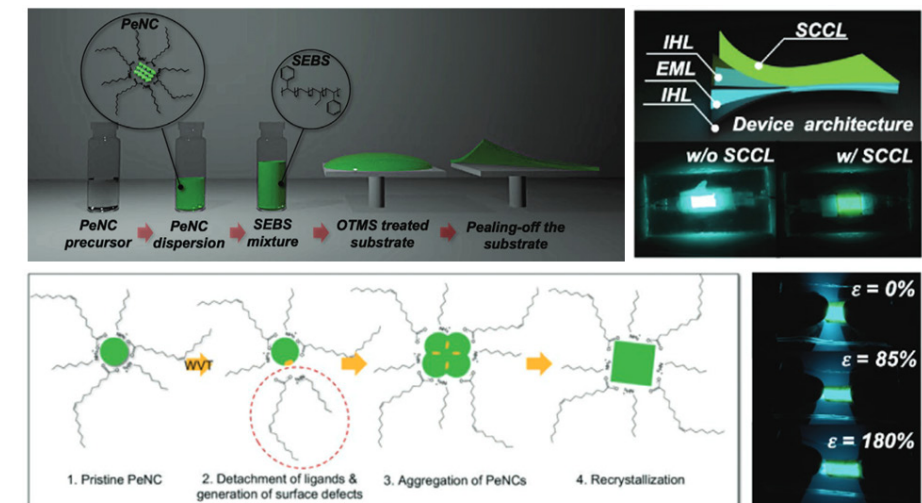
봉지 기술은 광발광 타입의 색 변환 필름을 위한 기술과 전계발광 타입의 자발광소자를 위한 두 가지 기술로 나뉘질 수 있으며, 높은 투과율 및 낮은 수분 및 산소 침투성 등의 봉지 기술에서 요구되는 전반적인 특성은 유사하나 그 정도와 기능에 따라 약간 차이가 있다. 색 변환 필름의 봉지재의 경우 $10^{-2}\text{g/m}^2/\text{day}$ 이하의 WVTR이 요구되며, 구동 중 발생하는 가혹한 조건에서도 변형이 없도록 고온(85°C) 및 고습(85% RH) 환경에서도 안정성을 유지해야 한다. 또한 수분 및 산소의 침투 방지를 위하여 페로브스카이트와 봉지 필름 간의 완벽한 접착력이 요구된다. 자발광 소자에서는 더 복잡한 구조로 인해 색 변환 필름 기준보다 더 엄격한 $10^{-6}\text{g/m}^2/\text{day}$ 이하의 WVTR이 요구되며, 무기층과 유기층의 조합 등의 다층구조나 다양한 디스플레이 폼팩터의 활용을 위한 내구성 및 유연성 등이 추가로 요구된다.

국내 개발

서울대학교 이태우 교수 연구팀은 고분자 매트릭스를 이용하여 공기 중에 안정하고 신축성이 있는 페로브스카이트 나노결정 색 변환층을 개발하여 발광소자와 결합해 스트레처블 디스플레이를 구현했다. 페로브스카이트는 가격, 양자효율 및 색순도 등 여러 측면에서 기존 유기 및 무기 발광체보다 우수하다고 알려져 있으나 페로브스카이트 나노결정은 산소 및 수분에 의해 빠르게 열화되기 때문에, 본 연

구에서는 SEBS(Styrene-Ethylene-Butylene-Styrene) 폴리머 매트릭스를 이용하여 나노결정을 감싸줌으로써 나노결정의 화학적 안정성뿐만 아니라 기계적 신축성까지 향상시켜 스트레처블 색 변환층으로 적용할 수 있게 되었다. 특히 본 스트레처블 색 변환층을 2개월 이상 물속에 보관할 경우 오히려 광발광 세기가 증가하는 현상을 발견했는데, 이는 수분에 의해 결함이 부동태화된 결과라는 것을 최초로 발견하였다. 또한 페로브스카이트 나노결정을 적용한 스트레처블 색 변환층을 이용하여 발광소자와 결합하여 백색 발광소자를 구현했으며 해당 소자를 180%까지 늘려도 발광 특성이 유지되는 것을 보였다.

그림 47 고신축성 소재를 활용한 신축성 광변환 소재 개발

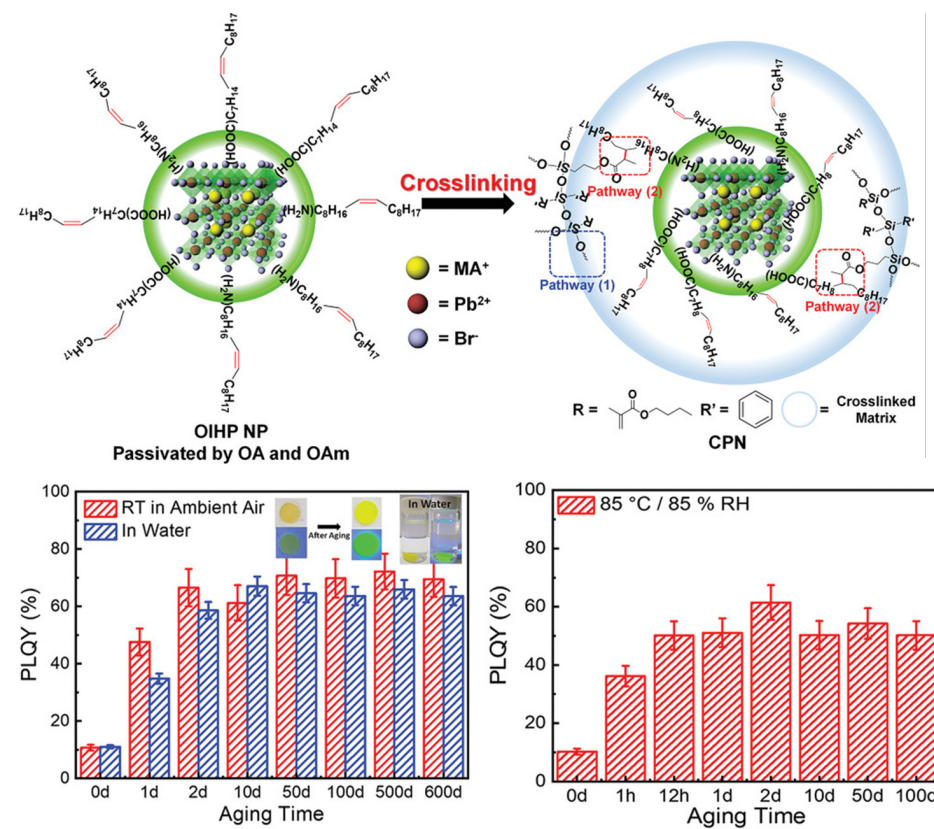


출처: Zhou, H. et al., 2020. Water Passivation of Perovskite Nanocrystals Enables Air-Stable Intrinsically Stretchable Color-Conversion Layers for Stretchable Displays. Advanced Materials, Vol. 32, No. 37, p. 2001989.

서울대학교 이태우 교수 연구팀은 광가교성 단량체들을 이용하여 외부의 수분 및 산소를 차단할 수 있는 봉지 기술을 개발하고, 그 결과로 고온 고습하에서 페로브스카이트 광변환 입자의 안정성을 향상시켰다. 상업화 수준에 달하는 고온, 고습 조건의 장기 보관 안정성을 확보하기 위해서는 페로브스카이트 표면에 위치하는 결함을 효과적으로 차단하는 기술이 필수적이다. 이를 해결하기 위하여 고안정성 실록산 기반의 광가교성 단량체들을 이용하여 메타 아크릴레이트 계열의 매트릭스를 형성하는 연구

가 진행되었다. 이를 통해 페로브스카이트 결함과 반응하는 외부의 수분 및 산소를 높은 수준으로 차단하여 대기 중에서 600일 이상 장기보관이 가능한 페로브스카이트-고분자 복합체를 제작하였다. 또한 상업화 수준인 85도, 85%의 가혹환경에서도 100일 이상 초기 발광효율을 유지하는 것을 통해 복합체 형성을 위한 고분자가 페로브스카이트의 안정성을 크게 향상시킬 수 있다는 것을 확인하였다.

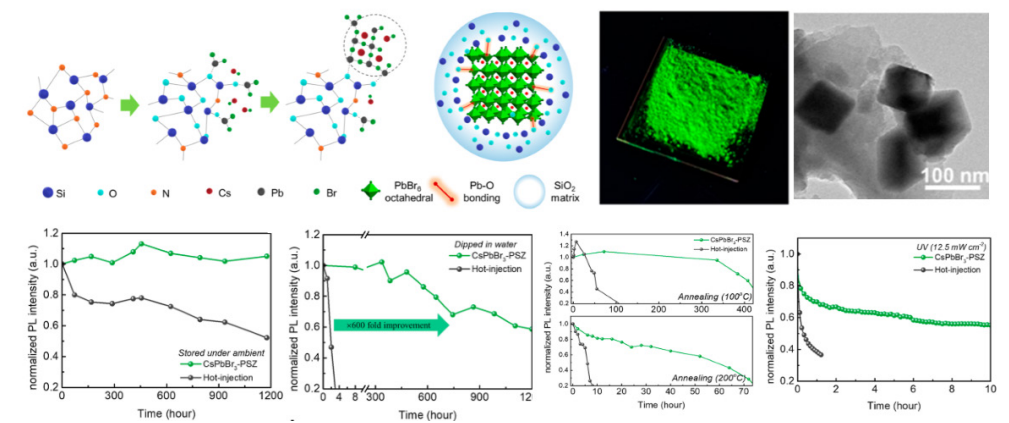
그림 48 광가교성 단량체를 통한 고안정성 페로브스카이트-고분자 복합체



출처: Jang, J. et al., 2020. Extremely Stable Luminescent Corsslinked Perovskite Nanoparticles uder Harsh Environments over 1.5 Years, Vol. 33, 2005255

페로브스카이트 나노입자를 합성 후 고분자와 혼합하게 될 경우 나노입자 표면과 고분자 간의 물성을 고려해야 하며, 충분한 인력이 형성되지 않을 경우 고분자 내에서 분리되거나 나노입자끼리 뭉치는 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 도입된 페로브스카이트 프리커서 상을 활용한 나노입자 복합체 합성법이 제안되었다. 페로브스카이트 합성에 필요한 이온결합성 프리커서를 실라잔(Silazane) 기반의 프리커서와 혼합 후, 용매를 천천히 증발시키며 100도에서 가열해 주게 되면, 실라잔의 표면에서 페로브스카이트 결정화가 발생하여 균질한 복합체 합성이 가능하다. 기존 공정의 경우 페로브스카이트 입자를 선행적으로 합성하고 이후에 고분자 단량체와 혼합하는 복잡한 공정을 거치는 것과 달리 단일 공정으로 페로브스카이트-고분자 복합체를 합성이 가능하다. 이를 통해 1,200시간 실온에 보관 시에도 초기 발광효율이 유지되었으며, 물속에서 1,100시간을 보관하는 가혹환경에서도 초기 효율 대비 60% 이상을 유지하였다.

그림 49 페로브스카이트 프리커서를 통한 복합체 단일 합성법의 개발

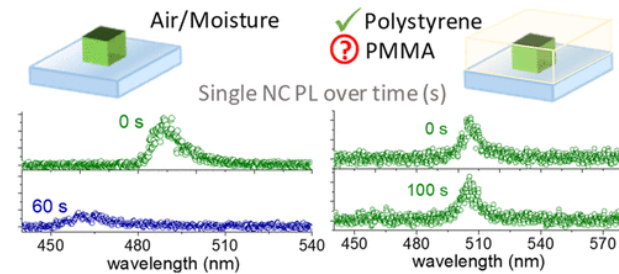


출처: Park, J. et al., 2023. Stable Orthorhombic CsPbBr₃ Light Emitters: Encapsulation-assisted In-situ Synthesis. *Chemistry of Materials*, Vol. 35, No. 16, pp. 6266–6273.

국외 개발

Maksym V. Kovalenko 그룹은 polymethyl methacrylate(PMMA), polystyrene(PS), styrene-ethylene-butylene-styrene(SEBS), cyclic olefin copolymer(TOPAS)와 같은 네 가지 고분자를 사용하여 페로브스카이트 발광체의 발광 성능과 안정성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 그 결과로 PS가 페로브스카이트 나노결정을 안정화하는 데 가장 효과적인 고분자 매트릭스로 밝혀졌으며, 이는 발광체의 환경 안정성과 광학적 성능을 향상시키는 데 중요한 요소로 작용하였다. 연구 결과는 페로브스카이트 기반 광학 및 양자광 응용 분야에서 고분자 매트릭스의 중요성을 강조하며, 향후 고분자 매트릭스 설계에 유용한 정보를 제공한다.

그림 50 Maksym V. Kovalenko 그룹의 Polymethyl Methacrylate(PMMA), Polystyrene(PS) 고분자를 활용한 봉지재



출처: G. Raino et al., 2019. Underestimated Effect of a Polymer Matrix on the Light Emission of Single CsPbBr₃ Nanocrystals, Nano Letters/Journal of Flexible & Printed Electronics. Vol. 19, pp. 3648–3653.

Yajie Dong 그룹은 용매의 증발에 의한 고분자의 수축을 활용하여 봉지층을 형성하는 swelling-deswelling microencapsulation 기법을 사용해 PS, PMMA, polycarbonate(PC), acrylonitrile-butadiene-styrene(ABS), cellulose acetate(CA), polyvinyl chloride(PVC)와 같은 다양한 고분자 봉지재를 적용한 페로브스카이트 박막을 제작하여 안정성을 확인하였다. 그 결과, MAPbBr₃-PS와 MAPbBr₃-PC 박막은 100°C에서 5시간 동안 65% 이상의 밝기를 유지했고, 끓는 물에서도 30분 동안 PLQY가 각각 7%, 15% 미만으로 감소하는 등 높은 내구성을 보였다. 고분자 매트릭스 내에서 나노결정들이 균일하게 분산되고 소수성 고분자 체인에 의해 표면이 효과적으로 봉지된 결과로 안정성이 크게 향상되었다.

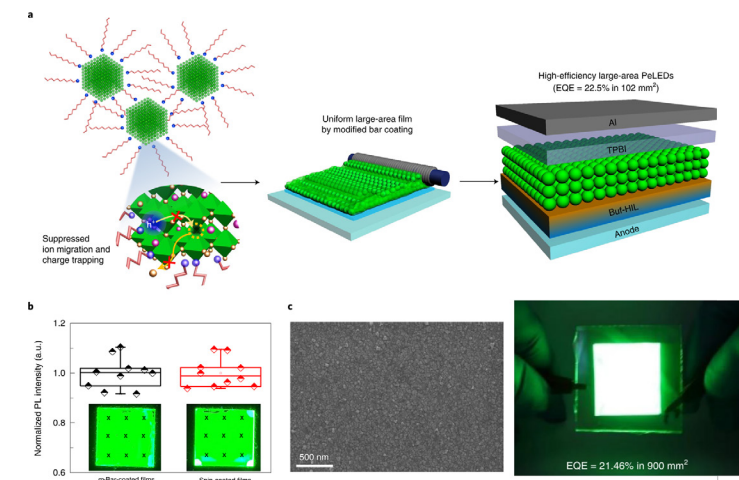
03 대면적화 및 탠덤 기술 개발

페로브스카이트 디스플레이의 상업화를 위해서는 대면적 코팅이나 탠덤 기술과 같은 공정적 개발도 필요하다. 대면적 코팅 기술은 페로브스카이트를 균일하게 넓은 면적을 코팅하는 기술을 말하며, 디스플레이를 대형화하거나, 다양한 크기와 형태로 대량 생산하는 데 필수적인 기술이며, 생산 비용 절감 측면에서 매우 의미가 있다(Nature Nanotechnology 17, 590–597 (2022)). 탠덤 기술은 여러 층을 적층하는 기술로 디스플레이의 효율성과 수명을 극대화하여 상용화의 가능성을 높일 수 있다(Nature Nanotechnology, 19, 624–631 (2024)).

국내 개발

서울대 이태우 교수 연구팀은 고효율의 대면적 페로브스카이트 발광소자를 제작하기 위한 전략을 개발하였다. 페로브스카이트 다결정 벌크 발광체와는 달리 페로브스카이트 나노입자를 사용하여 박막화 단계와 결정형성 단계를 분리할 수 있음을 활용하였고, 이를 통해 대면적에서도 균일한 박막을 형성하는 데 성공적으로 활용하였다. 또한 연구팀은 modified-bar coating 방법을 개발하여 대면적의 페로브스카이트 발광소자를 제작하는 데 성공하였으며, 개발된 페로브스카이트 발광소자는 900mm² 면적에서 외부양자효율 21% 이상의 고효율을 나타내었다.

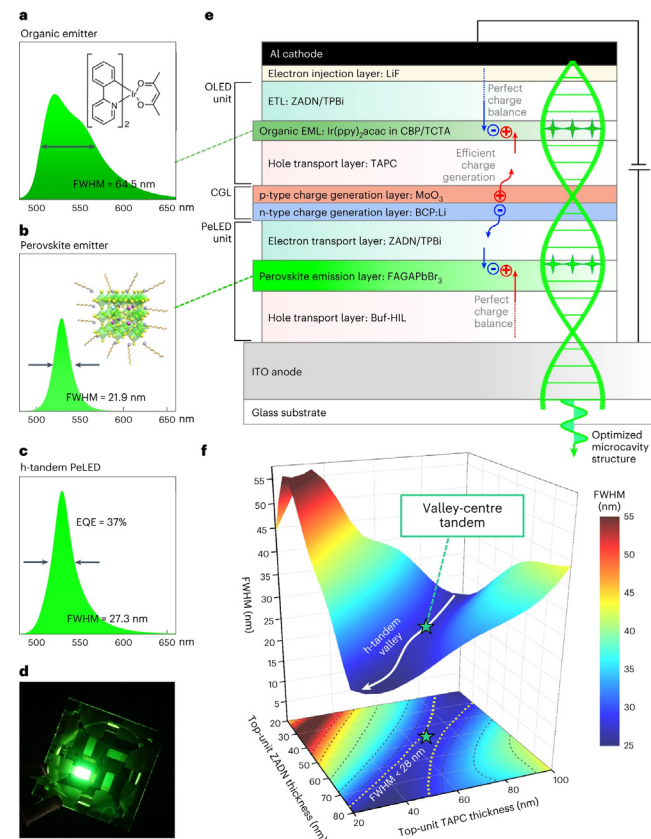
그림 51 대면적 페로브스카이트 나노입자 발광소자 제작



출처: Kim, Y.-H. et al., 2022. Exploiting the Full Advantages of Colloidal Perovskite Nanocrystals for Large-area Efficient Light-emitting Diodes. Nature Nanotechnology, Vol. 17, pp. 590–597.

서울대 이태우 교수 연구팀은 페로브스카이트 나노입자를 활용하여 탠덤 소자 구조의 고효율 페로브스카이트 발광소자를 개발하였다. 페로브스카이트 다결정 벌크 발광체와는 달리 페로브스카이트 나노입자는 매우 얇은 두께로 제작될 수 있어, 광흡수를 최소화하고 이는 다수의 박막으로 구성된 탠덤 소자에 적용되기 적합하다. 위와 아래의 발광 유닛 사이의 전하수송의 균형을 이루고 좁은 반치폭을 나타내는 광학 밸리(Optical Valley)존에서 소자를 구현하여 고효율과 고색순도를 동시에 달성하였다. 연구팀은 페로브스카이트 나노입자와 유기 발광체를 결합한 하이브리드 탠덤 페로브스카이트 발광소자를 제작하였으며, 외부양자효율 37%의 고효율을 달성하였다. 또한 페로브스카이트 단일소자의 구동 수명은 동일 휘도(100nit) 기준 1.8시간인 반면, 연구팀이 개발한 탠덤 소자의 구동 수명은 5,596시간으로 약 3,108배 향상되었다.

그림 52 하이브리드 탠덤 페로브스카이트 발광소자 제작

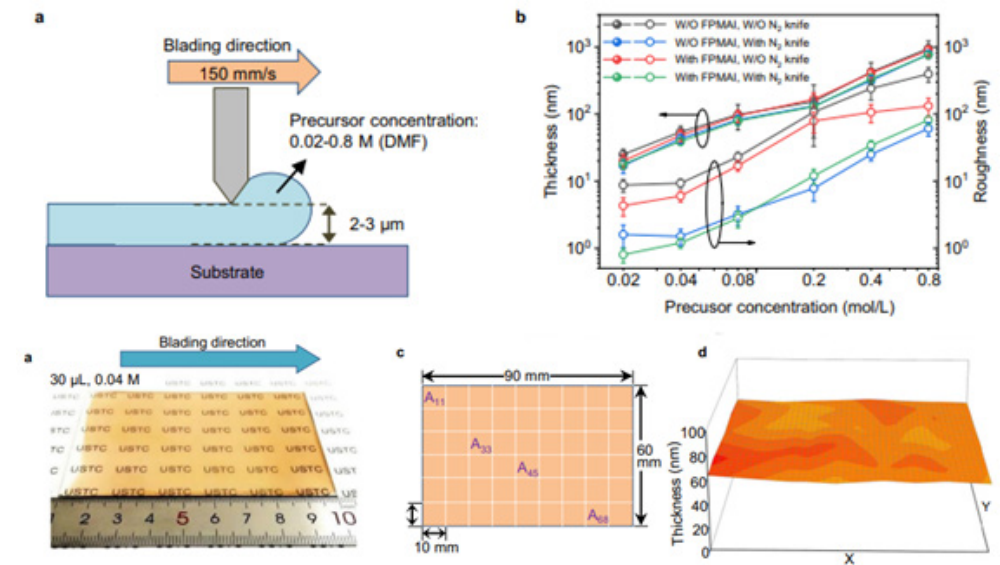


출처: Lee, H.-D. et al., 2024. Valley-centre Tandem Perovskite Light-emitting Diodes. Nature Nanotechnology, Vol. 19, pp. 624-631.

국외 개발

(중국) University of Science and Technology of China의 Zhengguo Xiao 교수 연구팀은 저온 블레이드 코팅법(Blade-coating)으로 발광 면적 54cm^2 , 외부양자효율(EQE) 16.1%의 대면적 페로브스카이트 발광소자를 보고했다. 페로브스카이트 용액의 농도를 조절하고 과량의 유기암모늄 할라이드 도입으로 졸겔 법과 블레이드 코팅을 최적화하였고 다양한 졸겔 단계를 10초에서 2.5초로 단축시켰다. 이를 통해 페로브스카이트 물질 자체의 낮은 비용과 더불어 1cm^2 당 0.02센트의 낮은 생산단가로 페로브스카이트 발광소자 상용화 가능성을 보였다.

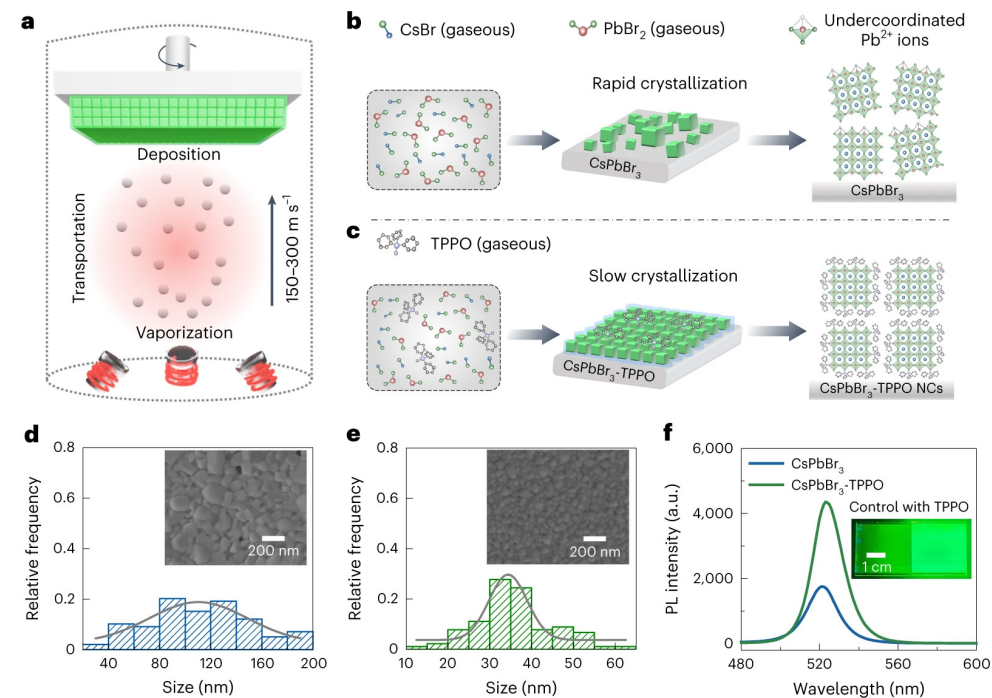
그림 53 블레이드 코팅과 졸겔 법을 통해 대면적 페로브스카이트 형성



출처: Chu, S. et al., 2021. Large-area and Efficient Perovskite Light-emitting Diodes Via Low-temperature Blade-coating. Nat. Commun, Vol. 12, p. 147.

(중국) Huazhong University of Science and Technology의 Jiang Tang 교수 연구팀은 전 공정을 열 증착을 통해 페로브스카이트 발광소자를 제작하였으며 외부양자효율(EQE) 16.4%를 보고했다. 또한 전면 발광 능동형(Active matrix) 페로브스카이트 발광소자를 제작하여 1,080*2,400의 해상도와 연속적인 회색 색표 정보 표현을 달성했다. Lewis-염 첨가물인 triphenylphosphine oxide(TPPO)를 통해 결함의 부동태화 결정화 지연, 결정립 크기 제어를 했다.

그림 54 전공정 열 증착을 통한 대면적 페로브스카이트 발광소자



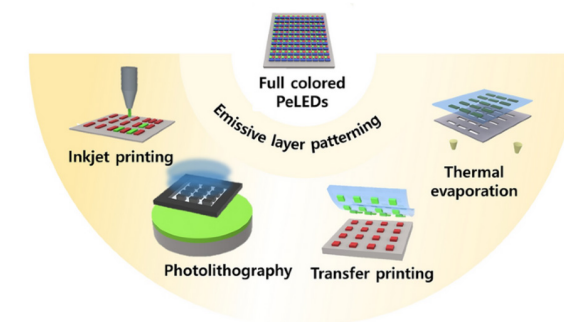
출처: Li, J. et al., 2023. Efficient All-thermally Evaporated Perovskite Light-emitting Diodes for Active-matrix Displays. Nat. Photon, Vol. 17, pp. 435-441.

04 어레이를 위한 패터닝 기술 개발

페로브스카이트 디스플레이는 현재 단일 단색 소자에서 이론적인 외부양자효율에 가까운 성과를 달성하며, 상용화된 디스플레이 기준에서 요구하는 약 30%의 효율을 달성했다. 하지만 디스플레이로서의 활용을 위해서는 RGB 서브픽셀 패터닝을 통해 풀컬러 디스플레이로 제작해야 한다. 따라서, 페로브스카이트의 고색순도, 고효율 장점을 살리면서도 잘 정의된 픽셀을 제작하는 패터닝 연구가 필수적이다.

양자점 패터닝에서 착안된 다양한 패터닝 기술들이 페로브스카이트에 적용되어 개발되고 있으며, 대표적인 방법으로는 포토리소그래피, 잉크젯 프린팅, 트랜스퍼 프린팅 등이 있다. 포토리소그래피는 반도체 공정에서 널리 사용하는 기술로, 포토레지스트와 자외선을 이용하여 경화시키는 방식이다. 잉크젯 프린팅은 액체 상태의 페로브스카이트 전구체 용액을 정밀하게 분사하여 패턴을 형성하는 기술이며, 트랜스퍼 프린팅은 스탬프 등을 이용하여 물질을 하나의 표면에서 다른 표면으로 직접 전이시켜 패턴을 형성하는 방식이다. 페로브스카이트는 기존의 양자점이나 재료들에 비해 높은 화학적 불안정성을 가지고 있어, 포토레지스트 혹은 용매와 같은 화학적 물질 등 기존의 공정으로부터의ダメージ를 최소화하는 것이 주요 이슈로 제시되고 있다. 이에 기존의 포토레지스트를 이용하지 않는 직접적 광 리소그래피(Direct photolithography) 등의 패터닝 기술도 등장했다. 하지만 페로브스카이트를 이용한 패터닝 기술의 발전은 아직 상대적으로 미비한 수준이며, 상업적 잠재력 극대화, 실용적 응용 가속화를 위해 지속적인 연구와 개발이 필요하다.

그림 55 페로브스카이트의 여러 가지 패터닝 방법

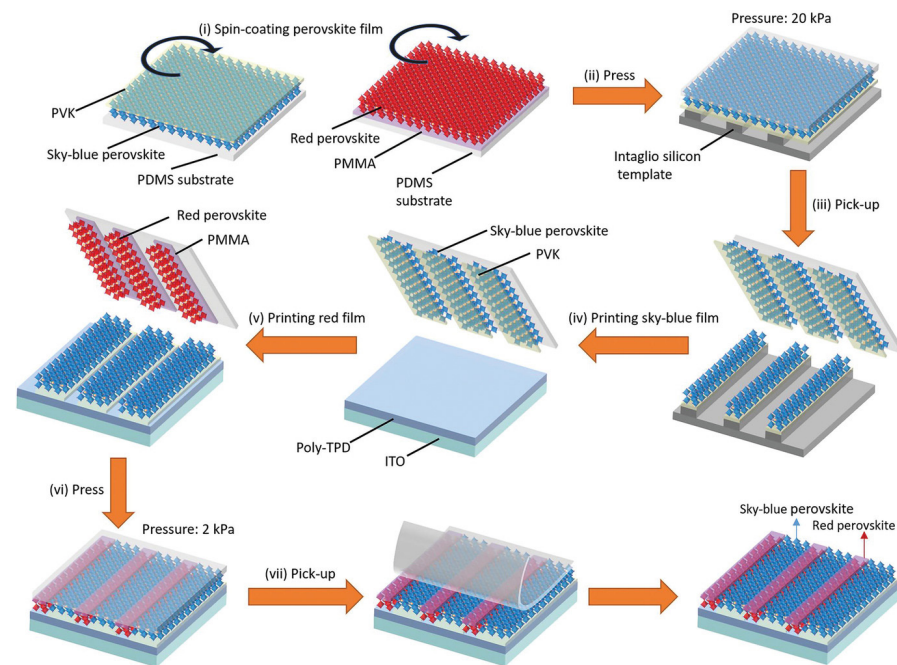


출처: Lee, G. H. et al., 2024. Recent Advances in Patterning Strategies for Full-Color Perovskite Light-Emitting Diodes. Nano-Micro Lett, Vol. 16, p. 45.

국외 개발

(중국) University of Science and Technology of China의 Zhengguo Xiao 교수 연구팀은 가 지 형태를 갖는 매우 얇은 폴리에틸렌이민층을 화학적인 결합층으로 사용하여 트랜스퍼 프린팅으로 페로브스카이트 패터닝을 성공하였다. 적색, 하늘색 페로브스카이트 마이크로스트립 패턴을 1인치당 1270픽셀에 해당하는 고해상도로 구현하였으며, 이를 통해 디스플레이 상용화에 필요한 white LED 제작에 성공하였다.

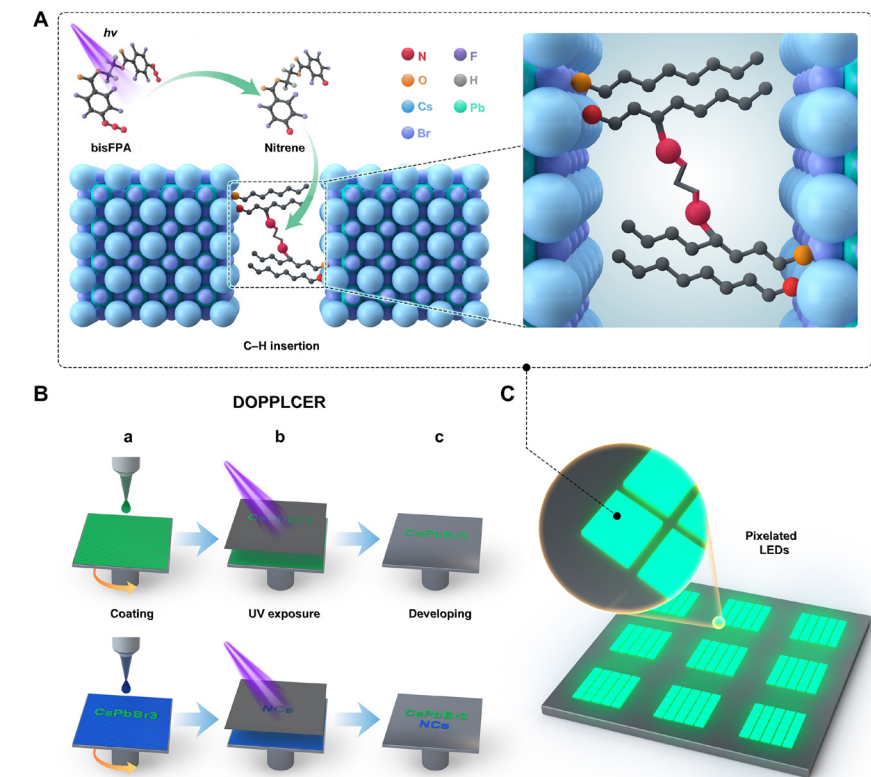
그림 56 PDMS 스탬프를 이용한 트랜스퍼 패터닝



출처: Li, Z. et al., 2022. Mass Transfer Printing of Metal-halide Perovskite Films and Nanostructures. Adv. Mater, Vol. 34, No. 35, p. 2203529.

(중국) Tsinghua University의 Jinghong Li 교수 연구팀은 광가교 가능한 리간드인 bisFPA를 도입하여 마이크로 패터닝 마스크와 함께 직접적인 광가교(direct crosslinking)를 통한 페로브스카이트 나노입자 패터닝을 보고하였다. 기존 패터닝 공정으로부터의 페로브스카이트의 손상을 극복하기 위하여 포토레지스트를 사용하지 않고, 리간드 사이를 가교 시켜줄 수 있는 광 활성 물질을 첨가하여 5μm 수준의 고해상도 패터닝을 제작하였고, 이에 그치지 않고 패턴화된 자발광 소자를 제작하여 페로브스카이트 자발광 디스플레이의 가능성을 제고했다.

그림 57 광가교 리간드를 이용한 나노입자의 직접적인 광학 패터닝(direct photo patterning)



출처: Liu, D. et al., 2022. Direct Optical Patterning of Perovskite Nanocrystals with Ligand Cross-linkers. Sci. Adv, Vol. 8, No. 11, p. 8433.



5

정책제언

정책 제언

페로브스카이트 소재에 대한 원천 특허를 서울대학교 이태우 교수팀이 확보한 것은 대한민국 디스플레이 산업에서 발광소재에 관한 첫 번째 원천 특허 확보 사례로서 큰 의미를 지닌다. 과거에는 원천 특허의 부재로 기존의 디스플레이 발광소재에 대해 미국/일본/유럽 국가 등 타국으로부터의 기술 종속이 있었으나, 페로브스카이트 디스플레이의 경우에는 페로브스카이트 소재 기술의 선점을 통해 이것을 방지할 수 있고, 디스플레이 시장에서의 주도권을 확보할 기회가 될 수 있다. 또한 새로 급부상하고 있는 중국 디스플레이 기술 개발의 추격을 새로운 기술로 돌파할 수 있도록 할 수 있어서, 글로벌 기술 리더십을 강화할 수 있는 중요한 발판을 마련한 것으로 생각된다.

한편, 재료에 대한 원천 특허는 한국에 있지만, 중국의 Zhiling Nanotech 및 TCL과 같은 주요 기업들이 페로브스카이트 LED와 관련된 신기술에 대규모 투자를 단행하며 빠르게 기술력을 따라잡고 있고, Nanolumi(싱가포르), Avantama(스위스), Quantum solutions(영국), Helio display(영국) 등, 타국에서 페로브스카이트 디스플레이 관련 벤처 기업이 더 많이 발생하고 있다. 이에 한국에서도 벤처기업 육성에 대한 지원을 통해 산업화를 향한 원천 기술과 특허의 확보가 필수적이다. 이러한 현황은 국가적 차원에서 페로브스카이트 디스플레이 소재에 대한 전략적 지원과 기술 확보가 필요함을 시사한다.

과학기술정보통신부를 비롯해 산업통상자원부, 그리고 산하 여러 기관에서 디스플레이 관련 과제 및 인력 양성을 위한 지원을 진행하고 있지만, 반도체에 비해 상대적으로 디스플레이 기술에 대한 투자와 지원 규모는 부족한 상황이다. 특히 디스플레이 중에서도 원천 기술 개발이 요구되는 발광 신소재 개발과 이를 기반으로 한 응용 연구에 대한 국가 과제 및 인력 양성 직원이 적절한 수준으로 이루어지고 있는지에 대해 재검토가 필요하다. 현재 우리나라의 R&D 정책은 한 방향에서는 연구 과제가 산업화 촉진 단계에 치중되어 있거나, 다른 한 방향에서는 기초 연구에 과도하게 집중되는 경향이 있다. 이를 보완하기 위해, 산업화와 기초 연구의 중간 단계를 지원할 수 있는 전담 부서 설립과 함께, 실질적인 지원을 제공할 수 있는 통합적 정책과 법률 마련이 필요하다. 이러한 부서는 컨트롤 타워 역할을 수행하여, 신기술에 대한 정책적 지원을 총괄하고 조율하는 역할을 맡아야 한다. 이를 통해서 우리나라에서 확보한 원천 특허 기반 신사업 개발이나 더 나아가 창업으로 이어지는 생태계를 만들고 이 기업들이 디

스플레이 산업의 주도권을 형성할 수 있도록 도와야 한다. 이를 통해서 우리나라의 다음 세대 디스플레이의 새로운 주도권을 확보하는 데 주력해야 한다. 우리나라에서 확보한 원천기술이 우리나라에서 크게 성장하지 못하고 오히려 경쟁국가에서의 공격적인 투자로 인해서 경쟁력이 위축되고 기술의 주도권이 빼앗기는 상황이 발생하지 않도록 해야 한다.

결론적으로, 페로브스카이트 LED와 같은 신기술의 발전을 위해서는 기존의 지원 체계를 넘어서 체계적이고 통합적인 정책적 지원이 요구된다. 이러한 지원은 페로브스카이트와 같은 차세대 디스플레이 소재의 연구개발을 뒷받침하며, 나아가 우리나라가 글로벌 시장에서 지속적인 기술 우위를 유지할 수 있도록 하는 중요한 초석이 될 것이다. 또한 페로브스카이트 소재가 성공적으로 디스플레이 분야에서 상용화된다면, 향후 광검출기, 태양전지, 의료용 X-ray 신틸레이터, 조명 산업 등 다양한 산업으로의 확장이 가능하여 상당한 파급 효과를 가져올 수 있으며, 이러한 성장은 국가 기간산업의 경쟁력을 강화할 중요한 기회로 작용할 것이다.

페로브스카이트 디스플레이 개발을 위한 정책 제언은 아래와 같다.

학계

(가) 연구 분야의 수명 위주의 방향성 확보

페로브스카이트 자발광 디스플레이는 연구는 전 세계의 학계에서 연구가 폭발적으로 진행되어, 10년 만에 기존의 OLED와 QLED 수준의 최고 양자효율을 달성하는 기염을 토하였다. 하지만 여전히 기초 연구 및 실험 단계에 해당하며, 시제품 및 제품화 수준으로 넘어가기 위해서는 연구 방향성의 재수립이 필요하다.

페로브스카이트 자발광 디스플레이의 효율이 광추출효율을 고려한 이론적인 한계 수준인 30% 수준까지 달성한 현시점에서, 해당 기술을 다음 단계로 성숙시키기 위해서는 가장 우선적으로 상용화 수준의 구동 수명 확보가 필수적이다. 현재 페로브스카이트 자발광 디스플레이의 최고 수명은 서울대학교 이태우 교수 연구팀의 2022년 Nature 지에 발표된 T50 > 30,000h(초기휘도 100 nit)이지만, 상용화를 위해서는 수명을 100,000 h 이상까지 향상시켜야 한다. 하지만 여전히 2014년부터 이어져 온 페로브스카이트 자발광 디스플레이는 효율 위주의 연구가 주된 흐름을 이어 나가고 있다. 학계는 이러한 현시점의 연구개발 목록의 중요도를 수명과 관련된 연구 중심으로 재수립하여 페로브스카이트 자발광 디스플레이의 연구를 이어 나가야 한다.

(나) 학문교류 및 인프라 확보 및 공유

앞선 연구개발 방향성의 제안에 따른 페로브스카이트 자발광 디스플레이의 수명 연구는 상당히 새롭고 도전적인 과제이며, 이의 명확한 메커니즘 규명 및 분석/측정 방법에 대해서도 정립 중인 단계이다. 그 이유는 페로브스카이트는 기존의 유기 발광체/무기 퀀텀닷에서는 존재하지 않는 이온 이동(ion migration) 효과로 인해 기존의 분석 방법들을 그대로 활용하기가 제한적이기 때문이다. 이러한 까다로운 분석을 진행하기 위해서는 페로브스카이트 재료공학자와 더불어, 물리학/광분석/현미경/컴퓨팅 등 다양한 분야의 전문가들이 교류하고 협력하는 것이 필수적이다.

그러므로, 다양한 분야의 국내외 연구자들과 직접적으로 학술 교류를 하는 자리를 마련하여 협력과 시너지 효과가 나도록 해야 하며, 단위 연구실에서 독자적으로 수행하기 어려운 고급 분석을 위한 연구 장비 인프라를 공동 구축, 공유하여 연구 활동을 촉진 시켜야 한다.

(다) 후속 신진연구자 지원

페로브스카이트 자발광 디스플레이의 학문은 올해 들어 10년 차에 들어서고 있음에 따라, 국내 페로브스카이트 자발광 디스플레이 연구를 선도하는 이태우 교수 등의 후속 세대들이 학문을 이어받아 국내에서 새롭게 연구를 시작하는 시기에 들어섰다. 하지만 페로브스카이트 합성, 전하 수송층 형성, 전극 열 증착 등, 각 단계에서 글러브박스과 고가의 열증착기 등을 필요로 하는 발광 다이오드 제작 기술의 특성상, 후속 신진연구자들이 독자적인 연구실 장비를 구축하고 세계적인 연구와 성과를 창출하기에는 인프라적으로 한계가 많은 실정이다. 이에 신진연구자들에 대한 지원을 아끼지 않아 지속적으로 학문을 이어받아 분야를 성숙시키고 결실을 맺을 수 있도록 뒷받침해야 한다.

(라) 국가출연연구소에서의 연구 지원

국가출연연구소는 산업화와 기초 연구의 중간 단계에 위치한 페로브스카이트 자발광 디스플레이 기술의 연구개발을 적극 지원해야 한다. 해당 기술은 학계가 추구하는 학문적 연구와 산업계가 지향하는 시장 중심 연구 사이에서 간극이 발생할 수 있다. 국가출연연구소에서는 이 간극 사이에 발생할 수 있는 문제와 공백 기술들을 발굴하고 해결하기 위한 노력을 해야 하며, 이를 해결하기 위해 국가출연연구소는 정부 차원에서 장기적인 계획을 수립하고 연구개발을 추진할 필요가 있다.

현재 페로브스카이트 디스플레이 기술 중 상업화 가능성이 가장 높은 색 변환 필름 제작을 위해 대면적 롤투롤(Roll-to-Roll: R2R) 프린팅 기술의 발전이 요구된다. 이를 위해 국가출연연구소는 고도

화된 R2R 장비를 학계와 공유하고 공동 연구를 통해 기술적 난제를 해결하는 협업 시스템을 마련해야 한다. 대면적 R2R 프린팅 기술은 생산 비용 절감과 대량 생산을 가능하게 하여, 페로브스카이트 기반 색 변환 필름의 상용화에 핵심적인 역할을 할 것이다. 또한, 고해상도 자발광 디스플레이 구현을 위해 대면적 고해상도 패터닝 기술이나 백플레인 기술에 대한 집중 지원이 필요하다. 롤투롤 패터닝, 레이저 패터닝 등의 패터닝 기술 및 백플레인 기술들은 연구실 규모에서 진행하기에는 어려운 복잡한 공정과 장비를 요구하기 때문에, 국가출연연구소에서는 이러한 복잡한 기술들을 공유하여 실험실 수준의 기술들을 산업화 수준으로 확대 적용할 수 있도록 지원해야 한다.

연구소는 학계에서 축적된 기초 연구를 기반으로 상용화 가능성을 높이는 응용 연구를 수행하며, 이를 산업계로 기술 이전하여 기술 상용화의 핵심적 역할을 담당하도록 한다. 또한 협업 모델이나, 파일럿 프로젝트 등을 적극적으로 추진하여 기술 개발과 상용화를 촉진할 수 있도록 한다. 나아가 글로벌 기술 트렌드와 변화를 모니터링하고 그에 맞는 미래 기술 개발을 위한 연구 기획 및 전략 수립하여 해당 분야의 지속적인 발전을 도모해야 한다.

정부

(가) 연구자 중심 중장기적 지원 사업

열 증착 기반의 OLED가 처음 보고된 부로 양산까지 20년이 소요된 것과 비교하였을 때, 페로브스카이트 자발광 디스플레이가 지난 10년 동안 이루어 낸 성능 향상은 매우 빠르다고 볼 수 있다. 그렇지만 페로브스카이트는 열 증착 방식보다 고난이도의 기술인 용액 공정임을 고려 했을 때, 구동 수명 증가와 패터닝 기법 정립을 위해서는 앞으로도 지속적인 연구가 요구된다.

반면 열 증착에 비해 재료 소모를 최소화하고, 연속 공정 및 대형 디스플레이 생산에서 장점이 있다는 용액 공정을 통해 양산에 성공하였을 때, 값싸고 높은 색순도의 페로브스카이트 자발광 디스플레이가 디스플레이 산업에 가져올 새로운 패러다임의 부가가치는 산정할 수 없이 클 것으로 기대된다. 따라서 정부는 연구자들과 밀접하게 소통, 현재 기술 개발 단계 및 문제점을 면밀히 파악하여, 연구개발비를 중장기적으로 투자하는 것이 바람직할 것이다.

(나) 집단 공동연구센터 구축

학계의 페로브스카이트 자발광 디스플레이 관련 후속 신진연구자들이 겪는 인프라 부족에 대한 근

원적인 해결책으로 페로브스카이트 집단 연구 공동센터 구축이 권장된다. 현재 기초/응용 연구 단계의 페로브스카이트 자발광 디스플레이는 개별적인 연구실/연구소 단위로 개발이 진행되고 있다. 자발광 디스플레이는 공학적으로는 페로브스카이트 발광층뿐만 아니라 계면, 전하 수송층, 전극 등이 동시에 개발이 필요하고, 여러 물리/화학 등 기초분석들이 이를 뒷받침해 주어야 하는 연구의 특성을 가지고 있다. 이에 고도로 복합화된 공동연구센터를 설립하여 각 분야의 전문가들이 인프라를 공유하고 협력 및 개발을 진행할 수 있도록 지원해야 한다.

(다) 페로브스카이트 발광체 성능 인증 사업

미국재생에너지연구소(NREL)에서 성능에 대한 공식 인증을 발급하는 태양전지와는 달리, 발광 다이오드의 경우에는 그 효율이나 휘도, 수명에 대해 공식적으로 인증하는 기관이 존재하지 않는다. 이는 연구자들이 자체적으로 구축한 설비를 이용해 측정을 진행하게 되고, 측정 방식에 따라 신뢰성이 떨어지는 결과로 이어진다. 이에 정부는 페로브스카이트 발광체와 발광 다이오드의 특성을 평가하고 인증할 수 있는 표준 기준을 세울 수 있도록 지원이 필요하다.

(라) 산학 협력 단기 페로브스카이트 색 변환 디스플레이 개발 진행

앞선 페로브스카이트 자발광 디스플레이 기술은 중장기적인 계획으로 개발이 필요한 기술인 반면, 여전히 디스플레이 산업에서는 중국의 매서운 성장에 의해 빠른 시일에 기술 격차를 낼 수 있는 개발 전략 또한 동시에 수립해야 한다. 페로브스카이트 색 변환 디스플레이는 자발광 방식에 비해 상대적으로 기술의 난이도가 낮아, 단기적으로 시제품 구현까지 가능한 기술이다. 그에 따라, 국내 디스플레이 산업의 기술격차와 점유율을 유지하기 위해, 산학이 밀접하게 연계된 색 변환 디스플레이 개발 지원을 하고, 시제품과 양산을 목표로 한 2트랙 개발 전략을 제언한다.

(마) 정책적 지원과 컨트롤 타워 역할 강화

현재 연구가 산업화 촉진과 기초 연구 사이에서 균형을 이루지 못하는 부분을 해결하기 위해, 산업화와 기초 연구의 중간 단계를 지원하는 전담 부서를 마련하고, 연구개발비를 균형 잡히게 배분하는 통합적 정책을 마련해야 한다. 이를 통해 국내 기업들이 창업으로 이어지고 디스플레이 산업의 주도권을 형성할 수 있는 생태계를 조성해야 한다. 이를 위해서 페로브스카이트 디스플레이 분야에서 정부의 정책적 지원을 총괄하고 조율하는 중앙 기구를 신설하여 신기술의 전략적 지원을 관리해야 한다. 이를 통

해 우리나라에서 확보한 원천 특허와 기술을 활용한 신사업 개발을 촉진하고, 나아가 글로벌 시장에서 우리나라가 주도권을 확보할 수 있도록 돕는다.

(바) 혁신적인 기술 생태계 구축

페로브스카이트 디스플레이 산업의 미래 성장을 위해서는 혁신적인 스타트업의 역할이 중요하다. 정부는 창업 자금 지원, 창업 인프라 확충, 세제 혜택 등을 통해 디스플레이 산업 내 새로운 벤처기업이 성장할 수 있도록 지원해야 한다. 이는 또한 글로벌 경쟁에서 기술 주도권을 확보하는 데 필수적이다. 중소기업들이 학계의 최신 연구 성과를 산업화하는 데 필요한 기술 이전과 산학협력을 위한 플랫폼을 마련하여 기술의 빠른 이전과 상용화를 촉진해야 한다.

(사) 글로벌 협력 네트워크 구축 및 시장 진출 지원

페로브스카이트 디스플레이 기술의 국제 경쟁력을 강화하기 위해, 한국을 기반으로 하는 국제 공동연구센터를 설립하여 주요 선진국과의 기술 교류와 협력을 활성화해야 한다. 이를 통해 대한민국이 글로벌 기술 리더십을 강화하는 허브 역할을 할 수 있도록 지원한다. 글로벌 시장으로의 진출을 위한 전략적 지원 프로그램을 구축하여, 국내 기업이 해외 진출 시 필요한 기술 인증, 마케팅, 규제 준수 등을 원활히 수행할 수 있도록 돕는다. 특히 중국, 유럽, 미국 등 주요 시장에 대한 규제 대응을 지원하여 디스플레이 산업 내 경쟁력을 높이는 것이 중요하다.

산업계

(가) 페로브스카이트 디스플레이 선점 양산

페로브스카이트 발광체 및 디스플레이에 관한 연구는 여전히 학계 중심으로 이루어지고 있다. 반면 중국의 디스플레이 기업 TCL은 Zhijing Nanotech와 함께 2021년 페로브스카이트 색 변환 디스플레이에 대한 시제품을 공개하였고, Canon 또한 페로브스카이트 나노결정을 차세대 디스플레이 발광체로서 2023년 개발 사실을 공개하였다. 이러한 흐름에 따라 국내 산업계의 경우 세계적으로 페로브스카이트 발광체 연구를 주도하는 국내 학계와 연계하여 연구개발을 진행하여 시장을 선점하는 것이 중요하다.

(나) 페로브스카이트 시장 확보 및 납 관련 인식 및 규제 완화 활동

페로브스카이트 물질이 상용화하는 데 납이 함유되어 있음을 우려하는 목소리가 있다. 하지만 디스플레이 응용처에 사용되는 페로브스카이트의 두께는 자발광 디스플레이 기준 최대 수백 나노미터, 색 변환 디스플레이의 경우 수십 마이크로미터의 얇은 두께임에 따라 사용되는 납의 양은 극미량에 불과하다. 또한 페로브스카이트는 디스플레이 내 배리어 필름 사이에 보호되어 있거나, 표면을 캡슐화하는 과정을 거치기 때문에, 인체 및 환경에 대한 독성은 기존 폴리스티렌 고분자와 유사할 정도로 미미한 수준이다. 따라서 산업계는 페로브스카이트 디스플레이에 대한 안전 인증 기준을 획득하고, 환경 보호를 위한 생산방식과 사후 처리 방식을 구축하여 규제기관과 소비자들에게 적극적으로 대처 및 마케팅을 전개해야 한다.



6

결론 및 전망

결론 및 전망

AR/VR, 스마트워치, 차량용 디스플레이 등 다양한 품팩터의 전자제품들과, IOT 등의 개발로 디스플레이 활용처는 무궁무진해지고 있는 흐름에서, 페로브스카이트는 차세대 디스플레이 발광체로 주목을 받고 있다. 기존의 LCD나 OLED/QLED 기술과 비교했을 때, 뛰어난 색 재현력을 지니고 있으며, 기존의 유기 발광체와 무기 양자점을 값싼 페로브스카이트로 대체하여 고효율 및 고색순도를 가진 고품질의 자발광 디스플레이 구현이 가능하다는 장점이 있기 때문이다.

현재까지 연구 결과를 종합 해보았을 때 극저온에서만 발광을 유지하던 낮은 효율의 페로브스카이트는, 결정립 구조 설계와 결함제어를 통해 ~100%의 광 변환효율을 구현하는 뛰어난 색 변환 물질이며, 리간드와 계면 맞춤형 전하주입/수송층 개발과 함께 고효율 자발광 디스플레이로 거듭날 수 있었다. 여기에는 전 세계 연구자들의 협력과 경쟁이 있었지만, 그중 한국에서 서울대학교 이태우 교수팀을 중심으로 이루어진 초기 연구를 발판 삼아, 세계 최고의 효율과 수명을 달성한 성과가 크게 이바지했음에 이견이 없다.

하지만 페로브스카이트 디스플레이가 상용화되기까지는 아직 몇 가지 기술적 도전과제가 남아 있다. 현시점 자발광 디스플레이에서 가장 주된 과제는 구동 수명이며, 앞으로 상용화의 가능성을 입증하기 위해 학계가 집중해서 해쳐나가야 하는 주된 문제이다. 그 이후에는 고해상도 픽셀을 제작하기 위한 고도의 패터닝 공정이 요구될 것이다. 이러한 기술적 과제를 해결하기 위하여 학계와 산업계의 긴밀한 협력과 연구 생태계 구축이 필수적이다. 이러한 연구들은 고도로 복합화된 상위 기술로서, 연구자들 사이의 더욱 기술적인 교류와 협력이 강조됨이 분명하다. 따라서 정부는 연구자들 간의 집단연구용 협력 체계와 공동 인프라 구축을 위한 대규모 지원이 필요할 것이다. 또한 정부는 상용화 단계의 중간 연구를 지원하는 정책적 노력을 강화해야 하며, 이를 통해 지속 가능한 연구 협력 체계를 조성해야 한다.

페로브스카이트가 색 변환 필름으로서 사용되는 경우, 그 기술의 수준은 상당히 높은 수준으로 올라왔으며, 국내를 포함한 전 세계의 디스플레이 관련 업체들이 상용화를 시도하고 있다. 이에 산업계와 정부에서는 페로브스카이트 색 변환 필름에 대한 기술을 성숙시키고, 빠르게 시장을 선점할 수 있도록 국내 공급망을 구축하고, 시장 주도권을 확보 및 시장 확대를 추진해야 한다.

지난 10년간, 한국의 연구진은 페로브스카이트 디스플레이 분야에서 정부의 지원을 받아 세계를 선도하는 뛰어난 연구 성과를 달성하였다. 이에 정부가 자발광 디스플레이 기술의 높은 난이도를 고려하여 지속적인 중장기적 R&D 투자를 진행한다면 학술적/상업적으로 뛰어난 결실을 맺을 수 있을 것으로 확신하며, 단기적으로는 페로브스카이트 색 변환 필름이 디스플레이 시장의 새로운 패러다임을 제시할 것으로 기대한다.

