



Cavity-Compatible Light Extraction in Top-Emitting Microcavity OLEDs via a Gentle Internal Corrugation Layer and Resonance-Matched Narrowband Emission

Advanced Science · 10.1002/advs.78013

1. 한 줄 요약

완만한 내부 요철층(GICL)과 공진 대역에 맞춘 협대역 발광계를 결합해, 탑 에미션 마이크로캐비티 OLED의 광추출과 시야각 색 안정성을 함께 개선한 연구다. 동일한 광학 투명 수지(OCR) 조건에서 최대 외부양자효율(EQE)은 34.8%에서 69.2%로 증가했다.

2. 연구 배경

탑 에미션 OLED의 마이크로캐비티는 정면 발광과 색 순도를 높이지만, 광도파 모드와 표면 플라즈몬 관련 모드에 갇힌 빛을 회수하기 어렵다. 가파른 내부 요철은 이를 산란시킬 수 있으나 적층막의 국소 광학 두께와 공진 조건을 흐트러뜨릴 위험이 있다. 저자들은 광추출뿐 아니라 캐비티가 만드는 좁은 스펙트럼과 각도별 발광 특성도 유지해야 한다는 문제에 주목했다.

3. 핵심 기여

GICL은 큰 높이 변조를 급격한 경사 대신 넓은 가로 폭에 분산시켜, 상부 박막의 연속적인 피복과 내부 광모드의 재분배를 양립시키도록 설계됐다. 여기에 협대역 pTSF 발광계를 사용해 발광 스펙트럼의 더 큰 부분이 캐비티 공진 대역과 겹치게 했다. 형태 관찰, 광학 시뮬레이션, 동일 OCR 조건의 소자 비교를 통해 구조와 발광계의 결합 효과를 제시했다.

4. 재료·소자 구조

소자는 Ag 기반의 2차 탑 에미션 마이크로캐비티 구조이며, GICL을 내부 요철층으로 사용하고 외부 계면에는 OCR을 적용한다. pTSF 발광층은 TADF 감응 호스트 DMIC-TRZ, 인광 보조체 Ir(ppy)₃acac, 최종 협대역 MR-TADF 발광체 tCzphB-FI로 구성된다. GICL의 대표 표면 경사는 방향에 따라 약 1.8-6.9°, 대표 가로 폭은 약 8.9 μm이며, 단면 SEM에서는 그 위의 적층막이 큰 국소 단절 없이 요철을 따르는 모습이 관찰됐다.

5. 주요 성능 수치

- 최대 전류효율: 동일 OCR 조건에서 302.7 → 378.4 cd/A
- 최대 전력효율: 동일 OCR 조건에서 199.3 → 396.7 lm/W
- 최대 외부양자효율: 동일 OCR 조건에서 34.8% → 69.2%
- 60° 시야각 색 변화량: $\Delta u'v'$ 0.0197 → 0.0086
- 광추출효율(광학 시뮬레이션): 동일 CPL·OCR 조건에서 37.6% → 74.1%
- pTSF 발광 반치폭: 기준 구조 22 nm → 마이크로캐비티 구조 19 nm

6. 기존 기술과의 비교

같은 pTSF 발광계를 사용한 평탄 마이크로캐비티 소자와 비교하면, GICL 적용 시 최대 EQE는 약 1.99배가 되면서 60° 색 변화량은 감소했다. 가파른 임프린트 랜덤 마이크로렌즈 배열(IRMLA)과의 광선 추적 비교에서는 정의된 정면 수집 영역으로 향한 광 비율이 GICL 77.3%, IRMLA 43.5%였다. 다만 광대역 인광계와 pTSF의 절대 효율 차이는 발광 폭뿐 아니라 재료·전기적 특성도 달라, 협대역성 하나의 효과로 분리할 수 없다.

7. 산업 적용 가능성

정면 효율과 시야각 색 안정성이 모두 중요한 고해상도 AMOLED에 적합한 설계 방향이다. 기존 마이크로캐비티의 방향성을 크게 희생하지 않고 내부 광손실을 줄이려는 접근이며, OCR을 통한 외부 계면 손실 완화와도 조합할 수 있다. 실제 적용에는 약 1 μm 높이 변조를 갖는 요철의 대면적 재현성과 그 위 박막의 균일한 증착이 관건이다.

8. 한계와 남은 과제

제공된 원문 발췌에는 수명, 대면적 균일성, 제조 수율에 관한 검증 결과가 제시되지 않아 양산성을 판단하기 어렵다. 시뮬레이션은 광추출 증가를 뒷받침하지만, 개별 광도파·플라즈몬 모드의 기여를 소자 실험만으로 각각 정량 분리한 결과로 해석해서는 안 된다. 협대역 발광계의 이점 역시 다른 발광계와의 조성·전하 특성 차이를 통제한 추가 비교가 필요하다.

9. 연관 논문

논문이 인용한 선행 pTSF 연구[38-41]는 감응 경로와 협대역 최종 발광체를 결합하는 발광계의 배경이다. 내부 주름·요철 광추출 연구[31-37]는 이 연구가 완만한 경사와 적층 피복을 강조하게 된 비교 대상이다. 마이크로캐비티의 각도·스펙트럼 특성을 다룬 연구[13-18]와 함께 읽으면 광추출과 공진 유지 사이의 상충관계를 이해하기 좋다.

10. 선정 이유

최대 EQE 69.2%라는 수치뿐 아니라, 같은 OCR 조건의 대조군과 60° 색 변화량을 함께 제시해 광추출의 실질적 가치를 평가할 수 있다. 요철의 거칠기만이 아니라 경사·피복성·정면 집광을 연결하고, 발광 스펙트럼과 캐비티 공진의 정합까지 설계 변수로 다룬 점이 중요하다.

11. 키워드 태그

탑 에미션 OLED, 마이크로캐비티, 내부 광추출, 완만한 요철층, pTSF, 협대역 발광, 시야각 색 안정성