



Mask-free fast patterning of organic light-emitting diode pixels using laser-assisted close-space sublimation

arXiv (프린트) · arxiv:2608.05073v1

1. 한 줄 요약

940 nm 레이저 가열과 근접 승화(close-space sublimation, CSS)를 결합하고, 흡수체(CrO/Cr)와 반사체(Ti/Al/Ti)가 공간적으로 패터닝된 전용 도너 기판을 사용하여 파인메탈마스크(FMM) 없이 마이크로미터급 OLED 화소를 고속으로 전사하는 2단계 LA-CSS 공정을 제시한 연구이다. 이 방식으로 제작한 녹색 인광 OLED는 기존 진공열증착(VTE) 소자와 거의 동일한 EQE·효율·EL 스펙트럼을 보였다.

2. 연구 배경

현재 스마트폰 OLED 양산은 선형 증발원 + FMM 조합에 의존하나, VTE의 성막 속도가 sub-nm/s 수준으로 제한되고 재료 낭비가 약 50%에 달하며, 대면적 기판에서 총 공정시간(TACT)이 길다는 한계가 있다. FMM의 패턴 정밀도도 15-20 μm 수준으로 고해상도 확장에 제약이 있다. 대안으로 CdTe·페로브스카이트 태양전지에서 검증된 CSS(소스-기판 간격 1-5 mm, >10 nm/s)와, LIFT·LITI 같은 레이저 전사 기술이 제안되었으나 LIFT는 유기물 직접 조사에 의한 열화, LITI는 단일 레이저 헤드로 다수 라인을 그려야 하는 스루풋 한계가 있다. 또한 기존 줄 가열식 CSS는 호스트-도펀트의 분자량이 유사해야 균일 혼합이 가능하다는 재료 제약을 안고 있었다.

3. 핵심 기여

첫째, 도너 기판 자체에 흡수체/반사체 패턴을 새겨 넣어 레이저 헤드의 미세 조향 없이 선형 빔 스캔만으로 선택적 전사가 이루어지는 "마스크-프리" 패터닝 개념을 구현했다. 둘째, 전달행렬법(TMM)으로 금속/금속산화물 조합의 940 nm 흡수율을 계산하고 열전도도·비열까지 고려해 CrO/Cr(흡수체)-Ti/Al/Ti(반사체) 조합을 최적 선정했다. 셋째, COMSOL 과도 열전달 해석과 열화상 카메라 실측을 대조하여 흡수체-반사체 간 40-50 °C의 온도 대비가 선택 전사를 지배함을 규명했다. 넷째, 패터닝-전사를 분리한 2단계 공정으로 색혼합 위험을 낮추고, 제거된 재료를 캡처 기판으로 회수해 재사용 가능성을 열었다. 다섯째, LA-CSS의 빠른 전사 속도가 분자량 차이(약 212 g/mol)에도 불구하고 호스트-도펀트 균일 혼합을 가능하게 함을 PL·EL로 입증했다.

4. 재료·소자 구조

도너 기판은 유리 위에 흡수체 stack(CrO 90 nm / Cr 75 nm)과 반사체 stack(Ti 50 nm / Al 400 nm / Ti 50 nm)이 교대로 배치된 구조이며, 그 위에 발광층을 증착한다. 발광층은 mCBP 호스트에 Ir(mppy)를 5% 도핑한 녹색 인광 EML이고, EML만 LA-CSS로 전사되며 ITO/정공주입·수송층 등 나머지 층은 모두 VTE로 형성한다(진공 파괴 없이 진행). 소자 활성면적은 3 mm × 3 mm이며 2단계 공정에서는 반사체가 활성영역을 정의한다. 마이크로 패턴 검증에는 TEG(25 μm 다이아몬드, 35 μm × 10 μm 사각형)와 HFP(10-70 μm 정사각 반사체 어레이)를 사용했고, 청색 형광 OLED 구조에서도 동일한 검증이 수행되었다.

5. 주요 성능 수치

- 레이저 파장: 940 nm
- TMM 흡수체 흡수율 범위: 18.6% ~ 98.0% (금속 두께 30±10 nm 이상에서 포화, 산화물 두께 90±10 nm 및 290-350 nm에서 흡수 밴드)
- 반사체 흡수율: 최대 0.62(W/Al/W), 최소 0.52(Ti/Al/Ti, 선정)
- 패터닝 조건: 4.545×10 W/m², duty 75%, 스캔 4 mm/s → 시물 흡수체 157 °C / 반사체 111 °C, T 45 °C(정상상태 87 °C)

- 전사 조건: $4.773 \times 10 \text{ W/m}^2$, duty 70%, 스캔 2 mm/s → 시물 흡수체 239 °C / 반사체 182.4 °C, T 50.9 °C(정상상태 165 °C)
- 실측 온도(패터닝): 흡수체 140.3 °C, 반사체 107.8 °C, 정상상태 86.7 ± 0.7 °C (시물 대비 각각 13.7%, 3.75% 낮음)
- 실측 온도(전사): 흡수체 198 °C, 반사체 156 °C (시물 대비 17.1%, 13.8% 낮음)
- G-VTE 소자(@1000 cd/m²): Vin 3.4 V, Von 3.6 V, VD 4.75 V, 54.4 cd/A, EQE 15.9%, c 510 nm, CIE (0.285, 0.627)
- G-CSS 소자(@1000 cd/m²): Vin 3.5 V, Von 3.65 V, VD 4.8 V, 53.3 cd/A, EQE 15.5%, c 511 nm, CIE (0.278, 0.635)
- 마이크로 패턴 충실도: 25 μm ·35 μm 형상 정밀 패터닝, 30 μm 초과 고충실도, 20 μm 일부 변형, 10 μm 에지 왜곡
- 마이크로 패터닝/전사 조건: $5.218 \times 10 \text{ W/m}^2$ ·78%·3 mm/s (갭 ~1.2 mm) / $5.118 \times 10 \text{ W/m}^2$ ·80%·1.5 mm/s (갭 2 mm)

6. 기존 기술과의 비교

FMM 기반 양산 공정 대비 마스크가 불필요하고 정밀도가 15-20 μm 에서 마이크로미터 수준으로 개선될 여지가 있으며, CSS 특유의 근접 배치로 VTE(sub-nm/s)보다 훨씬 빠른 성막(>10 nm/s급)이 가능하다. LIFT는 유기물이 레이저를 직접 흡수해 열화 위험이 있으나, 본 공정은 레이저가 도너 기판의 흡수체/반사체에서 흡수·반사되므로 유기물과의 직접 상호작용 확률이 매우 낮다. LITI 대비로는 단일 레이저 헤드가 라인 단위로 그려야 하는 스루풋 병목을 도너 기판 자체 패턴 + 선형 빔 스캔으로 대체한 점이 차별점이다. 또한 줄 가열 CSS가 요구하던 호스트-도펀트 분자량 유사 조건을 빠른 레이저 전사로 회피했으며, 최종 소자 성능은 VTE 기준 소자와 EQE 기준 15.5% vs 15.9%로 사실상 동등하다.

7. 산업 적용 가능성

AMOLED 화소 패터닝의 마스크 비용, 마스크 새김·정렬 오차, 대면적 확장성 문제를 우회할 수 있어 중대형 및 고해상도 패널 공정 대안으로 의미가 있다. 패터닝 단계에서 제거된 유기물을 캡처 기판으로 회수해 재사용할 수 있어 VTE의 ~50% 재료 손실을 줄일 잠재력이 있다. 녹색 인광뿐 아니라 청색 형광 구조에서도 VTE와 동등한 특성이 확인되어 RGB 사이드-바이-사이드 화소 형성으로의 확장 가능성이 열려 있다. 2단계 공정이 색혼합(의도치 않은 재료 전사)을 억제하므로 다색 화소 배열 공정 통합 관점에서도 실용적이다.

8. 한계와 남은 과제

10 μm 및 20 μm 미세 패턴에서는 흡수체→반사체로의 측면 열확산으로 에지 왜곡이 발생하여, 현재 안정적 해상도는 약 30 μm 이상에 머문다. 시뮬레이션은 y방향 열전달과 복사·전도 손실을 무시한 2D 가정이었어서 실측과 최대 13.7-17.1%의 온도 편차가 존재하며, 정량 예측 모델의 정교화가 필요하다. 소자는 3 mm × 3 mm 대면적 단일 화소 수준에서 검증되었을 뿐, 실제 RGB 서브픽셀 어레이·백플레인 상 정렬 정밀도, 반복 재현성, 수명(운영 안정성) 데이터는 제시되지 않았다. 도너-수용 기판 간격(1.2-2 mm)이 패턴 치수 유지에 결정적이라 대면적에서의 갭 균일도 제어와 도너 기판 재사용 내구성도 과제로 남는다.

9. 연관 논문

- CSS 기반 CdTe·페로브스카이트 박막 고속 성막 연구(참고문헌 12-17): 근접 승화의 고속 성막 원리와 장비 구성의 토대.
- 줄 가열 CSS를 이용한 유기 혼합막 전사 연구(참고문헌 18, 40): 분자량 유사 조건이 균일 혼합에 필요하다는 선행 결론으로, 본 논문이 이를 반박·극복.
- LIFT 관련 연구(참고문헌 19, 20): 레이저 직접 조사 전사 및 유기물 열화 이슈.
- LITI 및 LTHC 층 기반 열전사 연구(참고문헌 21-23): 마이크로급 패턴 정확도 확보 방식의 직접적 비교 대상.
- FMM 패터닝 정밀도 관련 문헌(참고문헌 9, 24, 25): 15-20 μm 정확도라는 산업 기준선 제공.

10. 선정 이유

OLED 패터닝의 근본 병목인 FMM 의존성과 낮은 성막 속도를 동시에 겨냥하면서, 광학 설계(TMM)-열해석(COMSOL)-실측(열화상)-소자 검증(EQE/EL)까지 일관된 물리적 근거 사슬을 갖춘 드문 연구이다. 특히 "레이저를 유기물이 아닌 도너 기판 패턴이 흡수하게 한다"는 발상은 재료 열화 없이 선택성을 얻는 실용적 해법으로, LITI 대비 스루풋 확장 논리도 명확하다. VTE 대비 성능 저하가 EQE 0.4%p 수준에 불과하다는 점은 이 방식이 단순 개념 실증을 넘어 공정 대체 후보로 검토될 만함을 시사한다. 분자량 제약 해소라는 부수적 발견도 CSS 계열 공정의 재료 선택 폭을 넓히는 의미가 있다.

11. 키워드 태그

마스크리스 패터닝, 레이저 보조 근접승화(LA-CSS), OLED 화소 전사, 패턴 도너 기판, 흡수체-반사체 열대비, 마이크로 픽셀 패터닝, 인광 OLED(mCBP:Ir(mppy)), AMOLED 디스플레이 공정