



Scalable fabrication of high-EQE stretchable OLEDs enabled by residue-controlled laser patterning

npj Flexible Electronics · 10.1038/s41528-026-00629-2

1. 한 줄 요약

희생층(sacrificial layer, SL)으로 355 nm UV 레이저 가공 시 발생하는 잔여물(debris-burr)을 리프트오프로 제거하고 iCVD 기반 pGAD 평탄화층(PL)을 도입해 유리 수준의 표면 조도($R_q \approx 0.34$ nm)를 확보함으로써, EQE 30% 이상의 신축성 OLED를 확장 가능한-scalable) 공정으로 구현한 연구다. 소자 제작 **이전**에 레이저 패터닝을 수행하는 순서 역전이 핵심으로, 이를 통해 셀 미세화 제약을 해소하고 30% 시스템 변형 1,000 사이클 내구성과 강성 유리 소자에 준하는 휘도 감쇠 특성을 동시에 달성했다.

2. 연구 배경

프리폼(free-form) 디스플레이 수요 확대로 신축성 OLED가 주목받고 있으며, 그중 rigid island-serpentine interconnector 구조는 기존 상용 고성능 재료·봉지 기술을 그대로 활용할 수 있어 산업적으로 유력한 접근으로 평가된다. 그러나 신축성 OLED는 유리($R_q < 0.5$ nm) 대비 거친 고분자 기판 표면에 매우 민감해, 표면 조도가 누설전류, 저휘도 EQE, 수명을 직접 악화시킨다. 포토리소그래피 기반 초기 연구들은 봉지 부재로 글로벌박스 외 동작이 불가하거나 공정이 복잡했고, 레이저 패터닝 기반 연구들은 잔여물 문제를 피하려 OLED 증착 **후** 패터닝을 수행해 CO 레이저의 열부하 보호용 데드스페이스가 필요하고 셀 크기가 5 × 5 mm 이상으로 커지는 한계가 있었다. 즉 sub-100 m급 레이저 패터닝 잔여물은 아세톤·에탄올 세정으로 제거되지 않아, 잔여물 제어가 고해상도 신축성 디스플레이 실현의 병목이었다.

3. 핵심 기여

(i) 1 m 두께 포지티브 포토레지스트(GXR-601)를 희생층으로 사용해 레이저 잔여물이 PI 표면에 직접 부착되는 것을 차단하고, 아세톤 스트리핑 시 잔여물을 함께 리프트오프로 제거하는 전략을 제시했다. (ii) iCVD로 증착한 pGAD(GA-co-DMAEMA) 평탄화층이 열경화성·유동 특성으로 gap-filling 평탄화를 수행해 R_q 를 0.34 nm까지 낮췄다. (iii) 이 저조도 기판 위에 TCTA:B3PYMPM 공동 호스트 exciplex + Ir(dmppy-ph)tmd 구조를 광학 최적화 적용해 유리 기판급 EQE 30% 초과를 신축성 플랫폼에서 실현했다. (iv) FEA로 Silbione 계면층 두께·기판 모듈러스 설계창을 정량화하여 serpentine의 out-of-plane 좌굴을 의도적으로 유도, 최대 주응력 변형률을 PI 항복변형($\approx 3.5\%$) 이하인 3.3%로 억제했다. (v) 3 × 5 패시브 매트릭스 어레이 구동까지 시연해 실용 가능성을 입증했다.

4. 재료·소자 구조

기판은 25 m PI(40 × 40 mm 캐리어 고정, 플라즈마 친수화) 위에 SL(GXR-601, 1 m) → 355 nm 펄스 UV 레이저로 island/serpentine 정의 → SL 스트리핑 → iCVD pGAD PL 순서로 준비된다. 소자는 island(2 × 2 mm, 발광면적 1.4 × 1.4 mm) 상의 IZO 150 nm 투명 하부전극과 serpentine(선폭 100 m) 상의 Al 150 nm 배선으로 연결되며, 유기층은 고이동도 TAPC 후막 HTL, TCTA/B3PYMPM 공동 호스트에 인광체 Ir(dmppy-ph)tmd를 도핑한 EML, Al 150 nm 캐소드로 구성된다. 봉지는 ALD AIO와 iCVD pV3D3의 2.5 dyad 다층으로 상·하면 전면이 형성되며, pV3D3는 전극 균열 전파를 억제하는 버퍼로 기능한다. 최종적으로 봉지 완료된 PI 소자를 PDMS(250 m)/Silbione RT gel 4717(400 m) 하이브리드 이중층 일래스토머에 Silbione 고유 점착성만으로(추가 점착제·화학·물리 공정 없이) 라미네이션한다. PM 어레이 시연에는 NPB/Alq 녹색 형광 소자와 5장의 새도마스크가 사용되었다.

5. 주요 성능 수치

- 초기 EQE (100 nits): 30.7%
- 30% 단축 인장 하 EQE: 30.8% (거의 무변화)
- 1,000 사이클(30% 변형) 후 변화: 전류밀도 +0.7%, 휘도 0.1%, EQE 0.8% (6 V, 이완 상태)
- 표면 조도(잔여물 존재, SL 표면): $R_z \approx 124 \text{ nm}$, $R_q \approx 9.11 \text{ nm}$
- SL 스트리핑 후: $R_z \approx 5.71 \text{ nm}$, $R_q \approx 0.67 \text{ nm}$
- PL(pGAD) 증착 후: $R_z \approx 3.53 \text{ nm}$, $R_q \approx 0.34 \text{ nm}$
- Serpentine 최대 주응력 변형률(Silbione 400 m, 30% 시스템 변형): 3.3% (PI 항복 $\approx 3.5\%$)
- 계면 접착에너지(90° peel): PDMS/Silbione 140 J m^{-2} , PI/Silbione 10 J m^{-2}
- FEA 예측 비박리 한계 시스템 변형: 40%
- 수명(30°C , 60% RH, 0.32 mA/cm^2 , 초기 200 cd/m^2): 무봉지 유리 OLED < 50 h 소멸, 봉지 유리 OLED > 150 h, 1,000 사이클 후 신축성 OLED는 봉지 유리 기준과 동등한 감쇠 거동
- 다크스팟: 미신축 소자 168 h까지 거의 없음, 1,000 사이클 소자 72 h까지 제한적
- 어레이 규모: 3×4 (광학·기계 시연), 3×5 패시브 매트릭스

6. 기존 기술과의 비교

기존 레이저 기반 신축성 OLED는 OLED 증착 후 CO 레이저(10.6 m, 광열 지배) 패터닝을 수행해 잔여물 문제는 회피했으나, 유기층·봉지층 열손상을 막기 위한 데드스페이스가 필수여서 셀 크기가 $5 \times 5 \text{ mm}$ 이상으로 제한되었다. 본 연구는 패터닝을 선행시켜 열부하 제약을 원천 제거하고, SL+PL로 잔여물·조도 문제를 해결함으로써 sub-100 m급 미세 패터닝과 고해상도 확장 경로를 열었다. 포토레지스트 기판 기반 리소그래피 선행 연구들은 봉지 부재로 대기 동작·PM 구동이 어려웠고, PI 3D island나 dry-etched parylene 전사 방식은 공정 단계가 복잡했으나, 본 공정은 리소그래피 없이 레이저 1회 + 스펀코팅/iCVD로 단순화된다. 성능 측면에서도 J-V-L 및 EQE 곡선이 유리 기판 강성 기준 소자와 거의 동일하고, 1,000 사이클 후 휘도 감쇠도 봉지 유리 소자에 준해 "성능 희생 없는 신축화"에 근접했다.

7. 산업 적용 가능성

레이저 패터닝은 마스크 불필요·고속·대면적 확장이 용이하여 롤투를 또는 대면적 시트 공정과 적합성이 높고, SL은 기존 포토레지스트 스펀코팅·아세톤 스트립 인프라를 그대로 사용한다. 사용된 유기 재료·IZO·ALD/iCVD 봉지는 모두 기존 리지드/플렉시블 OLED 양산 재료 체계에 속하므로 재료 재검증 부담이 작다. Silbione의 점착성을 이용한 무접착제 라미네이션은 소자 손상 없는 저온·저응력 전사를 가능하게 해 후공정 통합에 유리하다. 인광 오렌지와 형광 녹색(NPB/Alq) 소자 모두 구현되어 색 확장성이 확인되었고, 3×5 PM 구동 시연은 스트레처블 사이니지, 웨어러블·피부 부착형 디스플레이, 광치료/헬스 모니터링 패치로의 조기 적용 가능성을 시사한다.

8. 한계와 남은 과제

1,000 사이클 후 소자는 72 h 이후 다크스팟이 점진적으로 증가해, serpentine에서 소자 에지로 전달된 응력이 봉지막을 열화시키고 발광 유효면적을 주변부부터 축소시킬 가능성이 남아 있다. 수명 비교는 측정 구간(약 150 h 내)에 한정된 상대 비교이며 저자들도 전체 수명 동등성을 주장하지 않으므로, 가속 수명(LT95/LT50) 및 고온·고습 장기 신뢰성 검증이 필요하다. 픽셀 규모가 island $2 \times 2 \text{ mm}$ / 발광 $1.4 \times 1.4 \text{ mm}$, 어레이 3×5 수준으로 개구율과 해상도가 여전히 낮고, PM 구동이어서 대면적 고해상 AM 구동(TFT 백플레인 통합)은 미해결이다. 또한 Silbione 400 m + PDMS 250 m의 두꺼운 저모듈러스 스택은 out-of-plane 좌굴에 의존하므로 표면 요철·두께가 커지고, PI/Silbione 접착에너지 10 J m^{-2} 는 상대적으로 낮아 40% 이상 변형이나 이축·비틀림 복합 변형, 장기 크리프 하에서의 박리 위험을 추가 평가해야 한다.

9. 연관 논문

(1) 본 연구가 기반으로 삼은 Silbione/PDMS 응력 완화 이중층 일래스토머 플랫폼 및 포토레지스트 기판 island-serpentine 신축성 OLED 선행 연구(ref 23)—기계 설계 원형을 제공. (2) OLED 증착 후 CO 레이저

패터닝으로 고신뢰 신축성 OLED를 구현한 일련의 연구(ref 28-30)—본 논문이 극복 대상으로 지목한 셀 크기·열부하 한계의 출처. (3) TCTA:B3PYMPM exciplex 공동 호스트와 Ir(dmppy-ph)tmd의 높은 수평 쌍극자 비율을 이용한 EQE 30% 초과 인광 OLED 광학 최적화 연구(ref 33, 34). (4) ALD AIO / iCVD pV3D3 다층 박막 봉지(ref 35, 36) 및 iCVD 고분자의 유동성 평탄화 특성 연구(ref 37). (5) 리소그래피 PI 3D island-serpentine 고개구율 구조(ref 26)와 dry-etched parylene 전사 hidden-pixel 해상도 향상(ref 27) 연구—경쟁 기하 공정 접근. (6) Serpentine 상호연결체의 응력 집중·좌굴 역학 해석 연구(ref 32, 40, 41).

10. 선정 이유

"고성능(EQE > 30%)"과 "확장 가능 공정(레이저)"이라는 신축성 OLED의 두 상충 요건을 잔여물 제어라는 단일 공정 아이디어로 동시에 해소한 점에서 산업 이전 가치가 크다. 특히 패터닝-증착 순서를 뒤집어 셀 미세화의 근본 제약을 제거한 것은 고해상도 스트레처블 디스플레이 로드맵상 중요한 전환점이다. 조도 수치(9.11 → 0.67 → 0.34 nm), 접착에너지, FEA 설계창, 1,000 사이클 성능 변화, 봉지 수명 비교까지 정량 근거가 체계적으로 제시되어 재현·검증이 용이하다. 또한 ALD/iCVD 봉지와 결합해 글로브박스 밖 대기 동작 및 PM 구동을 시연했다는 점에서, 학술 프로토타입을 넘어 제조 관점 평가가 가능한 드문 사례다.

11. 키워드 태그

스트레처블 OLED, 레이저 패터닝, 희생층 리프트오프, iCVD 평탄화층(pGAD), island-serpentine 구조, 외부양자효율 30%, 박막봉지(ALD AIO/pV3D3), 패시브 매트릭스 어레이