



Ultrathin nano-layered boron nitride stabilizing perovskite quantum dot-based light-emitting diodes

Nature Communications · 10.1038/s41467-026-77166-z

1. 한 줄 요약

CsPbBr 페로브스카이트 QLED의 정공수송층(PTAA)과 발광층 사이에 두께 수 나노미터급 2차원 질화붕소(BN) 나노층을 매립 계면층으로 삽입하여, 계면 결함 패시베이션·Br⁻ 이온 이동 차단·방열 특성을 동시에 확보한 연구다. 그 결과 평균 EQE 30.05%, 100 cd m⁻² 기준 외삽 수명 T_{25,263}시간을 달성해 대조군 대비 각각 약 1.7배, 약 100배 향상을 보고했다.

2. 연구 배경

페로브스카이트 QD는 강한 캐리어 구속, 400-700 nm 파장 가변성, 우수한 용액 공정성 덕분에 차세대 발광체로 주목받아 EQE 30% 이상까지 도달했으나, 동작 안정성은 여전히 OLED 및 기존 Cd계 QLED에 크게 뒤쳐진다. 근본 원인은 소프트 이온 격자 특성과 리간드의 동적 결합으로 인해 열·전계 스트레스 하에서 이온성 결합이 생성되고, 이 결합을 매개로 심각한 이온 이동(특히 할라이드)이 일어나 QD 막이 열화되기 때문이다. 기존 계면 공학은 BPA 셀, 다기능 공액 유기분자 등 유기 리간드형 패시베이터에 의존했으나, 장시간 구동 중 표면에서 탈착되어 새로운 결함을 만들며 장기 성능을 훼손한다. 무기 2D 물질(MoS 등)은 태양전지에서 확산 방지막으로 검증되었지만 밴드갭이 좁아 발광층 내 구속 엑시톤 재결합을 방해한다는 한계가 있었다. 따라서 넓은 밴드갭·화학적/열적 안정성·덴글링 본드 없는 표면을 가진 h-BN이 이상적 중간층 후보로 제안되었다.

3. 핵심 기여

첫째, "white graphene"으로 불리는 초박막 나노층 BN을 페로브스카이트 QLED의 매립 계면층으로 최초로 체계적으로 도입해, 넓은 밴드갭(~6.0 eV)이 구속 엑시톤 재결합을 방해하지 않으면서 이온 차단막으로 작동함을 입증했다. 둘째, DFT 계산(음의 흡착에너지, 전하 재분포)과 XPS·FTIR 실험으로 BN이 페로브스카이트 표면 Pb·Br과 자발적으로 결합·전하 공여하여 구조를 안정화하고 결함을 줄임을 상호 검증했다. 셋째, Br⁻ 이동 장벽(0.20→0.36 eV)과 활성화 에너지(0.41→0.58 eV) 상승, ToF-SIMS 3D 깊이 프로파일을 통한 Br⁻의 HTL 방향 확산 억제를 직접적·시각적으로 제시했다. 넷째, BN의 쌍곡선 포논 폴라리톤 기반 열 확산 능력을 활용해 QD의 발광·전기 수송 특성이 열에 둔감해짐을 온도 의존 커패시턴스·PL·적외선 카메라로 규명했다. 다섯째, 결함()·전하 균형()·광추출() 세 인자를 동시에 개선하는 통합 메커니즘을 제시하며 2D 무기 물질-페로브스카이트 계면 공학이라는 실용적 전략을 확립했다.

4. 재료·소자 구조

소자 구조는 ITO / PEDOT:PSS / PTAA / BN / CsPbBr QDs / TPBi / PO-T2T / LiF / Al의 녹색 발광 QLED이다. BN은 에탄올 분산액을 PTAA 위에 스프인코팅하여 형성하며, 나노시트 크기는 약 20 nm, B·N 원소가 균일 분포하고 박막 RMS 거칠기는 약 0.34 nm에 불과한 초박형 층이다. CsPbBr QD는 기존 문헌을 일부 변형한 방법으로 합성했으며, DDAB·OA·OTAc·DBSA·TOAB 등 리간드 체계를 사용했다. 단면 TEM 및 ToF-SIMS 깊이 프로파일에서 HTL과 QD층 사이에 B 신호가 뚜렷이 증가하여 BN 중간층의 성공적 삽입이 확인되었다. BN의 넓은 밴드갭(~6.0 eV)은 에너지 준위 다이어그램상 발광층 내 엑시톤 구속에 유리하게 작용하며, 초박형이라 전하 주입 특성을 크게 저해하지 않는다.

5. 주요 성능 수치

- 평균 피크 EQE: 30.05% (대조군 17.8%)

- 챔피언 피크 EQE: 32% (외부 기관 검증 30.8%), 대조군 18.5% → 약 1.7배
- 최대 휘도: 132,326 cd m⁻² (대조군 51,031 cd m⁻², 2.6배)
- 최대 전류효율: 125 cd A⁻¹ (대조군 68 cd A⁻¹)
- EL 피크/FWHM: 520 nm / 18 nm, CIE (0.075, 0.79), Lambertian 발광 패턴
- 절대 PLQY: 87%, PL 수명 29 ns (대조군 7 ns)
- 전자(트랩) 결함 밀도: $2.38 \times 10^1 \text{ cm}^{-3}$ (대조군 $3.05 \times 10^1 \text{ cm}^{-3}$)
- Br⁻ 이동 에너지 장벽: 0.36 eV (대조군 0.20 eV), 이온 이동 활성화 에너지 0.58 eV (대조군 0.41 eV)
- 실측 수명 T @ L = 2000 cd m⁻²: 102 h (타 연구소 검증 99.7 h)
- 외삽 수명 T @ L = 100 cd m⁻²: 25,263 h (대조군 242 h, 약 104배), 가속인자 n = 1.84
- 열 안정성: 100 °C 가열 시 PL 강도 78% 유지 (대조군 30%); 80 °C 가열 후 30초 시점 막 온도 35.9 °C (대조군 47.5 °C); 35 W cm⁻² 60초 구동 시 46.9 °C (대조군 53.4 °C)

6. 기존 기술과의 비교

기존 유기 리간드형 패시베이터(BPA 셀, 공액 유기분자 이중 앵커링 등)는 화학 결합으로 결함을 억제하지만 장시간 구동 시 탈착되어 안정성이 한계에 부딪혔던 반면, BN은 무기 2D 연속막으로서 물리적 차단과 화학적 결합을 동시에 제공한다. 태양전지에서 사용된 MoS 확산 방지막과 비교하면, MoS의 좁은 밴드갭이 발광층 내 엑시톤 재결합을 저해하는 문제를 BN의 ~6.0 eV 광대역 갭이 해소한다는 점이 차별점이다. 성능 측면에서도 대조군 대비 EQE 1.7배, 휘도 2.6배, 수명 약 100배로 개선되었고, 저자들은 이를 녹색 페로브스카이트 LED 분야에서 가장 효율적이고 안정한 소자 중 하나(Supplementary Table 4의 문헌 비교)로 위치시킨다. 또한 BN 도입 후에도 J-V 곡선이 거의 동일하게 유지되어, 절연성 계면층 삽입에 따른 전기적 특성 저하가 없다는 점이 실용적 강점이다.

7. 산업 적용 가능성

BN 분산액을 스프인코팅으로 단순 삽입하는 방식이라 기존 용액 공정 QLED 스택에 추가 부담 없이 통합될 수 있고, 진공 전사(MoS 웨이퍼 전사) 같은 고비용 공정이 필요 없다는 점이 산업적으로 매력적이다. 520 nm, FWHM 18 nm의 좁은 녹색 발광과 CIE (0.075, 0.79)는 광색역 디스플레이 요구를 충족하며, Lambertian 방사 패턴은 패널 설계에 유리하다. 100 cd m⁻² 기준 2만 시간 이상의 외삽 수명과 13만 cd m⁻² 급 최대 휘도는 저휘도 디스플레이 및 고휘도 조명·마이크로 LED 대체 응용 가능성을 시사한다. 특히 BN의 방열 기능은 고전류밀도 구동 시 줄 히팅이 문제되는 대면적·고휘도 패널에서 별도 열관리 부담을 낮추는 부가 가치를 제공한다. 다만 상용화를 위해서는 Pb 함유 이슈, 대면적 균일 코팅, 청색·적색 소자 확장이 병행되어야 한다.

8. 한계와 남은 과제

가장 큰 한계는 핵심 지표인 25,263시간 수명이 2000 cd m⁻²에서 측정한 102시간을 가속인자 n = 1.84로 외삽한 값이라는 점으로, 실사용 조건에서의 장기 실측 검증이 필요하다. 결함 밀도 감소폭($3.05 \rightarrow 2.38 \times 10^1 \text{ cm}^{-3}$)은 약 22% 수준으로 PLQY 87%·PL 수명 4배 증가라는 광물성 개선폭에 비해 정량적 설명이 다소 약하며, 계면 결합과 벌크 결합의 기여 분리가 불충분하다. BN이 ~20 nm 크기 나노시트의 스프인코팅 막이므로 웨이퍼 스케일 단층 BN과 달리 완전 연속막 여부, 피복률, 두께 편차의 재현성과 대면적 확장성이 규명되어야 하며, 절연성 BN을 통한 정공 주입 메커니즘(터널링 vs. 핀홀 경유)도 명확하지 않다. 또한 녹색 CsPbBr에 국한되어 있어 이온 이동이 더 심각한 혼합 할라이드 청색 및 적색 소자, 그리고 보관 안정성·환경 스트레스(습도·산소) 조건에서의 효과는 미확인 과제로 남는다.

9. 연관 논문

Lee 등의 benzylphosphonic acid(BPA) 셀을 이용한 미배위 Pb 중심 결합 및 표면 결합 저감 연구(참고문헌 15)는 유기 패시베이션 계열의 대표 사례로 본 연구의 대비군에 해당한다. Wang 등의 다기능 공액 유기분자를 통한 Pb 이온 이중 앵커링 및 이온 이동 억제 연구(참고문헌 19)도 동일 맥락의 선행 접근이다. Zhou 등이 페로브스카이트 상하 계면에 웨이퍼 스케일 단층 MoS 버퍼를 전사하여 이온 확산 물리 장벽과 FAPbI 상 안정화를 동시에 구현한 연구(참고문헌 26)는 본 논문의 2D 무기 차단층 개념의 직접적 출발점이다. 그 외 MoS 나노시트를 페로브스카이트

계면 확산 방지막으로 활용한 태양전지 연구들(참고문헌 22-25)과, EQE 30%를 돌파한 페로브스카이트 QLED 보고들(참고문헌 4-8)이 성능 벤치마크로 인용된다.

10. 선정 이유

페로브스카이트 QLED 분야의 최대 병목은 효율이 아니라 수명이며, 본 연구는 동일 소자 플랫폼에서 효율(30%대 EQE)과 수명(약 100배)을 동시에 끌어올린 드문 사례다. 특히 "결함 패시베이션 - 이온 이동 물리적 차단 - 방열"이라는 세 가지 열화 경로를 단일 초박막 무기층으로 동시에 공략한 설계 논리가 명확하고, DFT-XPS/FTIR-GIWAXS-TA-SCLC-ToF-SIMS-온도 의존 C-f로 이어지는 다중 검증 체계가 탄탄하다. 외부 연구소의 EQE(30.8%)·T(99.7 h) 교차 검증을 제시한 점도 데이터 신뢰도 측면에서 평가할 만하다. OLED 연구자 입장에서도 2D 무기 계면층을 통한 이온/열 관리 전략은 하이브리드 발광소자 및 열 스트레스에 취약한 스택 설계에 이식 가능한 시사점을 준다.

11. 키워드 태그

페로브스카이트 QLED, CsPbBr₃ 양자점, 육방정 질화붕소(h-BN), 2D 계면공학, 이온 이동 억제, 결함 패시베이션, 동작 수명(T), 열 안정성·방열