



# Constructive Electroluminescence Interference for Ultra-Efficient and Narrowband Perovskite–Organic Tandem LEDs

Advanced Materials · 10.1002/adma.73922

## 1. 한 줄 요약

용액공정 페로브스카이트 LED(PeLED)와 진공증착 OLED를 탠덤 구조로 결합하고, 효율-임피던스 정합을 통해 두 서브유닛이 각각 최대 효율에서 동기 구동되도록 하는 '보강적 전계발광 간섭' 전략으로, 외부양자효율(EQE) 최대 54.8%와 반치폭(FWHM) 22~24 nm의 초고효율·협대역 녹색 탠덤 LED를 구현한 연구다.

## 2. 연구 배경

용액공정 PeLED는 우수한 색순도와 저비용 공정이 강점이며, 진공증착 OLED는 성숙한 소자 안정성과 효율을 갖추고 있어 두 기술의 탠덤 통합은 차세대 디스플레이의 유력한 경로로 주목받는다. 그러나 광전자적 특성이 상이한 발광 유닛을 단순히 적층하면 전계발광(EL) 손실과 스펙트럼 광대역화가 발생하는 문제가 있었다. 특히 각 서브유닛의 최적 구동 전류·임피던스 조건이 달라, 탠덤 구조에서 두 유닛이 동시에 최대 효율로 동작하기 어렵다는 근본적 한계가 존재했다. 이 연구는 효율과 색순도를 동시에 확보하는 탠덤 설계 원리를 제시하고자 한다.

## 3. 핵심 기여

첫째, 합리적 트랩 상태(trap-state) 관리를 통해 고성능 녹색 PeLED를 하부 서브유닛으로 개발하였다. 둘째, 소자 효율-임피던스 정합(impedance matching)을 정밀 최적화하여 PeLED와 OLED 서브유닛이 각각의 최대 효율 지점에서 동기 구동되는 '보강적 전계발광 간섭'을 구현, 유의미한 효율 향상을 달성했다. 셋째, 두 유닛의 상대적 발광 기여도를 섬세하게 조절하여 스펙트럼 중첩·합성을 최적화함으로써 협대역 발광을 크게 강화했다. 이를 통해 EL 효율과 색순도의 한계를 동시에 극복하는 탠덤 LED의 근본적 설계 원리를 확립했다.

## 4. 재료·소자 구조

소자는 용액공정 녹색 PeLED를 하부 서브유닛으로, 진공증착 OLED를 상부(또는 대응) 서브유닛으로 적층한 탠덤 구조이며, 두 종류의 대표적 OLED와 각각 결합한 두 가지 탠덤 소자가 제작되었다. PeLED의 페로브스카이트 조성, 트랩 패시베이션에 사용된 첨가제-리간드, OLED 발광체(인광/TADF 여부), 전하생성층(CGL) 구성 등 구체적인 재료 및 층 구조는 초록에 명시되지 않아 원문 확인 필요하다. 트랩 상태 관리와 임피던스 정합이 설계의 핵심 요소로 언급되나 그 구체적인 구현 방법 역시 원문 확인 필요하다.

## 5. 주요 성능 수치

- 최대 외부양자효율(EQE): 52.3% (탠덤 소자 1), 54.8% (탠덤 소자 2) — 초록상 '기록 경신(record-breaking)' 수준
- 반치폭(FWHM): 22 nm (소자 1), 24 nm (소자 2)
- 발광 색: 녹색 (하부 PeLED 기준; 정확한 EL 피크 파장은 원문 확인 필요)
- 구동 전압, 휘도, 전류효율, 수명(T50/T95), CIE 색좌표: 원문 확인 필요

## 6. 기존 기술과의 비교

단일 유닛 PeLED와 OLED는 각각 이론적 광추출 한계로 인해 통상 EQE 20~30%대에 머무르는 반면, 본 연구의 탠덤 소자는 52.3~54.8%로 초록에서 '기록 경신'으로 명시된 수준을 달성했다. 기존 탠덤 LED 연구들이 이중 유닛 적층 시 EL 손실과 스펙트럼 광대역화를 겪었던 것과 달리, 본 연구는 효율-임피던스 정합과 발광 기여도 조절로 효율과 협대역성(22~24 nm)을 동시에 확보한 점이 차별적이다. 다만 구체적인 비교 대상 소자의 수치는 초록에 제시되지 않아

원문 확인 필요하다.

## 7. 산업 적용 가능성

BT.2020 등 광색역 규격을 요구하는 차세대 디스플레이에서 22~24 nm 수준의 협대역 녹색 발광은 컬러필터 손실 저감과 색순도 향상에 직결되어 산업적 가치가 크다. 용액공정 PeLED와 기존 양산 인프라가 확립된 진공증착 OLED의 하이브리드 탠덤은 기존 OLED 생산 라인과의 공정 호환 가능성 측면에서도 주목할 만하다. 또한 탠덤 구조 특유의 저전류 고휘도 구동은 소자 수명 개선에 유리하여 프리미엄 디스플레이·고휘도 응용에 적합할 수 있다. 다만 페로브스카이트 층의 대면적 균일성과 장기 안정성이 양산 적용의 관건이 될 것이다.

## 8. 한계와 남은 과제

초록에 소자 수명 데이터가 언급되지 않아, 실용화의 최대 관문인 구동 안정성(특히 페로브스카이트의 이온 이동·열화 문제)은 원문 확인 필요하다. 용액공정(PeLED)과 진공증착(OLED)의 혼합 공정은 양산 시 수율·공정 통합 난이도 문제를 야기할 수 있다. 본 전략이 녹색 외 청색·적색 및 백색 탠덤으로 일반화 가능한지도 검증이 필요하다. 아울러 납 기반 페로브스카이트 사용 여부와 그에 따른 환경 규제(RoHS) 이슈 역시 원문 확인 필요하다.

## 9. 연관 논문

원문의 참고문헌 목록이 제공되지 않아 구체적 인용 관계는 원문 확인 필요하다. 다만 주제상 페로브스카이트 LED의 EQE 20% 돌파를 보고한 Nature 계열 논문들(예: Lin et al., Nature 2018; Cao et al., Nature 2018), 트랩 패시베이션 기반 고효율 PeLED 연구, OLED 탠덤 구조 및 전하생성층 설계 관련 고전 연구(Kido 그룹 등), 그리고 페로브스카이트-유기 하이브리드 탠덤 LED 선행 연구들이 밀접히 연관될 것으로 보인다. 정확한 서지 정보는 본문 참고문헌 확인이 필요하다.

## 10. 선정 이유

EQE 50%를 넘는 수치는 탠덤 구조라는 점을 감안해도 발광 소자 분야에서 이정표적 성과이며, 협대역성까지 동시에 달성해 효율·색순도 트레이드오프를 깬 점이 학술적으로 중요하다. 특히 '효율-임피던스 정합을 통한 서브유닛 동기 구동'이라는 개념은 이중 발광 유닛 탠덤 설계 전반에 적용 가능한 일반적 설계 원리로서 파급력이 크다. Advanced Materials 게재라는 점도 동료평가 수준의 신뢰성을 뒷받침하며, PeLED-OLED 하이브리드라는 산업적 관심 주제를 다뤄 실무 연구자에게 시사점이 많다.

## 11. 키워드 태그

페로브스카이트 LED, 탠덤 OLED, 외부양자효율, 협대역 발광, 임피던스 정합, 트랩 패시베이션, 전계발광, 차세대 디스플레이