



Brittle materials-based fully stretchable organic light-emitting diodes

Nature Communications · 10.1038/s41467-026-76917-2

1. 한 줄 요약

본 연구는 균열을 억제하는 기존 패러다임을 뒤집어, 계층적 계면 응력 조절(interfacial stress regulation) 구조를 통해 취성 저분자 유기반도체(SMOS) 활성층 내부에 **의도적으로 균일한 수직 관통 나노크랙(≈ 65 nm)을 유도**하는 "능동적 균열 공학(active crack engineering)" 전략을 제안한다. 이를 통해 소자를 나노 간격의 미세 OLED 서브유닛 집합체로 분할하면서도 수직 전하 주입-수송-재결합 경로를 온전히 유지시킨다. 그 결과 최대 휘도 $16,050$ cd/m², 전류효율 85.7 cd/A, EQE 24.7% , 인장 변형률 250% 를 동시에 달성한 완전 신축성 OLED(ns-OLED)를 구현했다. 상용 증착 재료만을 사용해 기존 신축성 발광소자의 효율-신축성 트레이드오프를 근본적으로 해소한 점이 핵심이다.

2. 연구 배경

상용 OLED의 발광층은 색순도·균일도·다층 진공증착 적합성이 우수한 저분자 유기반도체(SMOS)로 구성되며, 고분자계 대비 발광효율이 한 자릿수 이상 높다. 그러나 강한 분자 간 - 적층과 낮은 자유부피로 인해 SMOS 박막은 파단 신율이 통상 1% 미만인 본질적 취성 재료여서, 인장 시 무작위 균열과 급격한 효율 저하가 발생한다. 이를 우회하기 위해 기하학적 신축(주름·강성 아일랜드 + 인터커넥터) 방식과 엘라스토머 블렌딩 기반 본질적 신축(is-OLED) 방식이 발전해 왔으나, 전자는 시각적 균일성과 피부 순응성이 떨어지고 후자는 - 적층 파괴로 효율이 희생된다. 실제로 최고 수준의 SMOS 기반 is-OLED조차 CE 47.9 cd/A, EQE 17.0% , 최대 신축률 60% , 20% 변형에서 100 사이클에 그쳐 상용화 장벽이 크다. 따라서 취성 SMOS를 그대로 쓰면서 신축성과 효율을 동시에 확보하는 새로운 설계 원리가 절실했다.

3. 핵심 기여

첫째, "균열 억제"가 아니라 "균열 유도·제어"라는 발상 전환으로, 나노크랙 밀도를 소자의 공간적 변형능과 교환하고 크랙 사이에 남은 다중 전도 경로로 전하 주입·수송을 유지하는 ns-OLED 개념을 정립했다. 둘째, 고접착·고인성 계면 완충층(IBL, NOA68)을 기능층 상·하부에 삽입해 응력을 균질화·최소화하고, 양극과 음극의 영률·파단신율 비대칭성을 이용해 활성층 내 계면 응력을 조절하여 측방 전위(lateral dislocation) 없는 수직 관통 나노크랙을 형성시키며, 고탄성 적응변형층(ADL)으로 응력 격리 및 균열 전파 지연을 구현하는 3단계 계층적 응력 관리 체계를 제시했다. 셋째, FIB-SEM 단면 관찰과 FEA 시뮬레이션으로 응력 분산·균열 조절·응력 완충의 순차 메커니즘을 정량적으로 검증했다(중앙부 최대 응력 $565.4 \rightarrow 103.2 \rightarrow 32.2$ MPa). 넷째, 맞춤 합성 재료 없이 상용 증착 재료만으로 다색 발광까지 확장 가능한 범용 플랫폼임을 입증했다.

4. 재료·소자 구조

소자 구조는 상부발광형으로 SWCNTs(25 nm)/PEDOT:PSS(15 nm)/HATCN(10 nm)/TAPC(50 nm)/TCTa(10 nm)/TCTa:Ir(ppy)(8 wt%, 10 nm)/26DCzPPy:Ir(ppy)(8 wt%, 10 nm)/B3PYMPM(50 nm)/Liq(1.5 nm)/Al(130 nm)이며, p형 TCTa와 양극성 26DCzPPy를 이중 호스트로 쓴 인광 녹색 발광 시스템이다. IBL로는 UV 경화형 티올-에스터 접착제 NOA68을 사용해 Al과는 Al-S 결합, 양극과는 C=S 결합을 형성하여 기계적으로 맞물린 계면을 만들며, ADL로는 파단신율 860% 의 3M VHB 4918 엘라스토머를 적용했다. 공정은 OTS/Si 기판 위 패터닝된 PEDOT:PSS/SWCNTs 양극에 IBL 스펀코팅·UV 경화 $\rightarrow$ PDMS 라미네이션 후 박리(양극 표면조도 개선) $\rightarrow$ 진공 열증착으로 활성층·Al 음극 형성 $\rightarrow$ 상부 IBL 스펀코팅 $\rightarrow$ ADL 라미네이션 및 PDMS 제거 순으로 진행된다. 각 층의 영률/파단신율은 양극 ≈ 4.4 GPa/ $\approx 10\%$, 활성층 ≈ 12.5 GPa/ $\approx 0.5\%$, Al 음극 ≈ 67.5 GPa/ $\approx 5\%$ 로 설계되어 영률 구배와 응력 비대칭을 형성한다.

5. 주요 성능 수치

- 최대 휘도: 16,050 cd/m²
- 최대 전류효율(CE): 85.7 cd/A
- 최대 외부양자효율(EQE): 24.7%
- 턴온 전압: 2.5 V
- 최대 인장 변형률: 250%(발광영역 기준 약 50% 신장, 전극 면적 250% 확장)
- 250% 변형 시 초기 전류효율 유지율: 83.2%
- 150% 변형 시 휘도 유지율: 84%(발광면 전체 균일도 유지)
- 80% 변형 시 EL 스펙트럼 및 CIE 좌표: (0.34, 0.60) 불변
- 활성층 나노크랙 폭: ≈ 65 nm(가시광 파장보다 작아 광산란 암선 미형성)
- FEA 중앙부 최대 응력: ADL+FL 565.4 MPa $\rightarrow$ ADL+IBL+FL 103.2 MPa $\rightarrow$ ADL+IBL+FL+IBL 32.2 MPa
- 재료 물성: NOA68 인장 84%·인성 17.0 MJ/m³, IBL 영률 127.4 MPa, ADL 영률 15.6 kPa, FL 영률 33.6 GPa
- 내구 변형 조건: 굽힘 반경 0.5 mm, 비틀림·구김·피부 순응·주먹 쥐기에서 동작 유지
- 기존 SOTA is-OLED 대비: CE 47.9 cd/A $\rightarrow$ 85.7 cd/A, EQE 17.0% $\rightarrow$ 24.7%, 신축률 60% $\rightarrow$ 250%

6. 기존 기술과의 비교

기하학적 신축 OLED(gs-OLED)는 고성능 취성 재료와 기존 다층 봉지 기술을 그대로 쓸 수 있으나 주름 구조·강성 아일랜드로 인해 시각적 균일성과 피부 유사 변형성이 희생된다. 본질적 신축 OLED(is-OLED)는 전면 신축성과 단순 공정이 장점이지만, 엘라스토머 혼입이 - 적층을 교란해 효율·신축성 트레이드오프가 구조적으로 불가피하며 최고 성능이 47.9 cd/A / EQE 17.0% / 60% 변형에 머문다. 본 ns-OLED는 블렌딩 없이 순수 SMOS 다층을 유지하므로 동일 재료계 강성 OLED 수준의 효율을 확보하면서, 나노크랙 네트워크로 변형을 수용해 250% 변형과 83.2% 효율 유지를 동시에 달성한다. 또한 IBL 단일 도입만으로는 상부 유기층·AI 전극이 보호되지 못해 다수의 마이크로크랙이 생기지만, 상·하 이중 IBL 구조가 기능층을 캡슐화하여 이 문제를 해소한다는 점을 구조 비교 실험으로 명확히 보였다.

7. 산업 적용 가능성

활성층 전체가 HATCN, TAPC, TCTa, 26DCzPPy, B3PYMPM, Ir(ppy) 등 상용 입수 가능한 재료와 표준 진공 열증착 공정으로 구성되어, 맞춤 합성 신축성 재료에 의존하는 기존 접근 대비 기존 OLED 양산 인프라와의 호환성이 매우 높다. 2.5 V의 낮은 턴온 전압과 16,050 cd/m²의 휘도는 상용 배터리 구동이 가능해 실내 조명·디스플레이 요구 사양을 충족한다. 80% 변형에서도 CIE 좌표가 고정되고 4x5 화소 어레이의 발광 균일도가 유지되므로, 웨어러블 헬스 모니터링용 컨포멀 디스플레이, 인체·곡면 부착형 광치료 패치, 전자피부 및 인간-기계 인터페이스로의 확장이 현실적이다. 다색 발광에 대한 범용성이 확인되어 풀컬러 신축성 디스플레이 로드맵으로 이어질 수 있다.

8. 한계와 남은 과제

250%라는 수치는 전극 면적 기준 총 변형률이며 실제 발광영역 신장은 약 50%로, 정의 방식에 따른 성능 해석에 주의가 필요하고 발광부 자체의 변형 한계 확장은 여전히 과제다. 나노크랙은 곧 활성층의 물리적 파단이므로 반복 인장-이완 사이클에서의 크랙 성장·병합, 장기 구동 수명, 산소·수분 침투에 대한 봉지 신뢰성은 본 발체 범위에서 충분히 제시되지 않았다. 또한 유효 발광 면적이 크랙 밀도에 비례해 감소할 수 있어 고해상도 화소 구현 시 개구율과 화소 간 균일도 확보가 관건이며, 크랙 위치·밀도의 결정론적 제어와 대면적 재현성 검증도 필요하다. VHB·NOA68 기반 다층 라미네이션 공정의 롤투를 확장성 및 TFT 백플레인과의 능동 구동 통합 역시 남은 숙제다.

9. 연관 논문

- (i) 엘라스토머 블렌딩 기반 본질적 신축성 SMOS OLED 연구(CE 47.9 cd/A, EQE 17.0%, 60% 변형 보고 논문, 본문 ref. 26)는 본 연구가 직접 비교·극복 대상으로 삼은 최고 성능 선행 사례다. (ii) 사전 인장 기판 위 주름 구조 및 강성 아일랜드-인터커넥터 방식의 기하학적 신축 OLED 계열 연구(ref. 17-25)는 본 전략의 대안적 패러다임을 대표한다. (iii) PEDOT:PSS/SWCNT 복합 투명 신축 전극 및 계면 접촉 개선에 관한 연구는 본 소자의 양극 설계와 박리 전자

공정의 기반이 된다. (iv) 신축성 QLED, PeLED, LEC, ACEL 관련 연구(ref. 4-7)는 동일 응용 시장을 겨냥한 경쟁 기술군으로, Fig. 2e의 CE-신축률 비교 도표에서 벤치마크로 사용되었다.

10. 선정 이유

"균열은 반드시 억제해야 할 결함"이라는 신축성 광전소자 분야의 30년 통념을 뒤집고, 균열을 설계 변수로 능동 활용해 취성 재료의 한계를 우회한 발상의 독창성이 매우 높다. 무엇보다 상용 인광 재료 스택과 진공 증착 공정을 그대로 유지한 채 EQE 24.7%를 달성함으로써, 신축성 OLED의 효율이 강성 OLED 수준으로 도약할 수 있음을 보인 첫 사례급 결과다. 나노크랙 폭을 가시광 파장 이하로 제어해 광학적 결함이 시인되지 않도록 한 점, FIB-SEM과 FEA로 메커니즘을 정량 검증한 점은 산업적 재현·설계 지침으로서 가치가 크다. OLED 소자 연구자 관점에서 재료 개발이 아닌 '구조·계면 공학'만으로 병목을 푼 접근은 즉시 응용 가능한 실무적 시사점을 제공한다.

11. 키워드 태그

신축성 OLED, 능동적 균열 공학, 나노크랙, 계면 응력 조절, 저분자 유기반도체(SMOS), 인광 Ir(ppy), PEDOT:PSS/SWCNT 신축 전극, 웨어러블 컨포멀 디스플레이