Low-temperature monolithic integration of patterned distributed Bragg reflectors for high-resolution QD-OLED microdisplays

npj Flexible Electronics · 10.1038/s41528-026-00652-3

1. 한 줄 요약

이 논문은 QD-OLED 색변환층 위에 패턴형 DBR을 100 °C 미만에서 직접 집적했다. 청색 누출을 줄이면서 적·녹색 발광을 높여 고해상도 마이크로디스플레이용 공정 가능성을 보였다.

2. 연구 배경

QD-OLED는 청색 OLED의 빛을 양자점(QD)으로 적색·녹색으로 변환하지만, 화소가 작아져 QD층이 얇아지면 흡수되지 않은 청색광이 새어 나와 색순도와 변환 성능이 떨어진다. 기존 컬러필터는 청색 누출을 막는 대신 변환된 적·녹색광도 일부 흡수한다. 청색광을 반사해 QD층으로 되돌리는 DBR은 대안이지만, 다층막의 미세 패터닝과 OLED가 견딜 수 있는 저온 공정의 양립이 어려웠다.

3. 핵심 기여

연구진은 SiN_x/SiO_x DBR의 경계층을 광학적으로 최적화해 청색 반사는 높이고 적·녹색 반사는 낮췄다. 동일한 불소계 건식 식각으로 다층막을 미세 패터닝하고, DBR을 QD-OLED 위에 단일체형으로 집적했다. 분리 적층 시험에서는 뚜렷하지 않았던 적·녹색 발광 증가가 직접 집적 소자에서 관찰돼 광자 재활용의 효과를 뒷받침했다.

4. 재료·소자 구조

실증 소자는 화소 전극과 배선이 형성된 실리콘 기판 위에 상부 발광형 청색 OLED, 박막 봉지층, 투명 화소 정의층(PDL)과 적·녹색 QD 색변환층을 배치한 구조다. QD층 위에는 보호 및 식각 정지용 Al_2O_3 버퍼층을 형성하고, 저온 PECVD로 증착한 SiN_x/SiO_x DBR을 적·녹색 화소에만 남겼다. 청색 화소에서는 DBR을 제거해 청색광이 그대로 방출되도록 했다. DBR은 10쌍의 다층막을 기본으로 하며, 경계층 두께를 별도로 조정해 적·녹색 파장대의 불필요한 반사를 낮췄다.

5. 주요 성능 수치

- 청색 반사율: 455 nm에서 초록 보고값 **95.9%**; 본문에 제시된 유리 기판 위 개질 DBR 측정값 **97.7%**.
- 적·녹색 반사율: 개질 DBR의 측정값은 546 nm에서 **4.8%**, 630 nm에서 **6.2%**.
- 패터닝: 평탄한 시험 기판에서 최소 패턴 약 **4 μm**, 측벽 각도 약 **89°**, 대응 가능한 화소 밀도 최대 **3175 ppi**; 집적 소자에서 확인한 배열은 **200 ppi**.
- 집적 소자 발광: DBR이 없는 소자 대비 적색 **19.7%**, 녹색 **10.7%** 증가.
- 청색 누출·색역: 집적 소자의 청색 누출 약 **90% 감소**, 색역은 **sRGB 대비 120.5%**.
- QD 박막 광안정성: 봉지된 적색·녹색 시료가 450 nm 광조사 **1000시간** 후 초기 PL 피크 강도의 각각 **91.8%**, **88.9%** 유지.

6. 기존 기술과의 비교

컬러필터가 원치 않는 청색광을 흡수하는 방식이라면, 이 DBR은 청색광을 QD층으로 반사하면서 변환된 적·녹색광은 통과시키도록 설계됐다. DBR과 QD-OLED를 따로 만들어 포갠 시험에서는 청색 누출은 줄었지만 적·녹색 출력/입력 비율(OPIP)은 각각 21.4→22.5%, 15.5→15.3%로 큰 개선이 없었다. 연구진은 사이의 공기층이 재흡수를 제한했을 가능성을 제시했으며, 직접 집적 소자에서는 적·녹색 발광 증가를 확인했다. 또한 SiN_x/SiO_x는 식각이 까다로운 TiO_2계 DBR과 달리 단일 불소계 공정으로 패터닝할 수 있었다.

7. 산업 적용 가능성

100 °C 미만의 증착·QD/PDL 공정과 청색 화소만 개방하는 패턴 구조는 실리콘 기반 QD-OLED 마이크로디스플레이 공정에 유용하다. 연구진은 6인치 웨이퍼에서 여러 패턴 배열을 제작하고, 집적 소자의 화소 정렬과 단면 구조를 확인했다. 다만 웨이퍼 수준 제작과 평탄 기판의 초미세 패턴 결과가 곧바로 초고해상도 양산 수율을 입증하는 것은 아니다.

8. 한계와 남은 과제

3175 ppi는 4 μm 패턴으로부터 제시한 대응 가능 밀도이며, 실제 단일체형 소자에서 확인한 화소 배열은 200 ppi다. 집적 소자에서는 QD층의 오목한 표면과 단차 때문에 평탄 기판에서 얻은 89° 측벽보다 식각 형상이 덜 수직적일 수 있다. 1000시간 결과는 봉지된 QD 박막의 광조사 시험으로, 완성 소자의 전기 구동 수명이나 장기 양산 신뢰성을 대신하지 않는다. 초록의 455 nm 반사율 95.9%와 본문 유리 기판 측정값 97.7%는 구분해 해석해야 하며, 제공된 자료만으로 두 값의 측정 조건 차이는 확인할 수 없다.

9. 연관 논문

본문은 QD 색변환층의 청색 누출을 줄이기 위한 산란 입자 연구를 참고문헌 16-18로, DBR 적용 연구를 19-22로 인용한다. 다층 DBR 패터닝의 어려움과 건식 식각 문제는 참고문헌 23·26 등의 선행연구와 연결된다. 제공된 발췌에는 해당 논문들의 서지 정보가 없어 개별 제목이나 연구 결과를 더 특정하지 않는다.

10. 선정 이유

이 연구는 광학 설계, 저온 증착, 미세 식각, OLED 위 직접 집적 및 소자 발광 평가를 하나의 공정 흐름으로 연결한다. 특히 **청색 누출 억제와 적·녹색 발광 증가를 함께 실증**했다는 점이 QD-OLED 마이크로디스플레이 연구에서 중요하다.

11. 키워드 태그

QD-OLED, 마이크로디스플레이, 분포 브래그 반사경, 저온 PECVD, 양자점 색변환, 광자 재활용, 미세 패터닝