



Circularly polarized bulk-heterojunction memory-computing organic light-emitting diodes for a neural radiance field-based 3D display

Nature Photonics · 10.1038/s41566-026-01966-4

1. 한 줄 요약

비카이랄 발광 고분자와 카이랄 소분자를 혼합한 카이랄 벌크헤테로접합(BHJ) 활성층을 도입해, 하나의 OLED 소자 안에서 '메모리-연산-디스플레이'를 동시에 수행하는 원편광 발광 memory-computing OLED(BHJ-MCOLED)를 구현한 연구다. 최대 휘도 $22,306 \text{ cd m}^{-2}$, 원편광 전계발광 비대칭인자(g_{EL}) 0.92, 스파이크당 1.78 pJ의 초저전력을 동시에 달성하고, 이를 NeRF(neural radiance field) 프레임워크와 결합해 100×180 배열에서 그레이스케일 입체 3D 장면 재구성을 시연했다.

2. 연구 배경

지능형 3D 디스플레이는 대규모 시점 합성·렌더링 연산과 고품질 발광 성능을 동시에 요구하지만, 기존 구조에서는 연산 하드웨어(센서·프로세서·메모리)와 표시 소자가 물리적으로 분리되어 데이터 이동에 따른 지연·전력 손실(von Neumann 병목)이 발생한다. 또한 발광 효율과 화질(편광 순도, 계조 표현) 사이의 트레이드오프가 오래된 제약으로 남아 있었다. 한편 원편광 발광은 안경 없이 좌/우안 시차 분리를 구현할 수 있어 3D 디스플레이의 유력한 물리적 채널로 주목받아 왔으며(콜레스테릭 액정 레이저, 스피트로닉 LED 등), 카이랄 -공액 고분자·초분자 조립을 통한 대() g_{EL} 확보 연구가 축적되어 왔다. 동시에 light-emitting memristor, 발광 시냅스, in-sensor computing 등 '발광과 연산의 융합' 흐름이 형성되었으나, 원편광 특성과 뉴로모픽 연산, 그리고 3D 렌더링 알고리즘을 단일 소자 플랫폼에서 통합한 사례는 없었다. 본 연구는 이 세 요소를 하나의 유기 소자에 수렴시키는 것을 목표로 한다.

3. 핵심 기여

첫째, 비카이랄 발광 고분자 매트릭스에 카이랄 소분자(카이랄 인두서)를 블렌드한 '카이랄 BHJ' 개념을 발광층에 도입하여 초분자 규칙성(supramolecular ordering)과 캐리어 다이내믹스를 동시에 제어하는 조성 공학을 제시했다. 둘째, 이를 통해 시냅스 가중치의 in situ 변조와 다중 전도도 상태(멀티레벨 컨덕턴스)를 확보, OLED를 수동 발광체에서 '메모리-연산-표시' 통합 소자로 전환시켰다. 셋째, 고휘도·고 g_{EL} ·초저 스파이크 에너지를 동시에 만족시켜 효율-화질 트레이드오프를 완화했음을 실증했다. 넷째, 64×64 소자 어레이 수준의 하드웨어 검증으로 균일하고 구별 가능한 5-bit 컨덕턴스 분포와 소자/픽셀 단위 에너지 소비를 정량화했다. 다섯째, 64차원 하드웨어-aware 렌더링용으로 수정한 NeRF 프레임워크(코드 공개)와 결합해 100×180 어레이에서 실제 그레이스케일 입체 영상 재구성을 완성했다.

4. 재료·소자 구조

발광·연산 기능층은 비카이랄 발광 고분자(참고문헌 37의 폴리플루오렌-벤조싸이아다리아졸 계열 발광 고분자 계통)와 카이랄 소분자를 블렌드한 벌크헤테로접합 박막이며, 카이랄 소분자가 고분자 사슬의 나선형 초분자 적층을 유도해 원편광 발광을 발생시킨다. 블렌드 조성비를 정밀 조절함으로써 상 분리 형태(도메인 크기·계면 밀도)와 트랩 분포를 함께 조정하고, 이 계면 트랩에서의 전하 포획/방출이 멀티레벨 컨덕턴스와 시냅스 가소성의 기원으로 제시된다(Fig. 5의 카이랄 인두서 보조 메커니즘). 카이랄 광학·적층 구조는 CD/CPL 분광과 GIWAXS로 검증되어, 분자 배향-키랄광학-전기특성 간 상관관계를 규명했다. 소자는 통상적인 다층 OLED 스택 내에 이 카이랄 BHJ층을 삽입한 2단자 구조로, 전기적 펄스(스�파이크) 입력으로 발광 세기와 전도도를 동시에 프로그래밍한다. 시스템 레벨에서는 64×64 크로스바형 연산 어레이와 100×180 표시 어레이가 각각 연산·표시 기능을 담당한다.

5. 주요 성능 수치

- 최대 휘도: 22,306 cd m⁻²
- 원편광 전계발광 비대칭인자(g_EL): 0.92
- 스파이크당 에너지 소비: 1.78 pJ
- 하드웨어 검증 어레이: 64 × 64 소자
- 컨덕턴스 다중준위: 5-bit(균일·구별 가능한 분포)
- 소자당 에너지 소비: 0.046 nJ
- 픽셀·연산당 에너지 소비: 17.472 nJ
- 3D 표시 어레이 규모: 100 × 180 (그레이스케일 입체 장면 재구성)
- 렌더링 프레임워크: 64차원 hardware-aware 수정 NeRF(가변 baseline 스테레오 뷰 생성, PSNR 평가)

6. 기존 기술과의 비교

기존 원편광 OLED 연구는 카이랄 고분자 자체나 카이랄 소분자 도판트로 g_EL을 높이는 데 집중했지만, 대체로 g_EL과 고휘도가 상충했고 연산 기능은 없었다. 반면 light-emitting memristor, 발광 트랜지스터 시냅스, 페로브스카이트 QD 발광 메모리 등 뉴로모픽 발광 소자들은 연산·기억 기능을 제공하나 편광 자유도와 3D 표시 응용이 결합되지 않았다. 본 연구는 BHJ라는 유기태양전자·OTFT 계열의 형태학 제어 전략을 발광층에 이식해 광학적 카이랄리티와 전기적 다중준위 기억을 동일 층에서 동시에 얻어냈다는 점에서 차별적이다. 또한 홀로그래피·라이트필드·메타표면 기반 3D 디스플레이가 대규모 외부 연산에 의존하는 것과 달리, 표시 소자 자체가 in-display 연산 노드로 동작하여 데이터 이동을 줄인다. 결과적으로 픽셀당 nJ 수준의 렌더링 에너지와 5-bit 계조 연산 정확도를 동일 플랫폼에서 제공하는 점이 기존 접근과의 핵심 차이이다.

7. 산업 적용 가능성

용액 공정 가능한 유기 블렌드 기반이므로 기존 OLED 증착·코팅 인프라 및 플렉시블 기판과의 공정 호환성이 높고, 편광판 없이 좌/우안 분리가 가능해 AR/VR·차량용 HUD·무안경 3D 사인지에서 광학계 단순화와 광 손실 저감을 기대할 수 있다. 픽셀 단위 in-display 연산은 엣지 디바이스에서 렌더링 전력과 대역폭을 줄여, 배터리 제약이 큰 헤드마운트 기기의 지연·발열 개선에 유리하다. 다중준위 컨덕턴스는 계조 보상, 번인 보정, 온-패널 화질 개선(업스케일링·시점 보간) 같은 실용 기능으로 직접 매핑될 수 있다. 다만 현 시연은 100×180 그레이스케일 수준이므로, 상용화까지는 풀컬러화·고해상도화·TFT 백플레인 통합 등의 단계가 필요하다.

8. 한계와 남은 과제

g_EL 0.92는 보고된 값 중 매우 큰 수준으로, 박막 자기흡수·복굴절·산란 등에 의한 측정 인공물 배제와 각도·시야 의존성 검증이 추가로 요구된다. 단색(그레이스케일) 시연에 머물러 있어 RGB 각 색에 대해 동등한 g_EL과 카이랄 초분자 적응을 재현하는 것이 관건이며, 색좌표·색순도 및 EQE 절대값에 대한 정보는 제한적이다. 뉴로모픽 소자로서의 신뢰성 지표—엔듀런스, 리텐션, 소자 간 변동성, 발광 열화와 컨덕턴스 드리프트의 상호작용—이 장기 구동에서 어떻게 유지되는지 확인이 필요하다. 발광 상태와 저장 상태가 물리적으로 결합되어 있어 '표시 중 연산'과 '연산 중 표시'가 서로 간섭할 가능성(읽기 방해, 계조 왜곡)에 대한 구동 스킴 설계도 남은 과제다. 마지막으로 64×64→상용 해상도로의 스케일업 시 배선 저항·sneak path·픽셀 회로 통합 문제와 유기층의 대면적 균일성 확보가 실질적 장벽이다.

9. 연관 논문

Furlan et al., "Chiral materials and mechanisms for circularly polarized light-emitting diodes," Nat. Photon. 18, 658 (2024) — CP-OLED 재료·메커니즘 총론으로 본 연구의 카이랄 설계 맥락을 제공한다. Song et al., "Helical polymers for dissymmetric circularly polarized light imaging," Nature 617, 92 (2023) — 나선형 고분자의 대 g 값 구현과 응용의 직접적 선행 사례다. Chen Z. et al., "Cross-layer transmission realized by light-emitting memristor...", Nat. Commun. 15, 1930 (2024) — 본 논문 공동 제1저자의 발광 멤리스터 기반 심층 신경망 연구로 연산·발광 통합의 기술적 뿌리다. Mildenhall et al., "NeRF," Commun. ACM 65, 99 (2021) 및 Yao et al., "Fully hardware-implemented memristor convolutional neural network," Nature 577, 641 (2020) — 각각 3D 장면

표현 알고리즘과 하드웨어 신경망 구현의 기준선이다. 부가적으로 Zhan et al., Adv. Mater. 33, 2104418 (2021)의 콜레스테릭 액정 원편광 3D 레이저 디스플레이와 2026년 "Electrically programmable circularly polarized three-dimensional display"는 편광 기반 3D 표시의 경쟁 접근으로 비교 대상이다.

10. 선정 이유

OLED를 '빛을 내는 소자'에서 '기억하고 계산하며 편광까지 제어하는 소자'로 재정의한, 디스플레이 아키텍처 관점에서 개념적 파급력이 큰 연구다. 특히 유기태양전지에서 정립된 BHJ 형태학 제어를 발광층 설계에 이식하여 광학(카이랄리티)과 전자(멀티레벨 트랩) 물성을 하나의 조성 파라미터로 동시 최적화한 전략은, 향후 OLED 재료 설계에 이식 가능한 일반적 방법론이다. 22,306 cd m⁻²급 휘도와 g_EL 0.92, pJ급 스파이크 에너지를 함께 제시하며 효율-화질 트레이드오프에 대한 정량적 반례를 내놓았다는 점도 주목할 만하다. 또한 소자→64×64 어레이→NeRF 통합→100×180 표시까지 계층적 실증을 완결하고 코드를 공개해, 산업 R&D가 재현·확장하기 용이한 형태로 제시된 점이 선정 근거다.

11. 키워드 태그

원편광 전계발광(CP-EL), 벌크헤테로접합 발광층, 메모리-컴퓨팅 OLED, 뉴로모픽 시냅스 소자, 다중준위 컨덕턴스(5-bit), 무안경 3D 디스플레이, Neural Radiance Field(NeRF), 카이랄 초분자 조립·GIWAXS