



페로브스카이트 나노 결정의 환경 안정성 강화를 위한 캡슐화 전략에 대한 고찰

홍지우, 김성훈

동의대학교 응용화학과, Brain Busan 21 plus 센터

Encapsulation Strategies to Improve the Environmental Stability of Perovskite Nanocrystals

Jiwoo Hong and Sunghoon Kim

Center for Brain Busan 21 Plus Program, Department of Applied Chemistry, Dong-Eui University, Busan 47340, Korea

(Received May 8, 2025; Accepted May 21, 2025)

Abstract: Metal halide perovskite materials have emerged as promising candidates for next-generation optoelectronic applications owing to their outstanding optical properties and tunable emission characteristics. However, their practical application is hindered by poor environmental stability, especially under conditions of heat, moisture, and UV exposure, necessitating effective encapsulation strategies. This review summarizes recent progress in enhancing the environmental stability of perovskite nanocrystals through polymer matrix embedding, inorganic oxide encapsulation, and compositionally matched core-shell structures using homogenous perovskite derivatives. We discuss how polymers enhance the environmental and moisture stability of perovskite nanocrystals, how oxide-based shells (e.g., SiO₂, TiO₂) contribute to thermal robustness and barrier protection, and how homostructural core-shells provide lattice-matched defect passivation with improved long-term durability. A comprehensive understanding of the advantages and limitations of each encapsulation strategy, along with their rational integration, can accelerate the commercialization of perovskite-based technologies in various applications such as high-color-purity displays, color conversion filters, and flexible optoelectronic devices.

Keywords: Perovskite, Environmental stability, Encapsulation

1. 서론

지난 10년 동안, 금속 할라이드 페로브스카이트(MHP)는 뛰어난 광학적 및 전기적 특성으로 인해 차세대 광전자 소재로서 큰 주목을 받아, 발광 다이오드(LED), 태양전지, 그리고 X선 및 감마선 검출기 등 다양한 응용 분야에 광범위하게 활용되어 왔다 [1-5]. 일반적으로 MHP는 ABX₃ 결정 구조를 가지며, A는 일가 양이온(Cs⁺, MA⁺, FA⁺), B는 이가 금속 양이온(Pb²⁺, Sn²⁺), X는 할로젠 음이온(Cl⁻, Br⁻, I⁻)으로 구성된다 [그림 1(a)]. B-site 양이온은 여섯 개의 X-site 할로젠 이온과 결합하여 [BX₆]⁴⁻ 팔면체를 형성하고, 이 팔면체들이 3차원적으로 연결되며 전체 페로브스카이트 격자를 이루게 된다. MHP의 대표적인 장점 중 하나는 defect tolerance이다. 일반적인 반도체에서는 결정 내 결함이 밴드갭 내에 깊은 트랩 상태를 형성하여 성능을 저하시킬 수 있지만, MHP에서는 대부분의 결함이 밴드 엣지 부근에 위치한 얇은 준위(shallow state)를 형성하여 비방사성 재결합 손실을 효과적으로 억제할 수 있다 [6,7] [그

✉ Sunghoon Kim; hoon@deu.ac.kr

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

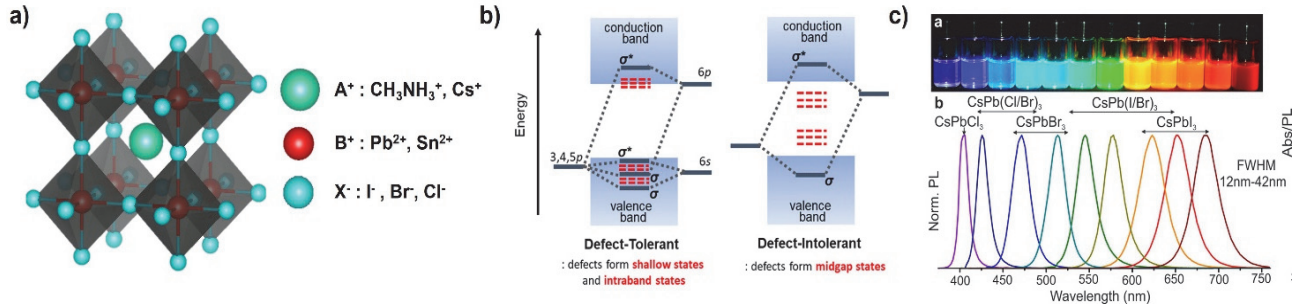


Fig. 1. (a) Schematic illustration of ABX_3 perovskite crystal structure, (b) energy level diagram comparing defect tolerant and defect-intolerant semiconductors shallow states vs. mid-gap states induced by defects [6], and (c) photoluminescence spectra of $CsPbX_3$ ($X = Cl, Br, I$) quantum dots with tunable emission (400–750 nm) and narrow FWHM (12–42 nm) [15].

림 1(b)]. 이러한 특성 덕분에 이론적으로 높은 광발광 양자효율(PLQY)과 우수한 광전자 성능이 기대된다. 그러나, 실제 발광 효율은 이론치에 미치지 못하는 경우가 많으며, 이는 주로 3차원(3D) 페로브스카이트 구조의 $CsPbX_3$ 에서 나타나는 낮은 엑시톤 결합 에너지 때문으로 해석된다 [8,9]. 코너를 공유하는 $[PbX_6]$ 팔면체 네트워크는 큰 밴드 분산과 낮은 유효질량을 가지고, 높은 유전율로 인해 전자와 정공 사이의 쿨롱 인력이 차폐되어진다 [10,11]. 이러한 특성은 낮은 엑시톤 결합 에너지(<50 meV)를 낮아지게 하며, 이는 엑시톤 해리를 촉진하고 자유전자-정공 쌍의 전하를 유도하게 된다 [12-14]. 이로 인해 자유전하는 결합 상태를 통해 비방사성 재결합 경로로 소멸될 가능성이 높아져, 결과적으로 발광 효율을 제한하는 요인으로 작용한다. 그럼에도 불구하고, MHP는 20 nm 이하의 매우 좁은 발광 반치폭(FWHM)을 나타내는 등 탁월한 색 재현성을 보유하고 있어, 고색순도 발광이 요구되는 디스플레이 응용 분야에서 높은 관심을 받고 있다 [15] [그림 1(c)]. 특히 RGB 파장 조절이 용이하고 넓은 색 영역을 구현할 수 있어, QD-OLED 및 μ -LED 기반 차세대 고색재현 디스플레이의 핵심 발광 소재로 각광받고 있다 [16-18].

지난 10년간, 발광 효율을 더욱 향상시키기 위해 다양한 구조 제어 전략들이 보고되어 왔다. 대표적으로, MHP를 엑시톤 결합 에너지가 높은 0차원 양자점(0D quantum dots) 구조 및 이차원(2D) 층상 구조를 도입하고, 추가적으로 결정립 크기 제어를 통한 전자와 정공의 공간적인 구속을 통해 재결합 경로를 억제하는 방법 등 다양한 전략이 보고되어, 이러한 크기, 차원에 기반한 접근은 결과적으로 발광 특성 향상에 기여한다 [19-21]. 그러나, 나노미터 크기의 구조는 본질적으로 열역학적 불안정성을 내포하며, 높은 비표면적에 기인한 dangling bond 형성은 표면 결함의 밀도를 증가시키고, 전체적인 구조 안정성 저하로 이

어질 수 있다 [22,23]. 특히, MHP는 이온성 격자 구조와 약한 Pb-X 결합 특성으로 인해 수분, 열, 빛 등 외부 자극에 매우 취약하며, 이로 인해 결정 생성, 상 분리 및 결정 구조 분해가 쉽게 발생하여 실용화를 위한 안정성 확보가 가장 큰 과제로 남아 있다 [24-28]. 이러한 안정성 문제를 해결하기 위해, 캡슐화(encapsulation) 및 도핑(doping) 등의 다양한 전략들이 활발히 연구되고 있다. 특히, 캡슐화 기술은 외부 환경으로부터 소재를 보호하는 동시에, 이온 이동의 억제, 기계적 내구성 향상과 같은 다양한 이점을 제공할 수 있다. 최근에는 화학적으로 불활성이며 차단성이 우수한 다양한 재료를 기반으로 한 캡슐화 전략이 주목받고 있다. 대표적으로 고분자 매트릭스, 실리카(SiO_2), 알루미늄(Al_2O_3), 제올라이트(Zeolite)와 같은 무기 재료뿐만 아니라, 페로브스카이트의 다른 결정상을 이용한 캡슐화 방식도 활발히 연구되고 있다. 본 논문에서는 MHP의 장기적 안정성 확보를 위한 다양한 캡슐화 전략을 체계적으로 고찰하고, 이들의 실제 응용 가능성과 향후 발전 방향에 대해 논의하고자 한다.

2. 안정성 향상을 위한 캡슐화 전략

2.1 고분자 매트릭스를 이용한 페로브스카이트 나노결정의 안정화 전략

고분자 기반 캡슐화 전략은 페로브스카이트 나노결정(PNCs)의 표면을 유기 고분자 재료로 안정화함으로써 공기 중 안정성, 수분 저항성, 그리고 기계적 유연성을 동시에 향상시킬 수 있는 접근법으로 주목받고 있다. 고분자 매트릭스는 나노결정 표면 결함을 효과적으로 패시베이션(passivation)하여 PLQY 향상에도 기여할 수 있다. 특히,

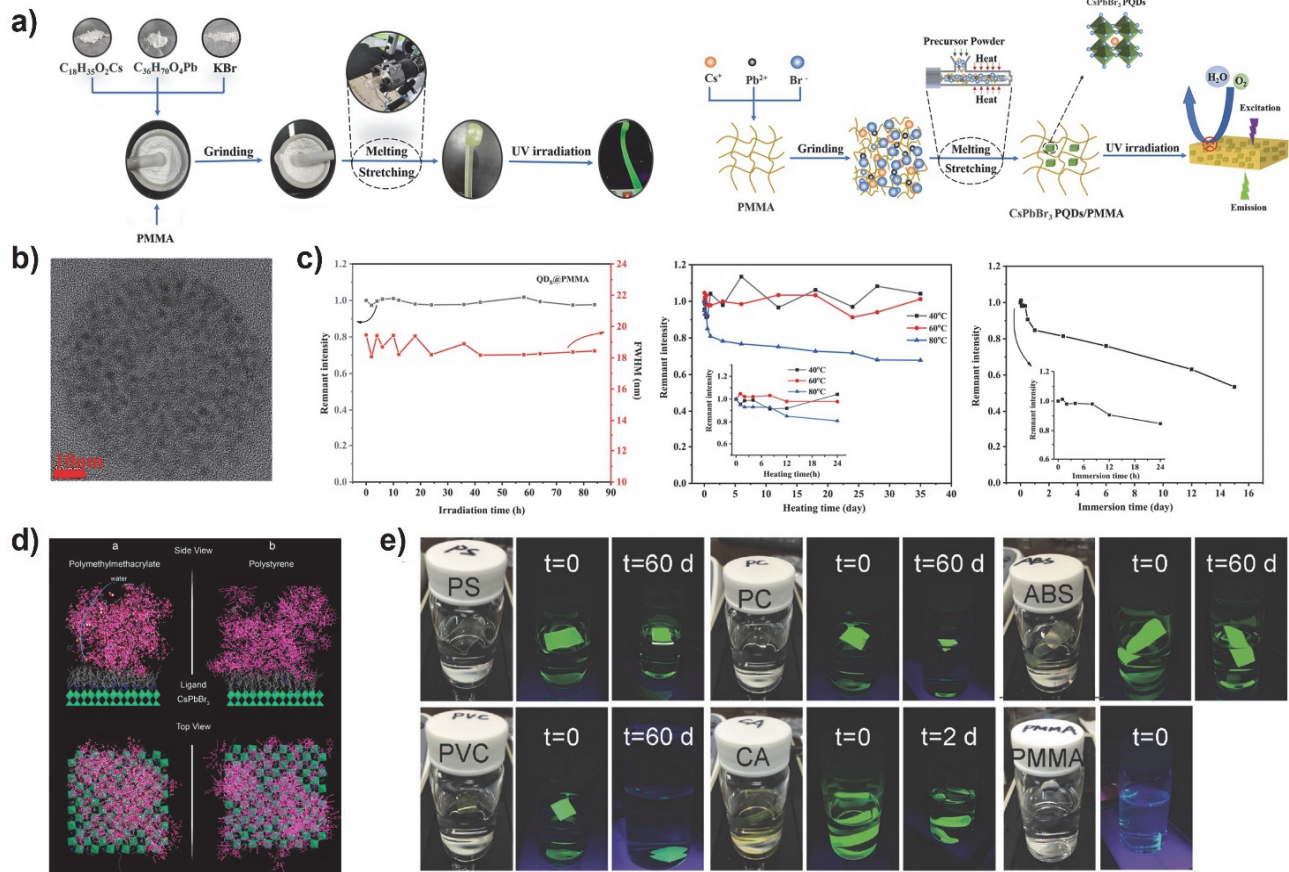


Fig. 2. (a) Schematic illustration of in situ crystallization of PQDs in a polymer matrix via the polymeric melt encapsulation method, (b) TEM image, (c) stability testing of CCK-2 wt% $CsPbBr_3$ PQDs/PMMA composite to 365 nm UV light irradiation, 40, 60, 80°C heat, and water [29], and (d) molecular mechanics simulations for the NC ligands–polymer interaction in the case of PMMA and PS. (e) Photographs taken under white light or UV irradiation at indicated time period. The composite film samples immersed in water are $MAPbBr_3/PS$, $MAPbBr_3/PC$, $MAPbBr_3/ABS$, $MAPbBr_3/PVC$, $MAPbBr_3/CA$, and $MAPbBr_3/PMMA$ [30,31].

유연 디스플레이 및 웨어러블 광전자 소자 등 차세대 응용을 고려할 때, 고분자 기반 캡슐화는 필수적인 안정화 전략으로 인식된다. 최근에는 용매를 사용하지 않는 용융 공정 (melt-processing)이 고분자 캡슐화 기술에 도입되어, 공정 단순화와 환경 안정성을 동시에 달성하는 방식으로 각광받고 있다. 대표적인 사례로, $CsPbBr_3$ QDs@PMMA 복합체는 Cs 및 Pb 전구체($CsOA$, CH_3COOCs , Cs_2CO_3 , $[CH_3(CH_2)_{16}COO]_2Pb$ 등), 브롬 전구체($PbBr_2$, KBr 등), 그리고 PMMA(97–99.75 wt%)를 혼합 및 분쇄 과정 후, 180–220°C에서 30분간 유지하며 200–800 rpm으로 교반하여 용융 반응을 유도하는 방식으로 제조되었다 [29] [그림 2(a)]. 이후 용융체를 냉각하고 압출한 후 분말화하여 균일한 복합체를 얻을 수 있었다. 해당 복합체는 365 nm, 20 W UV 조사 1일 후에도 PL 강도의 저하 없이 안정성을

유지하였고, 40°C 및 60°C 조건에서도 35일간 안정한 발광 특성을 나타냈다 [그림 2(c)]. 그러나 80°C에서는 24시간 후 PL 강도가 약 81%로 감소하였고, 35일 후에는 68%까지 저하되었다. 수분 안정성 측면에서도, 물에 담근 후 1일 경과 시 85%, 15일 후 53% 수준의 PL 유지율을 보였으며, 이는 기존의 용액 기반 합성 방식보다 우수한 결과로 평가된다.

반면, 유기 리간드로 캡핑된 PNCs에 PMMA를 적용한 경우, PS 기반 캡슐화에 비해 상대적으로 낮은 안정성을 보이는 결과도 보고되었다 [30] [그림 2(d)]. 이는 PMMA의 극성 에스터기가 소수성 유기 리간드와의 계면 친화도를 저해하여, 나노결정 표면을 불안정하게 덮기 때문이며, 결과적으로 수분·열에 대한 보호 효과가 제한되어 열화에 더욱 취약해지는 문제를 유발한다. 실제로, $MAPbBr_3/PS$,

PC, PVC, ABS 등의 복합 필름은 공기 중 5개월 노출 시에도 PL 저하가 없었고, 물에 2개월 담구어도 PLQY 저하가 7% 미만으로 유지되었다 [31] [그림 2(e)]. 반면, MAPbBr₃/PMMA는 수중에 넣자마자 표면 결정이 탈리되어 발광 효율이 급감하였다. 따라서, 고분자-PNCs 간의 계면 상호작용, 즉 고분자 매트릭스의 화학적 구조와 표면 리간드 간의 상호 작용성은 캡슐화의 효율성과 안정성을 결정짓는 핵심 요소이다. 향후에는 고분자 재료의 선택뿐 아니라, 리간드 구조 조절 또는 계면 조화성이 뛰어난 새로운 고분자 설계가 장기 안정성 확보를 위한 핵심 전략으로 부상할 것으로 기대된다.

2.2 금속 산화물을 이용한 캡슐화 전략

고분자 기반 캡슐화 전략이 수분 저항성과 유연성을 제 공함에도 불구하고, 고분자 자체가 가지는 열적 불안정성은 고온 환경에서의 구조 유지 및 발광 안정성 확보에 한계를 초래할 수 있다. 특히 대부분의 일반적인 고분자 매트릭스는 80-100°C 이상의 온도에서 열화를 야기할 수 있다. 이에 대안 방안으로 무기 물질의 높은 열적, 화학적 안정성을 이용하여 장기 내구성을 확보할 수 있다. 특히 SiO₂, Al₂O₃와 같은 산화물의 무기 재료는 구조적으로 견고하며, 고온·고습 환경에서도 발광 특성을 유지할 수 있다는 점에서 유기물 기반 캡슐화보다 상대적으로 우수한 환경 안정성 특성을 보인다. 기존의 무기물 기반 캡슐화 전략은 다음과 같은 한계를 가진다: (1) 다공성 매트릭스의 불완전한 차단 특성, (2) 불안정한 무기염의 전구체 사용, (3) 산화물 셸의 낮은 밀도와 핀홀(pinhole) 형성으로 인한 수분 및 산소(H₂O/O₂)의 침투가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 최근에는 MCM-41 기반 다공성 템플릿과 고온 in-situ 캡슐화 공정이 주목받고 있다 [32]. 해당 공정은 CsBr 및 PbBr₂ 전구체 용액을 다공성 실리카 매트릭스에 주입한 후 600-900°C의 고온에서 열처리를 수행한다 [그림 3(a)]. 이 과정에서 약 567°C의 녹는점을 갖는 CsPbBr₃는 템플릿 기공 내에서 용융 및 승화되며 결정화되고, 동시에 매트릭스 구조는 부분적으로 붕괴되어 SiO₂ 내부에 CsPbBr₃ 나노결정을 고밀도로 포집하는 구조가 형성된다. 형성된 복합체는 실제 청색 LED 구동(1000 h) 및 고온·고습 환경(85°C/85% RH, 168 h)에서도 초기 발광 세기 손실 없이 우수한 작동 안정성을 나타내었으며, 기존 상용 세라믹 형광체 대비 탁월한 내환경 특성을 입증하였다 [그림 3(b)]. 그러나 이러한 다공성 기반 캡슐화 전략은 600°C 이상의 비교적 높은 공정 온도를 요구하므로, 열에 민감한 유무기 하이브리드 구조에는 적용에 제한이 따른다. 따라서, 보다 저온

에서 구현 가능한 캡슐화 공정의 개발과 최적화가 향후 해결해야 할 중요한 과제로 남아 있다. 이에 따라, 이미 합성된 Al₂O₃와 CsPbBr₃ 복합 분말을 직접 박막으로 제작하여 저온 공정을 실현한 연구사례도 보고되었다. 이 연구에서는 aerosol deposition (AD) 공정이 사용되었으며, 특히, 초기 에어로졸 운반 입자는 운송 가스를 통해 기판에 먼저 부착되며, 이어서 도달하는 CsPbBr₃ 및 Al₂O₃ 입자들이 표면에 골고루 매립되듯 응착됨으로써, 결과적으로 CsPbBr₃가 Al₂O₃ 매트릭스 내에 분산 포획된 구조를 형성한다 [그림 3(c)]. 이와 같이 성막화와 캡슐화가 동시에 이루어지는 간단한 단일 공정을 통해 복잡한 후처리 없이도 페로브스카이트의 안정성을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 실제 형성된 박막은 150°C에서 20일간 유지되는 열처리 조건 하에서도 PLQY가 유지 및 초기 발광 파장(521 nm)은 20일 후에도 522 nm로 유지되며 발광 특성의 변화가 거의 없었다 [그림 3(d)]. 이는 열적 스트레스 하에서도 구조적 및 광학적 안정성이 유지되었음을 의미한다. 이 결과는 Al₂O₃가 외부 환경으로부터 CsPbBr₃를 효과적으로 보호함으로써 무기 매트릭스를 활용한 간접적 캡슐화 효과를 나타낸 대표적 사례로 해석될 수 있다. 추가적으로, 최근에는 저온에서 합성이 가능한 페로브스카이트 나노입자의 core-shell 구조를 형성하는 기술들이 보고되었다. core-shell 구조는 단순한 물리적 보호 기능을 넘어, 계면 전하 이동 조절, 광반응성 제어 등 기능적 설계가 가능한 플랫폼으로 소개되었다. 특히 금속 산화물 기반의 셸 형성은 콜로이드 상태에서 수분 안정성과 구조적 일관성을 유지할 수 있어, 수용액 기반 광전자 소자 및 광촉매 응용으로의 확장 가능성을 제시한다. 예를 들어, 콜로이드 상태의 CsPbBr₃ 나노결정 용액에 TBOT (titanium butoxide)을 첨가하고, 25°C 및 30% RH 조건에서 가수분해한 후 300°C에서 5시간 열처리하여 CsPbBr₃@TiO₂ core-shell 구조가 성공적으로 합성되었다 [그림 3(e)]. 해당 구조는 UV 조사 조건에서도 24시간 후 초기 발광 강도의 약 75%를 유지하며, 뛰어난 광안정성을 보였다 [그림 3(f)]. 더불어, 초순수(Milli-Q water) 환경에서도 12주 이상 발광 강도, 방출 파장, 형태 및 구조의 변화가 관찰되지 않아, 탁월한 수분 안정성이 확인되었다. 이는 TiO₂ shell이 외부 수분, 광선, 이온 침투를 효과적으로 차단함을 입증하는 결과이다. 이러한 core-shell 전략은 열처리 온도, shell 형성 방식 및 전구체 종류에 따라 다양한 방식으로 분류될 수 있으며, 대표적으로 TiO₂, Al₂O₃, ZnS, SiO₂ 등의 재료가 셸로 활용되어 왔다. 각 셸 재료는 유전율, 광투과율, 계면 안정성 등에서 상이한 특성을 가지므로, 목표 응용 분야에 따른 선택이 필요하다.

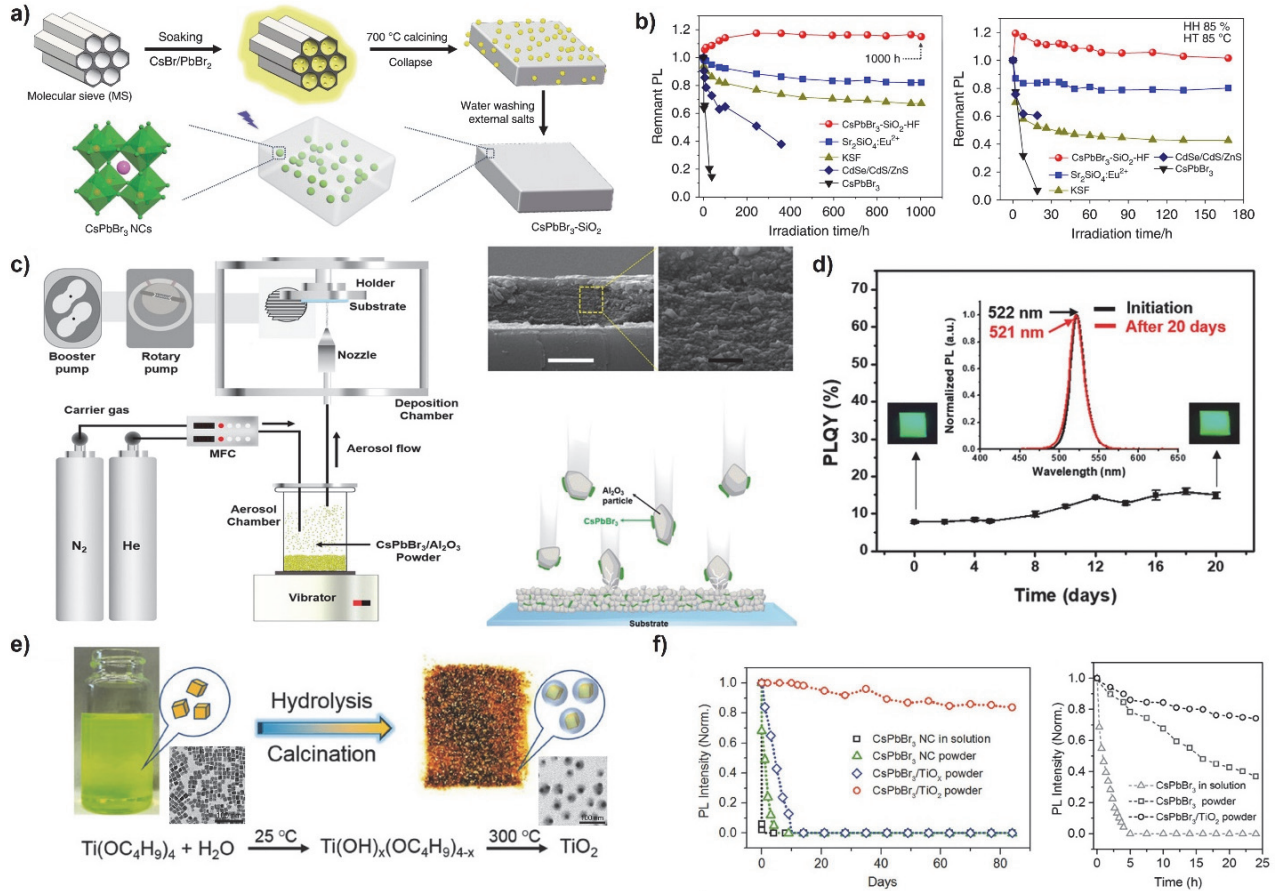


Fig. 3. (a) Schematic illustration of CsPbBr₃@SiO₂ nanocomposite synthesis via molecular sieve templating and high-temperature calcination (700 °C), followed by water washing to remove external salts, (b) photostability of the CsPbBr₃-SiO₂-HF, ceramic Sr₂SiO₄:Eu²⁺ green phosphor, KSF red phosphor, colloidal CsPbBr₃ NCs and CdSe/CdS/ZnS NCs under illumination, sealed with Norland-61 on the LED chips (20 mA, 2.7 V) [32], (c) schematic illustration of aerosol deposition system, cross-section and magnified images of three samples corresponding by SEM, scale bar (white line) 5 μm and (black line) 1 μm and film growth mechanism for three AD films, (d) long-term thermal stability of CsPbBr₃/Al₂O₃ deposited films under N₂ and PTFE at 150 °C for 20 day [33], (e) schematic illustration of the fabrication process for the TiO₂ coated CsPbBr₃/TiO₂ core-shell NCs; TEM images, and (f) the relative PL intensity of CsPbBr₃ NCs (without precipitation), dried CsPbBr₃ NC powder, CsPbBr₃/TiO₂ powder, and CsPbBr₃/TiO₂ NC powder after immersing in Milli-Q water and photostability [34].

2.3 동족 페로브스카이트 기반의 격자 정합 코어-셸 구조

금속 산화물이나 고분자와 같은 조성이 상이한 외부 물질 대신, 동족 페로브스카이트 유도체를 셸로 적용한 core-shell 구조는 더욱 적합한 캡슐화 전략으로 제시된다. 이러한 구조는 코어와 셸 간 조성이 유사하여 격자 정합성(lattice matching)이 우수하고, 계면 결함의 발생을 최소화할 수 있어 우수한 광학 및 환경 안정성을 동시에 확보할 수 있다. 대표적으로 CsPbBr₃/CsPb₂Br₅ 또는 CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆와 같은 구조는 코어-셸 간의 계면에

서 결정 격자가 잘 맞물려 안정적인 에피택시얼 성장(epitaxial growth)이 가능하다. 특히, 셸 물질로 사용되는 Cs₄PbBr₆ 및 CsPb₂Br₅는 상대적으로 안정한 결정 구조를 가지며, 외부 수분의 침투를 효과적으로 차단하여 코어의 열화 방지에 기여한다. 예를 들어, CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ 복합체는 1.0 mmol의 PbBr₂와 4.0 mmol의 CsBr을 2.5 mL DMSO에 혼합한 후, 동일한 조건의 8개 유리 바이알에 나누어 담고 고속 자동 솔더 페이스트 믹서를 이용하여 1시간 동안 분쇄함으로써 합성되었다 [35]. 생성된 고체 분말은 진공 여과 장치를 통해 수거되었으며, 이 과정에서 사용된 DMSO는 CsPbBr₃ 결정의 발광 특성을 유지하기 위한

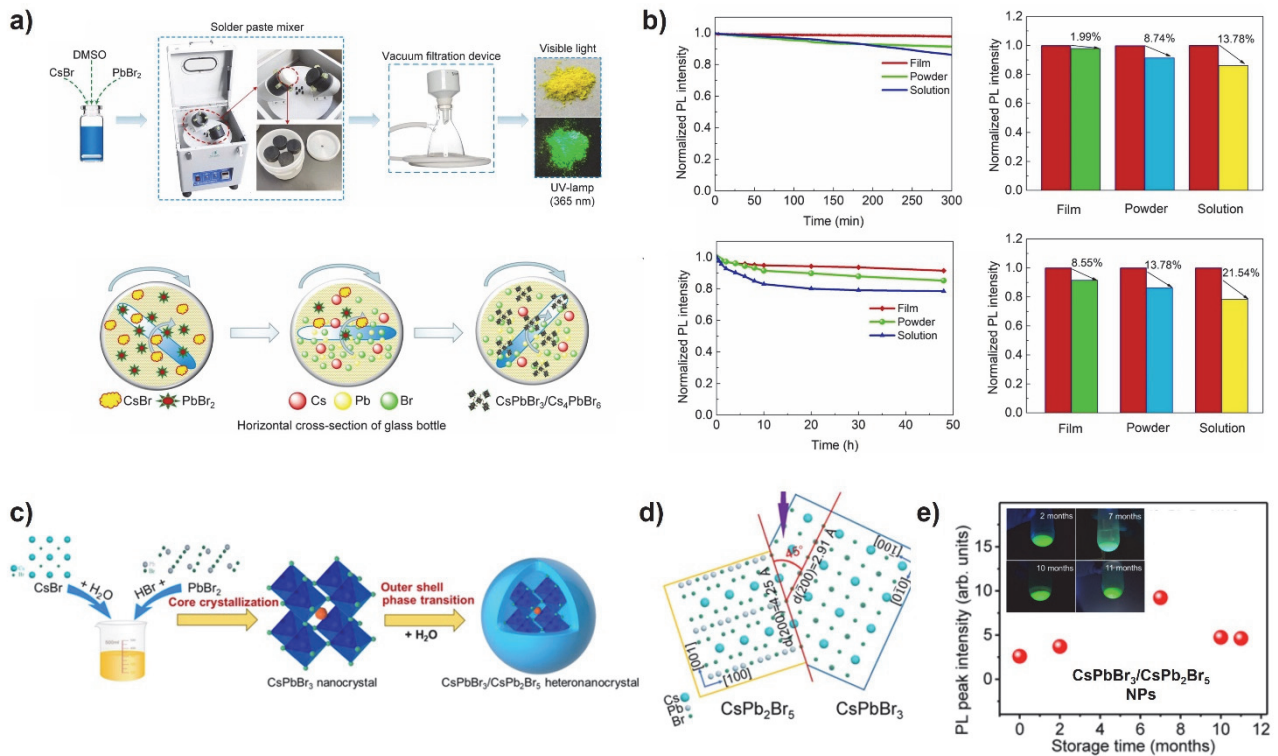


Fig. 4. (a) Schematic illustration of the preparation of CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ microcrystals using a high-speed mechanical mixing method, and the working principle of the automatic solder paste mixer, where the raw materials inside a single glass vial experience both the rotational motion of the mixer and the stirring motion of the internal stir bar during centrifugal operation, (b) thermostability and photostability of CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ microcrystals evaluated at 80°C and under continuous UV (365 nm) illumination, respectively, in different physical states (film, powder, and solution); normalized PL intensities are compared to assess environmental robustness [35], (c) schematic diagram showing the synthesis strategy of the CsPbBr₃/CsPb₂Br₅ core-shell HNC, (d) lattice matching relation at the interface of the CsPbBr₃/CsPb₂Br₅ core-shell HNC, and (e) PL peak intensity versus storage time for the CsPbBr₃/CsPb₂Br₅ HNC powder immersed in water. (d) Corresponding luminescence photos taken under 365 nm excitation [36].

핵심적인 용매 역할을 수행하는 것으로 확인되었다 [그림 4(a)]. 이렇게 제조된 CsPbBr₃/Cs₄PbBr₆ 복합체는 우수한 열적 및 광학적 안정성을 보였다. 필름 상태에서 80°C에서 300분간 열처리한 후에도 PL 강도는 1.99%만 감소하였고, 분말 및 용액 상태에서도 각각 8.74% 및 13.78%의 감소율을 보여 고온 조건에서도 탁월한 안정성을 유지하였다. 또한, 365 nm 자외선 조사(50시간) 후에도 필름, 분말, 용액에서 각각 91.45%, 86.22%, 78.46%의 PL 강도를 유지하며, 구조적·광학적 안정성을 동시에 확보할 수 있음을 입증하였다 [그림 4(b)]. 다른 대표적인 예로, CsPbBr₃/CsPb₂Br₅ core-shell 나노결정은 HBr에 용해된 PbBr₂와 소량의 물에 용해된 CsBr을 반응시켜 주황색 분말 형태의 CsPbBr₃ NCs를 합성하고, 이를 다량의 탈이온수에 교반함으로써 표면의 CsBr이 용출되며 자발적으로 CsPb₂Br₅로 상전이되어 셸이 형성된다 [그림 4(c)]. 결정학적 분석

에 따르면, CsPbBr₃와 CsPb₂Br₅ 간의 계면은 (110), (200) 평면이 약 45°로 정합되며, 격자 상수 차이가 약 2.9%에 불과해 에피택시얼 성장에 유리하다 [그림 4(d)]. 이러한 격자 정합성은 셸의 안정적 성장뿐만 아니라 장기적인 구조 및 발광 안정성에도 긍정적인 영향을 준다. 실제 열 안정성 평가 결과, CsPbBr₃/CsPb₂Br₅ 복합체는 필름 상태에서 80°C에서 300분 동안 유지한 후에도 초기 PL 세기 대비 1.99%만 감소하는 우수한 내열성을 보였고, 자외선 조사 후에도 높은 PL 유지율을 나타냈다. 실제로, 해당 구조는 11개월간의 장기 보관 후에도 강한 발광을 유지하며 탁월한 저장 안정성을 보였다 [그림 4(e)]. 이러한 결과들은 동족 페로브스카이트 유도체를 셸로 사용하는 core-shell 구조가 외부 자극에 취약한 CsPbBr₃ 나노결정의 고질적인 안정성 문제를 효과적으로 극복할 수 있는 전략임을 입증한다. 향후 연구에서는 다음과 같은 방향성이 중요하게 고

려될 것으로 예상된다. 첫째, 다양한 동족 결정상 조합에 대한 격자 정합성 분석과 계면 전하 이동 거동에 대한 이해가 심화되어야 하며, 이를 통해 구조적 안정성과 발광 효율 간의 상관관계를 체계적으로 규명할 필요가 있다. 이와 관련하여, CsPb₂Br₅ 및 Cs₄PbBr₆와 같은 동족 페로브스카이트 유도체들이 CsPbBr₃와 함께 존재할 때 발광 특성에 긍정적 영향을 미친다는 보고도 있는 반면, 이들이 비발광성 상으로 작용하여 광효율을 저해한다는 상반된 해석 또한 존재한다. 따라서, 이들 구조 간의 상호작용 및 에너지 전달 메커니즘에 대한 정밀한 계면 분석과 이론적 해석이 병행되어야 한다.

MHPs는 좁은 발광 반치폭(FWHM), 높은 색 순도, 조성 및 파장 조절의 용이성 등 우수한 광학적 특성으로 차세대 광전자소자, 디스플레이, 조명 기술의 핵심 소재로 주목받고 있다. 그러나 이온성 격자 구조에서 기인하는 낮은 열적·화학적 안정성으로 인해, 외부 환경(수분, 산소, 자외선, 열)에 노출 시 급격한 성능 저하 및 구조 붕괴가 발생하는 근본적인 한계를 가진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 캡슐화 전략이 고안되어 왔으며, 본 논문에서는 이를 크게 유기 고분자, 금속 산화물, 그리고 동족 페로브스카이트 기반의 core-shell 구조로 분류하여 고찰하였다. 고분자 캡슐화 전략은 우수한 가공성과 기계적 유연성의 장점으로 인해 웨어러블 디바이스 및 플렉시블 디스플레이와 같은 차세대 유연 소자 응용에 적합하다 [37,38]. 특히, melt-processing과 같은 용매 없는 공정은 친환경성과 제조 공정의 단순화 측면에서 주목받고 있다. 그러나 고분자-나노결정 간 계면 친화도 부족, 장기적인 광안정성 확보의 어려움, 열적 내성의 한계 등은 여전히 해결이 필요한 과제로 남아 있다. 향후에는 리간드와의 계면 상호작용을 최적화하거나 기능성 고내열 고분자를 도입하는 방식의 보완이 요구된다. 또한, 무기소재를 이용한 캡슐화 전략은 SiO₂, TiO₂, Al₂O₃ 등과 같은 화학적·열적으로 안정한 산화물을 활용하여 외부 수분 및 산소의 침투를 효과적으로 차단하고, 장기적인 내환경 안정성을 확보하는 데 유리하다. 특히, 다공성 템플릿을 이용한 고온 열처리 공정이나 in-situ 산화물 shell 형성 방법은 우수한 밀폐성과 열적 내구성을 제공한다. 그러나 고온 공정에 따른 열 손상 가능성, 셸 내 편향 결함 형성 등은 여전히 극복해야 할 기술적 과제로 남아 있다. 마지막으로 동족 페로브스카이트 유도체를 활용한 core-shell 구조는 조성 및 결정 구조의 유사성에 기반하여 코어와 셸 간의 격자 정합성을 확보할 수 있어, 계면 결함 형성을 최소화하면서도 발광 특성을 유지하는 데 유리하다. CsPb₂Br₅, Cs₄PbBr₆ 등은 shell로 적용되었을 때, core의 표면 결함을 방지하고 외부 자극으로부터

의 보호 효과를 동시에 제공할 수 있다. 그러나 이들 shell이 실제로 발광에 기여하는지 혹은 비활성 상으로 작용하는지에 대해서는 여전히 학계에서 논의가 진행 중이며, 향후 정밀한 계면 분석과 전하 이동 메커니즘에 대한 규명이 필요하다. 종합적으로 볼 때, 캡슐화는 단순한 보호 층 기능을 넘어, 페로브스카이트의 구조적 안정성과 광전자 특성을 동시에 제어하는 핵심 설계 인자로 부각되고 있다. 각 전략의 장단점을 이해하고 적절히 조합하는 통합적 접근은 향후 고 색재현 디스플레이, 컬러 컨버전 필터, 플렉시블 디스플레이 등 다양한 응용에서의 상용화를 가속화할 수 있을 것이다.

ORCID

Sunghoon Kim

<https://orcid.org/0000-0003-2098-5962>

REFERENCES

- [1] S. Kim, S. Kang, S. Baek, J. Song, N. E. Mun, H. Kwon, H. G. Kwon, Y. J. Pu, T. W. Lee, S. Yoo, J. M. Oh, J. Park, and S. W. Kim, *Chem. Eng. J.*, **441**, 135991 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135991>
- [2] Y. He, L. Matei, H. J. Jung, K. M. McCall, M. Chen, C. C. Stoumpos, Z. Liu, J. A. Peters, D. Y. Chung, B. W. Wessels, M. R. Wasielewski, V. P. Dravid, A. Burger, and M. G. Kanatzidis, *Nat. Commun.*, **9**, 1609 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04073-3>
- [3] Q. Lin, A. Armin, R.C.R. Nagiri, P. L. Burn, and P. Meredith, *Nat. Photonics*, **9**, 106 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1038/NPHOTON.2014.284>
- [4] H. Wei, Y. Fang, P. Mulligan, W. Chuirazzi, H. H. Fang, C. Wang, B. R. Ecker, Y. Gao, M. A. Loi, L. Cao, and J. Huang, *Nat. Photonics*, **10**, 333 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.41>
- [5] G. Pacchioni, *Nat. Rev. Mater.*, **6**, 108 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00280-5>
- [6] J. Sun, J. Yang, J. I. Lee, J. H. Cho, and M. S. Kang, *J. Phys. Chem. Lett.*, **9**, 1573 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.8b00301>
- [7] H. Huang, M. I. Bodnarchuk, S. V. Kershaw, M. V. Kovalenko, and A. L. Rogach, *ACS Energy Lett.*, **2**, 2071 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.7b00547>
- [8] K. Zheng, Q. Zhu, M. Abdellah, M. E. Messing, W. Zhang, A. Generalov, Y. Niu, L. Ribaud, S. E. Canton, and T. Pullerits, *J. Phys. Chem. Lett.*, **6**, 2969 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.5b01252>
- [9] M. D. Birowosuto, D. Cortecchia, W. Drozdowski, K. Brylew,

- W. Lachmanski, A. Bruno, and C. Soci, *Sci. Rep.*, **6**, 37254 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1038/srep37254>
- [10] K. Galkowski, A. Mitioglu, A. Miyata, P. Plochocka, O. Portugall, G. E. Eperon, J.T.W. Wang, T. Stergiopoulos, S. D. Stranks, H. J. Snaith, and R. J. Nicholas, *Energy Environ. Sci.*, **9**, 962 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1039/C5EE03435C>
- [11] Z. Yang, A. Surrente, K. Galkowski, N. Bruyant, D. K. Maude, A. A. Haghighirad, H. J. Snaith, P. Plochocka, and R. J. Nicholas, *J. Phys. Chem. Lett.*, **8**, 1851 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.7b00524>
- [12] M. I. Saidaminov, J. Almutlaq, S. Sarmah, I. Dursun, A. A. Zhumekenov, R. Begum, J. Pan, N. Cho, O. F. Mohammed, and O. M. Bakr, *ACS Energy Lett.*, **1**, 840 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.6b00396>
- [13] V. D'Innocenzo, G. Grancini, M.J.P. Alcocer, A.R.S. Kandada, S. D. Stranks, M. M. Lee, G. Lanzani, H. J. Snaith, and A. Petrozza, *Nat. Commun.*, **5**, 3586 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1038/ncomms4586>
- [14] A. Miyata, A. Mitioglu, P. Plochocka, O. Portugall, J.T.W. Wang, S. D. Stranks, H. J. Snaith, and R. J. Nicholas, *Nat. Phys.*, **11**, 582 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1038/nphys3357>
- [15] L. Protesescu, S. Yakunin, M. I. Bodnarchuk, F. Krieg, R. Caputo, C. H. Hendon, R. X. Yang, A. Walsh, and M. V. Kovalenko, *Nano Lett.*, **15**, 3692 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1021/nl5048779>
- [16] M. Meyns, M. Perálvarez, A. Heuer-Jungemann, W. Hertog, M. Ibáñez, R. Nafria, A. Genç, J. Arbiol, M. V. Kovalenko, J. Carreras, A. Cabot, and A. G. Kanaras, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **8**, 19579 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.6b02529>
- [17] J. He, H. Chen, H. Chen, Y. Wang, S. T. Wu, and Y. Dong, *Opt. Express*, **25**, 12915 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1364/OE.25.012915>
- [18] Y. Yin, Z. Hu, M. U. Ali, M. Duan, L. Gao, M. Liu, W. Peng, J. Geng, S. Pan, Y. Wu, J. Hou, J. Fan, D. Li, X. Zhang, and H. Meng, *Adv. Mater. Technol.*, **5**, 2000251 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1002/admt.202000251>
- [19] S. Yuan, Z. K. Wang, M. P. Zhuo, Q. S. Tian, Y. Jin, and L. S. Liao, *ACS Nano*, **12**, 9541 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b05185>
- [20] Z. Yang, M. Wang, H. Qiu, X. Yao, X. Lao, S. Xu, Z. Lin, L. Sun, and J. Shao, *Adv. Funct. Mater.*, **28**, 1705908 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201705908>
- [21] P. Pang, G. Jin, C. Liang, B. Wang, W. Xiang, D. Zhang, J. Xu, W. Hong, Z. Xiao, L. Wang, G. Xing, J. Chen, and D. Ma, *ACS Nano*, **14**, 11420 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c03765>
- [22] F. Ma and K. W. Xu, *Surf. Interface Anal.*, **39**, 611 (2007).
doi: <https://doi.org/10.1002/sia.2562>
- [23] L. Xu, H. W. Liang, Y. Yang, and S. H. Yu, *Chem. Rev.*, **118**, 3209 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00208>
- [24] E. J. Juarez-Perez, Z. Hawash, S. R. Raga, L. K. Ono, and Y. Qi, *Energy Environ. Sci.*, **9**, 3406 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1039/C6EE02016J>
- [25] N. Aristidou, C. Eames, I. Sanchez-Molina, X. Bu, J. Kosco, M. S. Islam, and S. A. Haque, *Nat. Commun.*, **8**, 15218 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1038/ncomms15218>
- [26] N. Aristidou, I. Sanchez-Molina, T. Chotchuangchutchaval, M. Brown, L. Martinez, T. Rath, and S. A. Haque, *Angew. Chem.*, **127**, 8326 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1002/ange.201503153>
- [27] H. Cho, Y. H. Kim, C. Wolf, H. D. Lee, and T. W. Lee, *Adv. Mater.*, **30**, 1704587 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201704587>
- [28] B. Brunetti, C. Cavallo, A. Ciccioni, G. Gigli, and A. Latini, *Sci. Rep.*, **6**, 31896 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1038/srep31896>
- [29] Z. Wang, R. Fu, F. Li, H. Xie, P. He, Q. Sha, Z. Tang, N. Wang, and H. Zhong, *Adv. Funct. Mater.*, **31**, 2010009 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202010009>
- [30] G. Rainò, A. Landuyt, F. Krieg, C. Bernasconi, S. T. Ochsenbein, D. N. Dirin, M. I. Bodnarchuk, and M. V. Kovalenko, *Nano Lett.*, **19**, 3648 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b00689>
- [31] Y. Wang, J. He, H. Chen, J. Chen, R. Zhu, P. Ma, A. Towers, Y. Lin, A. J. Gesquiere, S. T. Wu, and Y. Dong, *Adv. Mater.*, **28**, 10710 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201603964>
- [32] Q. Zhang, B. Wang, W. Zheng, L. Kong, Q. Wan, C. Zhang, Z. Li, X. Cao, M. Liu, and L. Li, *Nat. Commun.*, **11**, 31 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13881-0>
- [33] S. Kim, M. Y. Cho, I. S. Kim, W. J. Kim, S. H. Park, S. Baek, J. M. Oh, and S. W. Kim, *Adv. Mater. Interfaces*, **6**, 1900359 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1002/admi.201900359>
- [34] Z. J. Li, E. Hofman, J. Li, A. H. Davis, C. H. Tung, L. Z. Wu, and W. Zheng, *Adv. Funct. Mater.*, **28**, 1704288 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201704288>
- [35] L. Rao, Q. Zhang, B. Sun, M. Wen, J. Zhang, S. Yu, T. Fu, and X. Niu, *J. Alloys Compd.*, **919**, 165857 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165857>
- [36] T. Liang, W. Liu, X. Liu, Y. Li, W. Wu, and J. Fan, *Chem. Mater.*, **33**, 4948 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.1c00542>
- [37] D. Kim and M. K. Choi, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **35**, 547 (2022).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.6.2>
- [38] H. G. Park and J. Yang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **37**, 519 (2024).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.5.8>