



High-efficiency, long-lived lead-free perovskite light-emitting diodes

Science · 10.1126/science.aeg8955

1. 한 줄 요약

Sn계 무연 페로브스카이트 LED의 열화 원인을 과도한 정공 주입에 의한 전기화학적 Sn^{2+} 산화와 CsSnI_3 로의 비가역 상전리로 규명하고, 포름아미딘(FA) 도핑과 트리페닐포스핀 옥사이드(TPPO) 표면 개질을 결합한 양면(dual-side) 최적화로 근적외 CsSnI_3 PeLED에서 21.2% EQE와 920.5시간 반감수명을 달성한 연구이다. Science에 게재된 이 결과는 무연 PeLED의 효율·수명 병목을 동시에 돌파한 사례로 제시된다.

2. 연구 배경

할라이드 페로브스카이트 LED는 용액공정성과 좁은 발광 반치폭 등으로 주목받아 왔으나, 고효율 소자 대부분이 납(Pb) 기반이어서 독성 규제와 상용화 측면의 부담이 있다. Sn 할라이드 페로브스카이트는 저독성 대안이면서 밴드갭이 좁아 근적외(NIR) 발광에 적합하지만, Sn^{2+} 의 쉬운 산화와 빠른 결정화에 따른 결함으로 효율과 안정성이 모두 낮았다. 특히 구동 중 열화 메커니즘이 명확히 규명되지 않아 개선이 경험적 수준에 머물렀다는 점이 본 연구의 출발점이다. 참고문헌에서도 알칼리/다가 금속염 공학 등 Sn계 PeLED 안정화 시도가 이어져 왔음이 확인된다.

3. 핵심 기여

첫째, CsSnI_3 PeLED의 전계발광 실패 원인을 "과잉 정공 주입이 촉발한 전기화학적 Sn^{2+} 산화 및 CsSnI_3 로의 비가역 상전이"로 특정하여, 단순 대기 중 산화가 아닌 구동 조건 하 열화 경로를 제시했다. 둘째, 격자 안정화를 위한 FA 도핑(벌크 측)과 비발광 재결합 억제·전하 균형을 위한 TPPO 개질(계면 측)을 결합한 양면 최적화 전략을 제안했다. 셋째, 이를 통해 무연 소자로는 이례적인 21.2% EQE와 963 nm NIR 발광, $195.8 \text{ W sr}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 방사휘도를 동시에 구현했다. 넷째, 920.5시간의 동작 반감수명을 보고하여 무연 PeLED의 실사용 가능성을 크게 앞당겼다.

4. 재료·소자 구조

발광층은 CsSnI_3 기반 주석 할라이드 페로브스카이트이며, 포름아미딘(formamidine) 도핑으로 격자를 안정화하고 트리페닐포스핀 옥사이드(TPPO)로 표면/계면을 개질한 구성이다. TPPO의 P=O 배위기는 Sn 미배위 사이트 패시베이션과 전하 균형에 기여하는 것으로 초록에서 기술된다. 정공 주입 과잉이 열화의 주원인으로 지목된 만큼 정공수송층 선정 및 주입 장벽 설계가 핵심일 것으로 보이나, 구체적인 소자 적층 구조(HTL/ETL 재료, 두께, 전극, 첨가 농도)는 초록에 없어 원문 확인 필요하다. 발광 파장 963 nm의 NIR 영역이며, 용액공정 기반이라는 점만 명시되어 있다.

5. 주요 성능 수치

- 최대 외부양자효율(EQE): 21.2%
- 발광 피크 파장: 963 nm (근적외)
- 최대 방사휘도(radiance): $195.8 \text{ W sr}^{-1} \text{ m}^{-2}$
- 동작 반감수명(T50): 920.5시간 @ $7.1 \text{ W sr}^{-1} \text{ m}^{-2}$
- 소자 면적·구동전압·터온전압·EQE roll-off: 원문 확인 필요
- 대조군(미처리 CsSnI_3) 대비 개선 배수: 원문 확인 필요

6. 기존 기술과의 비교

기존 Sn계 PeLED는 EQE가 대체로 한 자릿수~십수 % 수준에 머물고 동작 수명이 수 시간~수십 시간대로 보고되어 왔으나(구체 비교치는 원문 확인 필요), 본 연구는 21.2% EQE와 920.5시간 T50으로 효율·수명을 동시에 끌어올렸다. 참고문헌의 알칼리/다가 금속염 첨가 전략이 주로 결정화·결함 제어에 초점을 둔 반면, 본 연구는 열화의 전기화학적

기원(정공 과잉 주입)을 규명하고 캐리어 균형까지 설계에 포함한 점이 차별적이다. 또한 벌크(FA 도핑)와 계면(TPPO)을 함께 다루는 양면 접근은 단일 첨가제 전략 대비 결합·상안정성·전하 균형을 동시 해결한다는 논리적 장점을 가진다. Pb 기반 NIR PeLED의 최고 성능과의 직접 비교는 초록에 없어 원문 확인 필요하다.

7. 산업 적용 가능성

963 nm NIR 발광은 근적외 분광·바이오센싱, 헬스케어 광원(PPG·산소포화도), 광통신·근접센서, 야간 감시 조명 등 비디스플레이 응용에 우선 적합하다. RoHS/REACH 등 납 규제 리스크를 회피할 수 있는 무연 조성이라는 점은 소비자 기기 탑재 관점에서 실질적 이점이다. 용액공정 기반이므로 잉크젯·슬롯다이 등 저비용 대면적 공정과의 정합성이 기대되나, 대면적 균일 코팅 및 수분·산소 차단 봉지 기술 검증이 필요하다. 다만 900시간대 수명은 산업 표준(수천~수만 시간)에는 미치지 못하므로 저휘도 간헐 구동 응용부터 진입하는 것이 현실적이다.

8. 한계와 남은 과제

반감수명 920.5시간은 $7.1 \text{ W sr}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 라는 비교적 낮은 방사휘도 조건에서 측정된 값으로, 고휘도 구동 시 가속 열화 정도와 가속계수(n)에 대한 데이터가 필요하다. Sn^{2+} 산화가 억제되었을 뿐 완전히 차단된 것은 아니므로 장기 저장 안정성, 열 스트레스, 대기 노출 하 신뢰성 검증이 남아 있다. 발광이 963 nm NIR에 국한되어 가시광 디스플레이 적용에는 조성·밴드갭 재설계가 필요하며, 이 경우 동일 전략의 유효성은 불확실하다. 또한 대면적 소자 스케일업, 재현성, EQE roll-off 특성, FA/TPPO 최적 농도 창(window) 등은 초록에 없어 원문 확인 필요하다.

9. 연관 논문

- W. Bai, T. Xuan, G. Ren, K. Song, H. Li, C. Hu, F. Mo, L. Wang, R.-J. Xie, "Data for: High-efficiency and longevity lead-free perovskite light-emitting diodes," Zenodo (2026) — 본 논문의 원천 데이터셋.
- "Enhancing efficiency and stability of tin halide perovskite light-emitting diodes via engineered alkali/multivalent metal salts" — Sn계 PeLED의 첨가제 기반 안정화 선행 연구로, 본 연구의 도핑 전략과 직접 비교 대상.
- "Crown-assisted CsCuI growth and trap passivation for perovskite light-emitting diodes" — 무연 할라이드 발광체의 결합 패시베이션 접근을 다룬 연구로, TPPO 표면 개질 전략과 맥락을 공유한다.
- 그 외 Pb-free NIR PeLED 및 Sn^{2+} 산화 억제 관련 문헌은 원문 참고문헌 전체 확인 필요.

10. 선정 이유

무연 PeLED 분야에서 효율(21.2% EQE)과 수명(920.5 h)의 두 지표를 동시에 최고 수준으로 끌어올린 드문 사례로, Science 게재라는 점에서 파급력이 크다. 특히 "왜 Sn계 소자가 죽는가"를 정공 과잉 주입 기반 전기화학적 산화와 CsSnI 상전이로 인과적으로 규명한 점은 후속 연구의 설계 지침이 된다. 벌크 도핑과 계면 개질을 결합한 양면 최적화는 다른 페로브스카이트 조성 및 태양전지 등 인접 소자로 전이 가능한 일반적 방법론이다. 납 규제 대응이라는 산업적 요구와도 직결되어 OLED/차세대 발광 소자 로드맵 검토 시 필수 참조 문헌이다.

11. 키워드 태그

무연 페로브스카이트, CsSnI , 근적외 LED, 외부양자효율 21.2%, Sn^{2+} 산화 억제, 포름아미딘 도핑, 트리페닐포스핀 옥사이드, 소자 수명(T50)