



Electroluminescent photoresists extending lithographic scaling to OLEDs

Nature · 10.1038/s41586-026-11042-0

1. 한 줄 요약

TADF 발광체를 보호하는 코어-셸형 다중팔 스타 고분자를 감광성 발광층으로 설계해 OLED를 자외선 및 전자빔 리소그래피로 직접 패터닝했다. 이 접근법은 110 nm급 형광 패턴과 13.3%의 외부양자효율을 동시에 구현했다.

2. 연구 배경

초고해상도 디스플레이와 실리콘 포토닉스에는 OLED의 미세화 및 CMOS 회로와의 단일체 집적이 필요하지만, 미세금속마스크 증착과 잉크젯 인쇄는 해상도와 오버레이 정밀도가 제한적이다. 일반 포토리소그래피도 용매·현상액과 광화학 반응이 유기 반도체를 손상시키므로 OLED 발광층에 직접 적용하기 어렵다. 초기 감광성 발광 고분자는 단일항 엑시톤만 이용하고 광산 발생제 및 무작위 가교 부위가 소광 중심으로 작용해 EQE가 대체로 2% 미만이었다. 연구진은 발광 코어와 가교 반응 영역을 공간적으로 분리하면 이러한 성능 저하를 억제할 수 있다고 보았다.

3. 핵심 기여

원자이동 라디칼 중합(ATRP)을 이용해 단일 TADF 발광체를 중심에 둔 코어-셸형 다중팔 스타 고분자, 즉 전기발광 포토레지스트(ELPR)를 개발했다. 내부의 N-페닐카바졸계 호스트 셸은 엑시톤을 가두고, 말단 감광 블록만 가교되도록 해 발광 코어와 전하수송 경로를 보호했다. 자외선용 cinnamoyl기와 전자빔용 allyl기를 모듈식으로 도입해 동일한 재료 설계를 마이크로미터 및 나노미터 리소그래피에 확장했다. 또한 세 차례의 연속 자외선 공정과 두 차례의 연속 전자빔 공정을 통해 다색 패턴의 용매 직교성을 입증했다.

4. 재료·소자 구조

적색·녹색·청색 TADF 코어는 공통 DMAC 공여체와 색상별 naphthalimide, TRZ 또는 diphenyl sulfone 수용체로 구성되며, DMAC의 2,7-위치에서 고분자 팔이 성장한다. 첫 번째 블록은 acrylate-functionalized N-phenylcarbazole(ACz) 호스트이고, 두 번째 말단 블록은 자외선 가교용 MAc 또는 전자빔 가교용 MAI이다. 자외선 조사 시 cinnamoyl기의 [2+2] 고리화가, 전자빔 조사 시 allyl기의 사슬 간 가교가 일어나 노광부가 남는 네거티브톤 패턴을 형성한다. OLED 집적 도식은 ITO 전극 위에 패터닝된 ELPR 발광층과 ETL 및 Liq 계면층을 배치한 구조이며, RGB 발광층은 서로 직교적인 연속 현상 공정으로 정의된다.

5. 주요 성능 수치

- 직접 자외선 패터닝 ELPR OLED 최대 EQE: 13.3%
- 탈브롬화 G-ortho-P-deBr OLED 최대 EQE: 30.3% 이상
- G-ortho-P-deBr OLED 최대 전류효율: 75.44 cd A⁻¹
- 전자빔 패턴 최소 L/S 치수: 110/160 nm
- 자외선 패턴 L/S 및 막 두께: 4/2 μm, 36 nm
- G-ortho-ELPR TADF 특성: tot 50%, DF 39%, PF 27.5 ns, DF 1.14 μs

6. 기존 기술과의 비교

초기 직접 포토리소그래피형 고분자 OLED의 EQE가 통상 2% 미만이었던 데 비해, 본 ELPR은 가교 후 13.3%를 기록해 성능 격차를 크게 줄였다. 탈브롬화 전구체 OLED의 30.3% EQE는 브롬 말단 상태의 1.6%보다 약 18배 높고, 모분자를 진공 증착한 대조 TADF OLED의 26.5%도 소폭 상회했다. 미세금속마스크와 잉크젯 인쇄와 달리 표준 리소그래피의 정렬·축소 체계를 활용할 수 있으며, 110 nm까지 직접 패터닝할 수 있다. III-V 발광소자의 격자 불일치, 고온 에피택시 및 미세화 시 측벽 결함 문제와 비교하면 저온·비정질·격자 비의존 공정이라는 장점도 있다.

7. 산업 적용 가능성

가장 직접적인 응용은 AR·VR용 초고해상도 마이크로디스플레이, CMOS 백플레인 위 RGB OLED, 실리콘 포토닉스용 온칩 광원이다. 저온 용액공정과 연속 다색 리소그래피는 CMOS 후공정 호환성과 높은 오버레이 정확도를 제공할 잠재력이 있다. 전자빔 패터닝은 나노포토닉스와 연구용 소량 생산에 유리하며, 자외선 노광 공정은 대면적 병렬 생산으로 확장될 가능성이 더 높다. 따뜻한 아세톤 처리와 후속 금속 리프트오프에도 패턴이 유지된 점은 다른 광학·전자 재료와의 공정 통합 가능성을 뒷받침한다.

8. 한계와 남은 과제

말단 감광 블록을 도입하면 G-ortho-P의 고체 PL이 81%에서 ELPR의 40%로 감소하므로, 가교 밀도와 발광 효율 사이의 절충을 추가로 개선해야 한다. 분자동역학 계산에서도 녹색 코어의 12.5%, 적색 코어의 약 25%가 가교기에 직접 접촉할 가능성이 나타나 완전한 코어 차폐는 아니다. 110 nm 결과는 형광 패턴으로 입증됐을 뿐 동일 크기의 전기적으로 구동되는 OLED 픽셀 성능은 제시되지 않았다. 실제 양산을 위해서는 소자 수명, 효율 롤오프, RGB별 열화, 대면적 균일도, CMOS 웨이퍼 수율 및 전자빔 공정의 낮은 처리량을 검증해야 한다.

9. 연관 논문

Uoyama et al., **Nature** 492, 234-238 (2012)는 TADF를 이용한 고효율 OLED의 기반을 확립해 본 연구의 발광 코어 설계와 직접 연결된다. Hirata et al., **Nature Materials** 14, 330-336 (2015)는 고효율 청색 TADF 전기발광을 보고해 RGB 확장의 핵심 선행 연구에 해당한다. Miller et al., **Nature** 421, 829-833 (2003)와 Gather et al.의 직접 포토리소그래피형 풀컬러 고분자 OLED 연구는 다색 용액공정 ELPR의 초기 사례지만 효율과 구조 제어가 제한적이었다. 2025년 공개된 「Scalable nanopatterning of organic light-emitting diodes beyond the diffraction limit」은 회절한계 이하 OLED 패터닝이라는 측면에서 본 논문과 직접 비교할 수 있는 후속·동시대 연구 축이다.

10. 선정 이유

이 논문은 고효율 OLED 재료와 반도체 리소그래피 사이의 오랜 비호환성을 분자구조 설계로 해결하려 했다는 점에서 중요하다. 특히 발광체, 호스트 및 감광기를 단순 혼합하지 않고 단일 고분자 안에서 위치별로 분리한 설계가 광화학적 소광 문제를 명확히 다룬다. 13.3% EQE, 세 차례의 RGB 공정 및 110 nm 패턴을 함께 제시해 디스플레이 미세화와 CMOS·포토닉스 단일체 집적을 연결한 연구로 선정할 가치가 높다.

11. 키워드 태그

OLED, 전기발광 포토레지스트, TADF, ATRP, 직접 포토리소그래피, 전자빔 리소그래피, CMOS 단일체 집적, 나노패터닝