



Triplet-Energy-Lowered Multiple-Resonance Organoboron Emitters for Highly Efficient Phosphor-Sensitized Fluorescent OLEDs with Suppressed-Efficiency-Roll-Off

Chemical Science · 10.1039/d6sc03891c

1. 한 줄 요약

삼중항 에너지를 낮춘 다중공명(MR) 유기붕소 형광체 BNCz-O를 인광 증감 OLED의 최종 발광체로 사용해, 489 nm의 좁은 발광과 최대 외부양자효율(EQE) 31.4%를 달성했다. 1000 cd m⁻²에서도 EQE 29.9%를 유지해 효율 롤오프를 억제했다.

2. 연구 배경

기존 MR-TADF 발광체는 좁은 스펙트럼과 높은 효율을 양립할 수 있지만, 역계간전이(RISC)가 느리면 축적된 삼중항 여기자로 인해 효율 롤오프와 소자 열화가 발생한다. 이 논문은 삼중항 수확을 인광 증감제에 맡기고, 최종 발광체는 빠르게 형광을 내도록 설계하는 접근을 택했다. 목표는 MR 발광체의 색 순도를 유지하면서 고휘도 효율을 개선하는 것이다.

3. 핵심 기여

비대칭 π-확장 구조를 통해 낮은 삼중항 에너지를 갖는 BNCz-O와 황 유사체 BNCz-S를 합성했다. 두 물질은 용액에서 20-22 nm의 좁은 발광폭을 보였으며, BNCz-O를 사용한 인광 증감 소자는 높은 최대 효율뿐 아니라 고휘도에서도 작은 효율 감소를 보였다. 즉, 발광체 자체의 RISC에 의존하기보다 증감제의 삼중항 활용과 최종 발광체의 빠른 형광을 결합한 점이 핵심이다.

4. 재료·소자 구조

BNCz-O는 벤조[g]벤조푸로카바졸, BNCz-S는 대응하는 벤조티에노카바졸 구조를 붕소·질소 기반 MR 골격에 융합한 발광체다. BNCz-O 최적화 소자의 적층은 ITO/HATCN/NPB/SiCzCz/발광층/SiTrzCz2/DPPyA/LiF/Al이며, 발광층에는 호스트, 인광 증감제 PtON-TBBI(BD02), BNCz-O 최종 발광체를 사용했다. BNCz-S의 전계발광 평가는 적합한 인광 증감제 대신 TADF 증감제 4tCzBN-PhCN을 사용했으므로, 두 물질의 소자 성능은 동일한 증감 조건의 직접 비교가 아니다.

5. 주요 성능 수치

- BNCz-O 용액 발광: 491 nm, 반치폭(FWHM) 22 nm, 광발광양자수율(PLQY) 82%.
- BNCz-S 용액 발광: 502 nm, FWHM 20 nm, PLQY 71%.
- BNCz-O 용액 형광 수명·실측 삼중항 에너지: 5.3 ns·2.23 eV.
- BNCz-O 인광 증감 OLED: 발광 피크 489 nm, FWHM 28 nm, 최대 EQE 31.4%, 최대 전력효율 63.2 lm W⁻¹.
- BNCz-O 고휘도 EQE: 1000 cd m⁻²에서 29.9%, 10 000 cd m⁻²에서 24.1%.
- BNCz-O 소자 최대 휘도·색좌표·수평 발광쌍극자 비율: 112 500 cd m⁻²·CIE (0.124, 0.371)·74.5%.

6. 기존 기술과의 비교

논문이 소개한 2025년 벤조티오펜 기반 MR 형광체는 일반 형광 OLED에서 최대 EQE 11.3%, TADF 증감 소자에서 21.3%를 기록했다. 본 연구의 BNCz-O 인광 증감 소자는 최대 31.4%를 달성했지만, 증감 방식과 소자 구성이 달라 수치만으로 재료의 우열을 확정할 수는 없다. 구조적으로 유사한 기존 BN-MR 발광체의 보고된 삼중항 에너지 2.45-2.64 eV에 비해 BNCz-O의 계산값은 2.27 eV로 낮다.

7. 산업 적용 가능성

489 nm의 좁은 발광, 1000 cd m^{-2} 에서의 높은 EQE, 501°C 의 열분해온도는 고휘도 디스플레이용 발광재료로서 검토할 근거가 된다. 다만 CIE (0.124, 0.371)은 심청색보다는 하늘색 계열이므로, BT.2020 청색 좌표를 충족하는 재료로 해석해서는 안 된다. 실제 양산 적합성은 수명, 대면적 공정, 재현성 및 증감제와의 조합을 추가 검증해야 판단할 수 있다.

8. 한계와 남은 과제

소자 구동수명이나 장기 색 안정성은 제시되지 않아, 낮은 효율 롤오프가 곧 긴 사용수명을 뜻하지는 않는다. 호스트에 도핑한 박막에서는 BNCz-O와 BNCz-S에 각각 $361 \mu\text{s}$ 와 $542 \mu\text{s}$ 의 지연 성분도 관찰되어, 모든 환경에서 TADF가 완전히 배제된다고 단정하기 어렵다. 또한 BNCz-O의 실측 단일항-삼중항 에너지 차이(ΔE_{ST})는 본문 계산값 0.30 eV 와 표의 0.32 eV 가 일치하지 않으며, BNCz-S에는 같은 인광 증감 체계가 적용되지 않았다.

9. 연관 논문

2016년 Hatakeyama 연구진의 MR-TADF 선행 연구는 본 논문의 다중공명 발광체 설계 배경이다. Jang 등의 *Advanced Optical Materials* 2025 논문(DOI: 10.1002/adom.202501901)은 본문에서 소개한 저삼중항 MR 형광체 계열과 연결된다. 논문이 함께 논의한 2025년 Adachi 연구진의 피렌 함유 MR 형광체 연구는 치환 위치가 효율뿐 아니라 구동 안정성에도 영향을 줄 수 있음을 보여준다.

10. 선정 이유

이 연구는 분자 설계에서 삼중항 에너지와 발광폭을 조절하고, 소자 설계에서 삼중항 수확 경로를 분리한 사례다. 특히 최대 EQE뿐 아니라 1000 및 10000 cd m^{-2} 의 효율을 함께 제시해 고휘도 성능을 평가할 수 있다. 동시에 박막의 지연 발광과 구동수명 미보고라는 검증 과제도 분명하다.

11. 키워드 태그

다중공명 유기불소, 저삼중항 에너지, 인광 증감 형광, 협대역 발광, 효율 롤오프, BNCz-O, OLED