



A cracking-assisted transfer printing technology for high-resolution quantum dot light-emitting diode displays

Nature Electronics · 10.1038/s41928-026-01670-9

1. 한 줄 요약

양자점(QD) 층 내 입자 간 응집력을 제어된 균열(cracking) 공정으로 미리 파단시켜 고정밀 픽업·전사를 가능케 하는 균열 보조 전사인쇄(CATP) 기술을 개발하여, 600 nm 픽셀(16,933 ppi)의 EL 발광과 4인치 대면적 균일 픽셀화, 341 ppi 카드뮴프리 풀컬러 능동행렬(AM) QD 디스플레이를 세계 최초 수준으로 구현한 연구이다.

2. 연구 배경

무기 콜로이드 QD-LED는 색순도, 광효율, 전기적 안정성 측면에서 차세대 전계발광(EL) 디스플레이, 특히 AR/VR용 초고해상도 디스플레이의 유력 후보이다. 그러나 대면적·고해상도 풀컬러 구현을 위해서는 수백만 개의 RGB 픽셀을 AM 백플레인 위에 색 간 오염 없이, 균일하고 정밀하게 집적하는 기술이 필수적이다. 기존 스프인코팅은 RGB 교차오염과 색열화, 잉크젯 인쇄는 나노층 계면 불안정성과 수십 μm 이하 픽셀 구현 한계, 기존 전사인쇄(TP)는 마이크로범프 방식의 고해상도 한계와 인타글리오 방식의 대면적 한계라는 상충 문제를 안고 있었다. 또한 규제·환경 문제로 Cd 프리 QD 소재로도 고성능을 달성해야 하는 과제가 병존했다.

3. 핵심 기여

본 연구는 균열 스탬프로 QD 간 측면 반데르발스 응집력(F_{q})을 선택적으로 파단하는 '균열 단계'를 픽업 전에 도입, 종래 TP에서 간과되던 F_{q} 지배 문제를 해결하는 2단계 파괴역학 엔지니어링을 제안했다. 이를 통해 확률적 균열을 픽셀 경계에 공간적으로 국한된 파단으로 전환하여, 600 nm급 초고해상도 EL 픽셀과 4인치(스티칭 시 8인치) 대면적 처리를 동시에 달성했다. 1.5 μm 깊이 뱅크 구조를 갖는 비평탄 LTPS TFT 백플레인 위에 교차오염 없이 RGB 픽셀을 집적, 341 ppi Cd-프리 풀컬러 AM 디스플레이와 플렉서블 청색 AM 디스플레이를 시연했다. 나아가 정밀 나노 계면 제어와 높은 QD 패킹 밀도로 스프인코팅 대비 휘도·수명까지 향상시켰다.

4. 재료·소자 구조

발광층은 Cd-프리 QD로 적색·녹색에 InP/ZnS 코어/셸, 청색에 ZnTeSe/ZnSe/ZnS 코어/셸을 사용했으며 Cd 기반 QD도 비교 검증했다. 소자 구조는 ITO/Ag/ITO 삼층중 반사 양극, PEDOT:PSS 정공주입층, TFB 정공수송층, QD 발광층, ZnMgO 전자수송층, IZO 투명 음극(테스트 소자는 Al 음극)으로 구성된다. 공정 측면에서는 ODTS 자기조립단분자막(SAM) 처리된 도너 기판에 QD를 스프인코팅한 후, 스트라이프 균열 스탬프로 응집망 파단, 마이크로범프 PDMS 스탬프로 고속 박리 픽업, 저속 박리로 TFT 백플레인에 전사하는 3단계 CATP를 수행한다. 백플레인은 74.49 $\mu\text{m} \times 74.49 \mu\text{m}$ 펜타일 픽셀 레이아웃과 1.5 μm 깊이 뱅크 구조를 갖는 1.41인치 LTPS TFT이다.

5. 주요 성능 수치

- 최소 픽셀 크기: 600 nm $\times$ 900 nm (16,933 ppi), EL 발광 확인 (R 9,000 / G 5,330 / B 2,755 cd m^{-2} @8 V)
- 최대 휘도(Cd-프리, CATP, 8 V): 적 40,150 / 녹 22,210 / 청 15,360 cd m^{-2} (SC 대비: 32,583 / 17,850 / 10,650 cd m^{-2})
- 최대 EQE: 적 4.54% / 녹 1.63% / 청 3.70%
- 수명: 적색 T95 254,897시간 @100 cd m^{-2} ; T90 @1,000 cd m^{-2} 기준 R 1.43 h / G 0.7 h / B 0.9 h
- AM 디스플레이: 320 $\times$ 360 픽셀, 1.41인치, 341 ppi, 색재현율 sRGB 124% / DCI-P3 92%
- 공정 성능: 4인치 단일 전사(8단계 스티칭으로 8인치), 정렬 정밀도 <4 μm , 전사 수율 약 100%
- 균열 역학: CATP 시 QD층 접촉단 von Mises 응력 약 $4.5 \times 10 \text{ N m}^{-2}$, 기존 TP 대비 약 2배 인장응력, 27 nm 갭

6. 기존 기술과의 비교

스핀코팅 대비 RGB 교차오염이 없고, 동일 소자 구조에서 휘도가 전 색상에서 20~45% 향상되었으며 필름 균일성(AFM 확인)도 우수하다. 잉크젯 인쇄 기반 Cd-프리 QD-LED(최대 수천 cd m^{-2} , 최소 픽셀 30~65 μm)와 포토리소그래피(최소 1 μm)에 비해 픽셀 크기(0.6 μm)와 휘도 모두 크게 앞선다. 기존 마이크로범프 TP는 Fqq 지배로 소형 픽셀 픽업 수율이 낮고, 인타글리오 TP는 100 nm 패턴(84,666 ppi)은 가능하나 공기 기포 포획으로 대면적·비평탄면 처리가 불가한데, CATP는 마이크로범프 간 공기 배출 경로를 통해 두 한계를 동시에 극복했다. 특히 CATP Cd-프리 소자의 최대 휘도가 기존 TP로 제작된 Cd 기반 소자를 능가한다는 점이 주목할 만하다.

7. 산업 적용 가능성

600 nm 픽셀 EL 구현은 마이크로 LED(~8,500 ppi)나 OLED(~10,000 ppi)를 넘어서는 해상도로, AR/VR용 마이크로디스플레이에 직접적 파급력이 있다. 무용매 건식 공정으로 습식 화학물질과 잔류물이 없고, 4인치 스탬프 단일 전사-테이프 클리닝 재사용·재료 낭비 최소화 등 비용 효율성과 고처리량이 입증되어 양산 친화적이다. Cd-프리 소재로 RoHS 등 규제 대응이 가능하고, 1.5 μm बैं크 구조의 상용 LTPS 백플레인과의 호환성 및 플렉서블 폼팩터 시연은 실제 패널 공정 이식 가능성을 뒷받침한다. 스티칭으로 8인치까지 확장 가능함을 보여 대면적 확장성에 대한 원리적 제약이 없음을 시사한다.

8. 한계와 남은 과제

T95 25만 시간(적색, 100 cd m^{-2})은 인상적이나 고휘도 조건에서는 T90 @1,000 cd m^{-2} 가 1.43시간(적) 이하로, 상용 OLED 대비 고휘도 구동 수명이 여전히 크게 부족하다. 녹색 EQE 1.63% 등 Cd-프리 소자의 효율은 최고 수준 포토리소그래피 보고치(EQE 8~14%)에 미치지 못해 소재·소자 최적화 여지가 크다. 서브마이크로미터·나노 픽셀의 대면적 신뢰성 집적은 스탬프 내구성과 장비 정밀도 향상이 전제되어야 한다고 저자들도 인정했다. 정렬 정밀도 4 μm 는 341 ppi에는 충분하나 수천 ppi급 양산에는 개선이 필요하며, 다단계 전사·스티칭의 택트타임과 수율의 장기 검증도 남은 과제다.

9. 연관 논문

Kim, T.-H. et al., Nat. Photon. 5, 176-182 (2011)은 전사인쇄 기반 풀컬러 QD 디스플레이의 원조 격 연구로 본 논문의 직접적 계보에 해당한다. Meng, T. et al., Nat. Photon. 16, 297-303 (2022)은 초고해상도 QD-LED의 대표 선행 연구이며, Hahm, D. et al., Nat. Nanotechnol. 17, 952-958 (2022)의 이중 리간드 직접 패턴링, Yang, J. et al., Nat. Commun. 11, 2874 (2020)의 광가교 패턴링, Zhao, J. et al., Nat. Commun. 12, 4603 (2021)의 선택적 전기영동 증착(>1,000 ppi)은 경쟁 패턴링 기술로서 비교 맥락을 제공한다. Nam, T. W. et al., Chem. Commun. 59, 2697-2710 (2023)은 초고해상도 QD 패턴링 분야의 리뷰로 기술 지형 파악에 유용하다.

10. 선정 이유

본 논문은 QD 디스플레이 산업화의 최대 병목인 '고해상도 vs 대면적'의 상충 관계를 파괴역학이라는 근본 원리(Fqq 제어)로 해소한 점에서 단순한 성능 경신을 넘어선 방법론적 돌파구다. 600 nm EL 픽셀은 마이크로 LED·OLED가 도달하지 못한 해상도이며, Cd-프리 소재로 패턴형 QD-LED 최고 휘도를 달성해 규제 대응과 성능을 동시에 만족시켰다. 상용 LTPS 백플레인 통합, 플렉서블 시연, 비용·처리량 분석까지 포함되어 학술적 신규성과 산업적 실효성을 모두 갖춘 Nature Electronics 게재작으로, OLED 대비 QD-EL의 경쟁 지형을 가능하는 데 필독 자료다.

11. 키워드 태그

양자점 발광다이오드(QD-LED), 균열 보조 전사인쇄(CATP), 카드뮴프리 QD, 초고해상도 패턴링, 능동행렬 디스플레이, InP/ZnS 코어셸, 파괴역학, AR/VR 마이크로디스플레이