



Narrowband, angle-stable, and highly efficient polariton organic light emitting diodes employing thermally activated delayed fluorescence

Light: Science & Applications · 10.1038/s41377-026-02415-1

1. 한 줄 요약

낮은 발진자 세기의 TADF 발광체 CzDBA와 강흡수 보조 결합재 C545T를 공간적으로 분리한 2차 마이크로캐비티로 결합해, 좁은 선폭과 낮은 각도 분산을 동시에 구현한 고효율 polariton OLED 연구다. 최적화된 하부·상부 발광 소자 모두 외부양자효율(EQE) 20% 이상을 달성했다.

2. 연구 배경

TADF OLED는 삼중항 여기자를 역계간전으로 회수해 내부양자효율이 거의 100%에 이를 수 있지만, donor-acceptor 구조와 분자·유전 환경의 불균일성 때문에 통상 50-100 nm의 넓은 발광 스펙트럼을 보인다. 마이크로캐비티는 발광체와 무관하게 선폭을 줄일 수 있으나, 관찰각에 따라 공진 파장이 크게 이동하는 색 변화가 발생한다. 엑시톤과 캐비티 광자가 강결합한 polariton은 선폭과 각도 분산을 추가로 줄일 수 있지만, TADF 분자의 낮은 발진자 세기는 강결합 형성을 어렵게 한다. 연구진은 전기발광과 강결합을 서로 다른 재료·공간에서 담당하게 하는 보조 강결합층 전략으로 이 문제를 해결했다.

3. 핵심 기여

첫째, 고효율 TADF 발광체 CzDBA는 전기적 여기와 광자 생성을 담당하고, 흡수가 약 100배 강한 C545T는 polariton 형성을 담당하도록 기능을 분리했다. 둘째, 2차 캐비티의 두 전기장 최대점에 발광층과 보조 강결합층을 각각 배치해 광추출과 강결합을 높이면서 여기자 소광을 억제했다. 셋째, C545T를 p-도핑된 SpiroTTB 수송층과 혼합함으로써 벌크 C545T 층이 유발하는 저항과 정공 주입 장벽을 완화했다. 그 결과 기존 polariton OLED 대비 성능을 두 배 이상 높이면서 하부 및 상부 발광 구조로의 확장성도 입증했다.

4. 재료·소자 구조

기존 TADF OLED는 ITO/50 nm NPB/10 nm TCTA/30 nm CBP:10 wt% CzDBA/40 nm TmPyPB/1 nm LiF/100 nm Al 구조이며, CzDBA는 약 540 nm에서 발광한다. Polariton 소자에서는 ITO를 1 nm Al/20 nm Ag/1 nm MoO 반투명 전극으로 대체하고, SpiroTTB:4 wt% F6TCNNQ p-도핑 정공수송층을 광학 스페이서로 사용해 2차 마이크로캐비티를 구성했다. C545T 보조 강결합층은 별도의 20-40 nm 순수층 또는 SpiroTTB:C545T:F6TCNNQ 삼원 혼합층으로 두 번째 전기장 최대점에 배치됐다. 상부 발광형은 금속 하부 전극과 반투명 LiF/Al/Ag 상부 전극 및 광학 capping layer를 이용하는 동일한 보조 강결합 개념으로 설계됐다.

5. 주요 성능 수치

- 발광 선폭(FWHM): 기준 TADF OLED 86 nm, 일반 마이크로캐비티 OLED 40 nm, 최적 청색 이동 polariton OLED 25 nm.
- 각도 안정성: 45°에서 피크 청색 이동이 마이크로캐비티 40 nm, V1a 23 nm, 최적화된 V1b 10 nm.
- 강결합 세기: 20 nm C545T 계열의 Rabi splitting 약 0.2 eV, 40 nm C545T 또는 136 nm 혼합층에서는 약 0.4 eV.
- 초기 소자 EQE: 1000 cd m⁻²에서 V1a 16.5%, V1b 15%.
- 최적 소자 EQE: 1000 cd m⁻²에서 V2 21.3%, V3 20.8%, V4 22.0%.
- 최고 저휘도 효율 및 구현 범위: V4는 100 cd m⁻²에서 28.6% EQE를 기록했으며, 하부·상부 발광 설계 모두 20% 이상의 EQE를 달성했다.

6. 기존 기술과의 비교

일반 TADF OLED는 높은 효율을 제공하지만 CzDBA 기준 86 nm의 넓은 선포를 가지며, 약결합 마이크로캐비티는 이를 40 nm로 줄이는 대신 큰 각도 의존성을 보였다. 본 polariton 구조는 선포를 25 nm까지 추가로 축소하고, 45° 파장 이동을 10 nm까지 억제했다. 초기의 순수 C545T 층은 저항 증가와 EQE 저하를 유발했지만, 두꺼운 강결합층과 p-도핑 혼합층 최적화 후에는 기존 마이크로캐비티와 동등하거나 더 높은 효율을 회복했다. 1000 cd m⁻²에서 20%를 넘는 EQE는 선행 polariton OLED 최고 성능을 두 배 이상 상회한다.

7. 산업 적용 가능성

좁고 각도 안정적인 녹색 발광은 시야각에 따른 색 이동을 줄이고 색순도를 높이므로, BT.2020과 같은 광색역 디스플레이 규격에 유리하다. 특히 528 nm 부근으로 조정된 소자는 초고해상도 디스플레이의 이상적 녹색점에 근접한다. 보조 강결합층은 기존 마이크로캐비티 OLED에 p-도핑 수송층과 C545T 층을 추가하는 방식이어서 생산 구조를 전면 변경할 필요가 없다. 또한 상부 발광형에서도 20% 이상의 EQE가 확인돼 능동행렬 디스플레이와 고개구율 픽셀 구조로의 적용 가능성이 높다.

8. 한계와 남은 과제

선포, 각도 분산, 효율은 캐비티 두께·detuning·Rabi splitting 사이의 상충관계에 민감하며, V4처럼 결합은 강하지만 적색 detuning이 커지면 45° 이동이 다시 29 nm로 증가한다. 순수 C545T 층은 정공 수송 저항과 주입 장벽을 높여 동일 전압에서 전류밀도와 휘도를 감소시키므로 삼원 혼합층 공정이 필요하다. 본문은 주로 녹색 CzDBA-C545T 조합을 검증했으므로 적색·청색 TADF 재료로의 확장, 장기 수명, 고휘도 효율 roll-off 및 대면적 균일성은 추가 검증이 필요하다. 특히 실제 패널 적용을 위해서는 각도별 CIE 좌표, 수명, 열 안정성 및 증착 공정의 조성 재현성을 함께 최적화해야 한다.

9. 연관 논문

Uoyama et al., *Nature* 492, 234-238 (2012)는 순수 유기 TADF OLED의 고효율 삼중항 수확 원리를 확립한 기반 연구다. Tropsch와 Gather의 *Advanced Optical Materials* 논문은 유기 다층 마이크로캐비티에서 Rabi splitting을 조절해 강결합 진입 조건을 분석했으며, 본 연구의 캐비티-결합 설계와 직접 연결된다. Song et al., *Advanced Materials* 32, 1907539 (2020)와 Dos Santos et al., *Chemical Reviews* 124, 13736-14110 (2024)는 각각 OLED 성능 한계와 TADF 재료 설계를 종합적으로 다룬다. Yoshida et al., *Nature* 621, 746-752 (2023) 및 Le Roux et al., *Nature Communications* 16, 811 (2025)는 유기 레이저와 exciton-polariton 광원으로 이어지는 후속 응용 맥락을 제공한다.

10. 선정 이유

이 논문은 polariton OLED의 고질적 약점이었던 낮은 효율을 해결하면서 좁은 선포와 각도 안정성까지 동시에 확보했다는 점에서 중요하다. 특히 발광체 자체의 발진자 세기를 높이려 하지 않고, 전기발광 재료와 강결합 재료의 역할을 분리한 설계가 재료 선택의 자유도를 크게 높인다. 1000 cd m⁻²라는 실용 휘도에서 20% 이상의 EQE를 기록하고 상부 발광 구조까지 구현했다는 점도 디스플레이 산업과의 관련성을 강화한다. 따라서 본 연구는 polaritonics를 기초 광물리 영역에서 상용 OLED 구조로 이동시키는 대표적 연결고리로 평가할 수 있다.

11. 키워드 태그

핵심 태그는 다음과 같다. TADF OLED, exciton-polariton, 강한 빛-물질 결합, 마이크로캐비티, CzDBA, C545T, 각도 안정 발광, 협대역 발광