



Tetracyclic -Extended Multi-Resonant TADF Emitters for Green PSF-OLEDs With 37.7% EQE and BT.2020-Compatible Top-Emitting Devices

Advanced Functional Materials · 10.1002/adfm.78000

1. 한 줄 요약

나프토[2,3-b]벤조퓨란 4환 구조로 B/N 발광 유닛의 주변 평면성과 강직성을 확장한 녹색 MR-TADF 말단 발광체(Ph-DBF, Me-NapBF, Ph-NapBF)를 개발해, FWHM <23 nm·근·단일(near-unity) PLQY와 높은 물흡광계수()를 동시에 확보한 연구다. 이를 PSF(인광/TADF 증감 형광) 구조에 적용하여 하부발광 소자에서 최대 EQE 37.7%, 상부발광 소자에서 BT.2020 녹색 규격을 만족하는 CIE (0.17, 0.79)와 277.2 cd A⁻¹를 달성했다.

2. 연구 배경

PSF/TSF OLED는 인광 또는 TADF 증감체가 삼중항 엑시톤을 수확하고, MR 발광체가 말단 발광체로서 좁은 스펙트럼을 담당하는 구조로, 고색순도와 고효율을 동시에 노릴 수 있는 대표적 접근이다. 그러나 초록이 명시한 대로 색순도와 소자 효율을 동시에 확보하는 것은 여전히 큰 과제이며, 특히 말단 발광체의 엑시톤 수확 효율은 증감체→발광체 간 에너지 전달을 지배하는 물흡광계수()와 스펙트럼 중첩에 크게 의존한다. 또한 MR 발광체는 여기상태에서의 구조 변형이 스펙트럼 확장(FWHM 증가)과 색순도 저하를 유발한다는 문제를 갖는다. 본 연구는 B/N 코어 주변에 4환 -확장 골격을 도입해 이 두 병목(강직성 부족, 낮은)을 동시에 공략한다.

3. 핵심 기여

첫째, 나프토[2,3-b]벤조퓨란이라는 4환 -확장 단위를 B/N 발광 유닛 주변에 도입해 평면성과 강직성을 높이고, 여기상태 구조 편차를 억제하여 FWHM <23 nm와 근·단일 PLQY를 구현했다. 둘째, 방향족 고리를 통한 선형 -비국재화 확장이 발광 파장의 적색 이동과 흡수 밴드 강화를 동시에 유발하며 를 증대시킨다는 분자설계 원리를 제시했다. 셋째, 증가된 가 실제로 말단 발광체의 엑시톤 수확 효율 향상으로 이어져 하부발광 PSF-OLED에서 EQE 37.7%(Ph-NapBF)를 달성함을 실증했다. 넷째, 동일 발광체로 상부발광 소자를 제작해 BT.2020 녹색 좌표에 부합하는 색순도와 277.2 cd A⁻¹의 고전류효율을 확보, 디스플레이 응용 관점의 실효성을 보였다.

4. 재료·소자 구조

발광체는 B/N(붕소-질소) 다중공명 코어에 나프토[2,3-b]벤조퓨란 4환 골격을 융합·치환한 3종 시리즈로, 페닐 치환 디벤조퓨란형(Ph-DBF), 메틸/페닐 치환 나프토벤조퓨란형(Me-NapBF, Ph-NapBF)이다. 소자는 MR-TADF 발광체를 말단 발광체로 사용하는 PSF(인광/TADF 증감 형광) 구조로, 하부발광(bottom-emitting)형과 상부발광(top-emitting, 마이크로캐비티)형 두 가지가 비교 제작되었다. 다만 증감체 종류(예: Ir 인광 착체 또는 TADF 증감체), 호스트 재료, 도핑 농도, 각 수송층·전극·캐비티 두께 등 구체적인 소자 적층 구성은 초록에 제시되지 않아 원문 확인 필요하다. 합성 경로 및 분자 구조의 정확한 치환 위치 역시 원문 확인 필요하다.

5. 주요 성능 수치

- FWHM: <23 nm (3종 발광체 공통 기재)
- PLQY: near-unity(근 100%) — 구체 수치 원문 확인 필요
- 하부발광 PSF-OLED 최대 EQE: 37.7% (Ph-NapBF), 35.5% (Me-NapBF)
- 1000 cd m⁻² 에서의 EQE: 33.3% (Ph-NapBF), 30.9% (Me-NapBF)
- 상부발광 OLED 색좌표: CIE (0.17, 0.79), BT.2020 녹색 규격 충족

- 상부발광 OLED 최대 전류효율: 277.2 cd A⁻¹
- 물흡광계수(): -확장에 따라 증가(정량값 원문 확인 필요)
- Ph-DBF 소자 성능, 발광 피크 파장, 수명(LT), 롤오프 상세 곡선: 원문 확인 필요

6. 기존 기술과의 비교

일반적인 MR-TADF 단독 도판트 소자는 좁은 FWHM은 얻으나 삼중항 축적으로 인한 효율 롤오프와 EQE 한계가 문제였고, PSF/TSF 구조는 이를 완화하지만 증감체-말단체 간 에너지 전달 효율이 부족하면 색순도 저하(증감체 잔여 발광)나 효율 손실이 발생한다. 본 연구는 증대라는 정량적 지표를 설계 목표로 삼아 이 전달 효율 병목을 개선했고, 그 결과 EQE 37.7% 및 1000 cd m⁻²에서 33.3% 유지라는 비교적 낮은 롤오프를 함께 달성했다. 또한 4환 -확장에 의한 강직화는 통상적인 -확장이 초래하는 FWHM 증가를 억제하면서 적색 이동을 얻는 점에서 기존 -확장 MR 설계와 차별화된다. 다만 동일 조건 대조군(비확장 MR 발광체 기준 소자) 대비 수치 비교는 초록에 없어 원문 확인 필요하다.

7. 산업 적용 가능성

BT.2020 녹색 좌표 (0.17, 0.79)를 상부발광 구조에서 달성했다는 점은 차세대 초광색역 디스플레이(OLED TV, 프리미엄 모바일)용 녹색 화소 재료로서 직접적 의미를 갖는다. 277.2 cd A⁻¹의 전류효율은 동일 휘도에서 구동 전류를 낮출 수 있어 소비전력 절감과 패널 발열·열화 억제에 유리하다. 상부발광은 실제 AMOLED 양산 구조와 정합성이 높아, 마이크로캐비티 최적화와 결합한 즉시적 응용 검토가 가능하다. 반면 양산 적용에는 재료 합성 수율·순도·승화 안정성, 증감체를 포함한 3성분계 공증착 공정 제어, 소자 수명 확보가 관건이며 이들 데이터는 초록에 없어 원문 확인 필요하다.

8. 한계와 남은 과제

가장 중요한 미확인 항목은 소자 수명(LT95/LT50)으로, PSF 구조에서 증감체와 MR 발광체의 열화 거동은 상업화의 결정적 변수임에도 초록에 제시되지 않았다. 또한 고휘도(예: 5000-10000 cd m⁻²) 영역의 롤오프, 삼중항-삼중항 소멸(TTA) 및 역계간전이 속도상수 등 광물리 파라미터도 원문 확인 필요하다. 4환 -확장은 분자량 및 평면성 증가로 인해 승화 온도 상승, 결정화·응집(집합체 발광) 경향 증가라는 공정·박막 안정성 리스크를 내포한다. 아울러 청색·적색으로의 확장성, 증감체 의존성 최소화, 그리고 BT.2020 청색과의 조합을 통한 풀컬러 패널 검증이 후속 과제로 남는다.

9. 연관 논문

본 결과의 계보는 (i) Hatakeyama 등의 DABNA 계열 B/N 다중공명 발광체 원 논문, (ii) Adachi/Nakanotani 등이 제시한 TADF-증감 형광(TSF/하이퍼플루오레센스) 개념, (iii) 인광 증감 형광(PSF)에서 Ir 착체를 증감체로 사용해 롤오프를 억제한 연구군에 직접 연결된다. 또한 -DABNA류의 -확장·다중봉소화 전략으로 좁은 FWHM과 고 를 동시에 추구한 논문들, 그리고 상부발광 마이크로캐비티 최적화로 BT.2020 색역을 논의한 소자 공학 논문들이 비교 대상이 된다. 구체적 인용 문헌 목록과 본문 내 대조 데이터는 제공되지 않았으므로 원문 참고문헌 확인 필요하다.

10. 선정 이유

색순도(BT.2020 녹색)와 효율(EQE 37.7%, 277.2 cd A⁻¹)을 동시에 만족시킨 사례로, PSF/TSF 분야에서 오랫동안 상충 관계로 남아 있던 두 지표를 함께 개선했다는 점에서 학술·산업적 파급력이 크다. 특히 "물흡광계수() 증대 → 말단 발광체 엑시톤 수확 효율 향상"이라는 설계 지표를 명시적으로 제시한 것은 재료 개발자에게 즉시 활용 가능한 분자설계 룰을 제공한다. 상부발광 실증까지 포함해 실제 패널 구조와의 연결성을 확보한 점도 선정 근거다.

11. 키워드 태그

MR-TADF, 다중공명 B/N 발광체, PSF-OLED, 하이퍼플루오레센스, 나프토[2,3-b]벤조퓨란, 물흡광계수, BT.2020 색역, 상부발광 OLED