

나노다공성 고분자 필름 적용을 통한 OLED 시야각 개선 기술

Improvement of Viewing Angle Dependence of OLED by Using Nanoporous Polymer Film

김남수 · 서민철 | Nam Su Kim · Min Chul Suh

Department of Information Display, Kyung Hee University,
26 Kyungheedaero-Ro, Dongdaemun-Gu, Seoul 02447, Korea
E-mail: mcsuh@khu.ac.kr

1. 서론

산업이 고도로 발달함에 따라 경량박형화로 된 제품 개발이 시장의 중요한 화두가 되고 있다. 이러한 시장의 요구는 디스플레이 영역에도 동일하게 적용되고 있으며, 그 결과로 기존의 LCD(liquid crystal display) 제품에서 OLED(organic light emitting diode) 제품으로 전환되고 있는 추세에 있다. 1987년 Tang과 Van Slyke에 의해 개발된 OLED는 백라이트라는 광원을 투과시켜 화소를 제어하는 LCD에 비해 스스로 빛을 발광하여 화소를 구동하기 때문에 제품의 두께를 줄이는데 유리할 뿐만 아니라 유연 기판 적용이 가능하여 디자인 측면에서도 자유도가 증가하는 이점이 있다. 이러한 이점은 비교적 짧은 역사에도 불구하고 많은 기술 향상과 더불어 제품의 상용화에 이르게 되었지만, 낮은 수명과 효율은 OLED의 빠른 시장 확대 전개에 걸림돌이 되고 있는 상황이다. 특히, 양극과 음극 사이의 유기물로 된 발광층에서 전자와 정공의 결합과정에서 발생된 빛은 그림 1과 같이 광도와 손실, 표면 플라즈몬 손실, 전반사에 의한 손실 등으로 인해 약 20% 내외의 빛만이 외부로 추출되고 있는 상황이므로 이를 극복하기 위한 기술은 많은 학교, 연구소 및 기업체에서 연구되고 있다.¹⁻³

그 대표적인 예로써, 기판 표면에 그림 2와 같이 MLAs(micro lens arrays)를 부착하거나 미세 패턴을 형성하여 스넬의 법칙에 의해 기판 내부로 전반사되는 빛을 억제하여 효율을 올리는 방법이 있는데, 이러한 기술은 화소간 경계를 구분하기 힘든 픽셀 블러라는 부작용을 야기하기 때문에 아직까지 디스플레이 영역에 적용되지 못하고 있다.^{4,5} 이로 인해 기업체는 OLED의 표면 형상을 제어하는 기술보다는 강공진(strong micro cavity) 소자를 개발하여 디스플레이 제품에 적용하고 있는데,

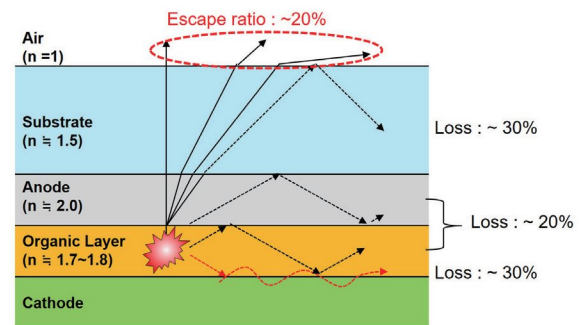


그림 1. OLED 광손실 모드 분석 개념도.

Author



김남수

2002 경북대학교 무기재료공학과 (학사)
2004 경북대학교 무기재료공학과 (석사)
2016-현재 경희대학교 정보디스플레이학과 (박사과정)



서민철

1993 한양대학교 공업화학 (학사)
1995 한국과학기술원 화학과 (석사)
1998 한국과학기술원 화학과 (박사)
1998 UC Berkeley 화학과 (Post-Doc.)
2000 삼성에스디아이 수석연구원
2009 삼성모바일디스플레이 수석연구원
2010-현재 경희대학교 정보디스플레이학과 교수

이러한 강공진 소자는 아래의 Fabry-Perot 공진 수식으로 인해 정면 방향으로의 휘도는 보강 간섭에 의한 공진 효과로 쉽게 상승시킬 수 있지만, 협소한 시야각 휘도 배광 특성과 급격한 시야각 색변동을 유발한다. 그 결과, 강공진 OLED는 TV와 같이 시야각을 중요시하는 대면적 제품에는 적용에 제약이 있어 스마트 위치와 같은 웨어러블 소자나 휴대폰용 제품에 한정되어 양산하고 있다.

$$I(\lambda, \theta) = \frac{Tt \left[1 + R_b + 2\sqrt{R_b} \cos(-\phi_b + \frac{4\pi z \cos(\theta_{org, EML})}{\lambda}) \right]}{(1 - \sqrt{R_b R_t})^2 + 4\sqrt{R_b R_t} \sin^2(\frac{\Delta\phi}{2})} I_0(\lambda)$$

$$; \Delta\phi = -\phi_b - \phi_t + \sum_i \frac{4\pi n_i d_i \cos(\theta_{org, i})}{\lambda}$$

위의 수식에서 $I(\lambda, \theta)$ 는 시야각 θ 에서 파장이 λ 인 빛의

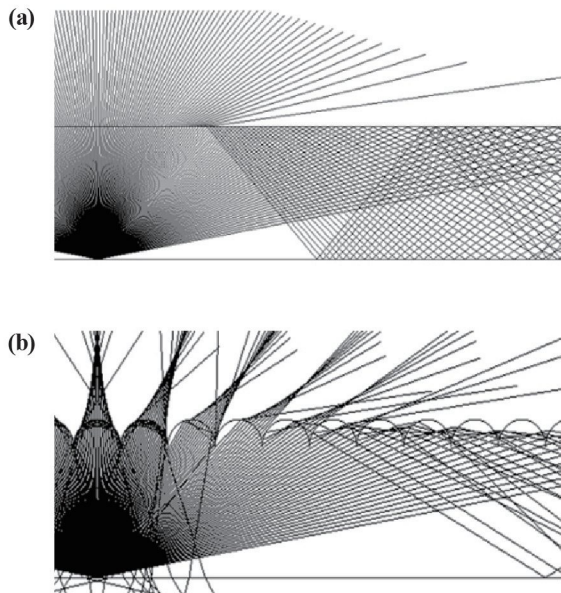


그림 2. 평탄한 표면(a)과 MLA가 부착된 표면(b)의 광추출 모사.

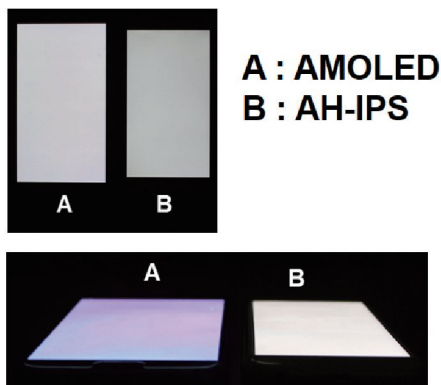


그림 3. AH-IPS로 된 LCD(A)와 강공진 전면 발광 OLED(B)의 시야각 색안정성 비교.

강도를 의미하며, T_t 는 상부 전극 투과율, R_t 는 상부 전극의 반사율, R_b 는 하부 반사 전극의 반사율, ϕ_b 는 상부 전극에서의 위상 변화, ϕ_t 는 하부 반사 전극에서의 위상 변화, z 는 하부 반사 전극과 정공-전자 재결합 위치까지의 거리, $\theta_{org, EML}$ 은 유기물로 된 EML(Emission Material Layer)에서의 방사각, n_i 는 i 번째 층의 굴절률, d_i 는 i 번째 층의 두께, $\theta_{org, i}$ 는 i 번째 유기물 층의 방사각도를 각각 의미한다.

그림 3은 AH-IPS 방식의 LCD 제품과 강공진 소자로 된 OLED의 시야각 특성을 비교한 것으로써 정면에서는 두 제품 모두 흰 색의 색상을 표시하지만 시야각이 증가할수록 강공진 OLED 소자의 색변화량이 AH-IPS 대비하여 더 큰 것을 확인할 수 있다. 또한 강공진 소자는 반사 전극과 반투과 전극 사이의 두께 변동에 따라 색상이 민감하게 바뀌기 때문에 제품간 색감 편차는 시장에서 빈번하게 문제로 제기된다.

이러한 강공진 소자의 시야각 의존성을 억제하기 위해 본 연구그룹에서는 나노 사이즈 크기의 기공을 포함하는 다공성 고분자 필름을 개발하였고 이를 강공진 소자의 적용하여 시야각 의존성 억제력을 연구하였다.

2. 본론

2.1 NPF의 기공 제어 기술

강공진 OLED 소자의 시야각 의존성을 억제하기 위한 필름 개발을 위해서는 다음과 같은 요구 사항을 만족시켜야 한다. 첫째, 필름의 일정한 패턴 크기와 주기성을 가지는 규칙적인 배열은 그림 4와 같이 회절 간섭과 모아레 현상을 야기하여 화질 저하를 일으키기 때문에 불규칙적인 패턴 크기와 배열을 가지는 필름이어야 한다.

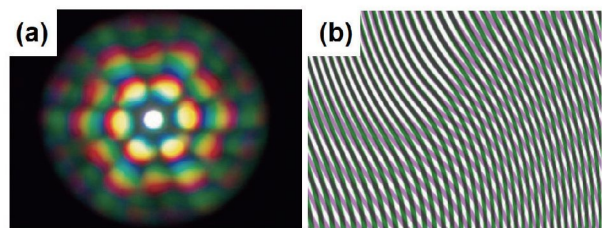


그림 4. 규칙적인 패턴에 의한 회절 간섭(a) 이미지와 모아레 현상(b) 이미지.

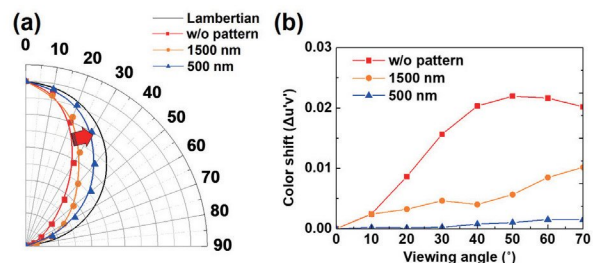


그림 5. 산란 입자 크기별 (a) 시야각 휘도 배광 분포 모사, (b) 시야각 색변화 모사.

둘째, 필름 부착에 따른 픽셀 블러와 강공진 소자의 휘도 저하를 억제하기 위해서는 기공의 크기를 가시 광선의 파장과 유사한 수준으로 조절하여 Mie 산란 특성을 가져야 한다. 그림 5는 Mie 산란의 입자 크기에 따른 시야각 의존성 억제력을 SETFOS 광학 시뮬레이션을 이용하여 확인한 결과로써 Mie 산란 입자의 크기를 1,500 nm, 500 nm로 구분하여 광 확산 특성을 비교하였다. 그 결과, 광 확산층을 적용하지 않은 강공진 OLED 소자의 시야각별 배광 분포를 보게 되면, 상당히 narrow한 형태를 나타내지만 입자의 크기가 작아질수록 Lambertian 배광 분포에 근접하는 경향을 확인할 수 있다. 또한 입자의 크기가 500 nm 일때 시야각에 따른 색차 표 변화량이 가장 적음을 확인할 수가 있었다.

셋째, 선명한 화면과 가독성을 높이기 위해서는 필름의 흐림도(Haze)가 낮아야 한다. 흐림도는 전체 투과되는 빛의 양에서 정면 방향으로만 투과되는 빛의 양을 계산한 것으로 흐림도가 높다는 말은 빛이 필름을 통과할 때 산란되는 양이 많다는 말이며, 산란되는 빛이 많을수록 선명한 화질을 저해하게 된다. 이러한 세 가지 요구 사항을 만족시키기 위해 우리는 그림 6과 같이 고분자의 표면과 내부에 물방울을 침투

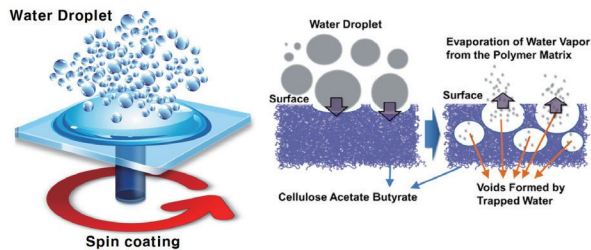


그림 6. NPF 제작 개념도.

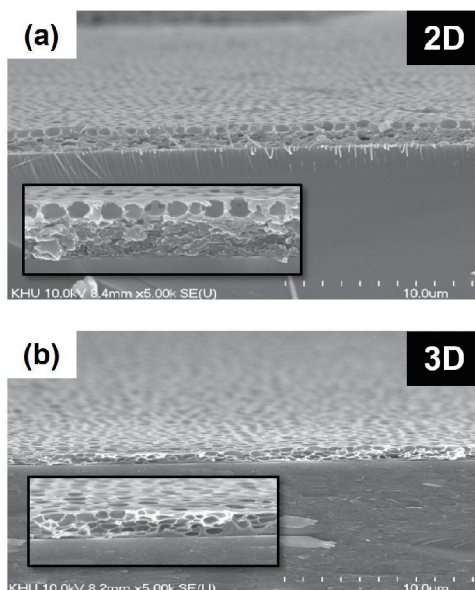


그림 7. (a) 2D NPF의 SEM 이미지, (b) 3D NPF의 SEM 이미지.

시킨 뒤 증발 과정을 통해 형성된 기공을 패턴으로 한 나노 다공성 고분자 필름(nanoporous polymer film)을 개발하였다.⁶

NPF 필름의 기공 분포는 고분자를 녹이기 위한 용매의 종류에 따라 고분자 표면에만 존재하는 2D 구조와 고분자 내부까지 기공이 형성되는 3D 구조를 구분하여 제작할 수 있다. 이러한 기공 분포의 제어는 아래 수식으로 정의되는 Z_0 (계면 에너지 균형 파라미터)로 설명할 수 있는데, Z_0 의 값이 -1과 1 사이일 경우, 2D 구조를 가지게 되며 Z_0 값이 1보다 클 경우 3D 구조를 가지게 된다.⁷

$$Z_0 = \frac{\gamma_w - \gamma_{w/s}}{\gamma_s}$$

위의 수식에서 γ_w 는 물의 표면 에너지, γ_s 는 용매의 표면 에너지, γ_{ws} 는 물의 용매의 계면 에너지를 각각 의미한다. 이러한 특성을 이용하여 우리는 그림 7a와 같이 Tetrahydrofuran ((CH₂)₄O)와 CAB(cellulose acetate butyrate)로 된 용액에 물방울을 침투시켜 2D 구조의 NPF를 제작하였고 Chloroform (CHCl₃)와 CAB로 된 용액에 물방울을 침투시켜 그림 7b에 표시된 것처럼 3D 구조의 NPF를 제작하였다.

또한 NPF의 기공 크기는 고분자의 분자량에 따라 제어가 되는데, 그림 8은 분자량에 따른 기공의 크기를 나타낸다.

Chloroform과 분자량이 16,000 g/mol인 CAB로 된 다공성 필름에서 기공의 직경은 약 300~500 nm 수준이며, Chloroform과 분자량이 70,000 g/mol인 CAB로 된 용액으로 NPF를 제작한 경우, 기공의 직경은 약 1.0~1.2 μm이다. 더 나아가 분자량이 950,000 g/mol인 PMMA를 Chlorobenzene에 녹인 후 NPF를 제작하였을 경우, 기공 크기는 약 3~5 μm임을 확인할 수 있었다. 달리 말하면, 필름의 기저 역할을 하는 고분

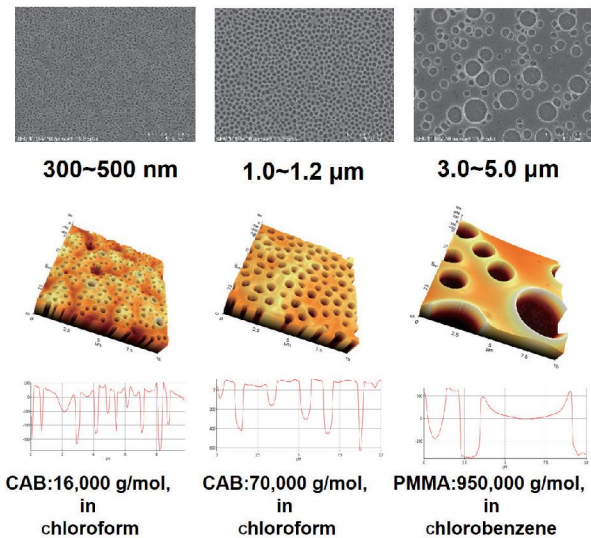


그림 8. 고분자 재료의 분자량에 따른 필름의 기공 SEM 및 AFM 이미지.

자의 점도가 클수록 침투된 물방울이 쉽게 증발되지 못하고 내부에 물방울을 더 크게 응집시켜 기공의 크기가 증가된 것이다. NPF의 기공 밀도는 스핀 코팅의 속도로 제어할 수 있는데, 그림 9는 분자량이 70,000 g/mol인 CAB와 chloroform으로 된 용액을 스핀 코팅 속도를 달리하여 기공 밀도를 분석한 SEM 결과이다.

그림 9의 a, b, c는 각각 스핀 코팅 속도를 1,000 rpm, 2,000 rpm, 3,000 rpm으로 하여 60초 동안 물방울을 주입한 NPF의 기공 밀도를 나타내는데, 스핀 코팅 속도가 가장 낮은 a의 SEM 이미지가 기공의 밀도가 가장 낮음을 알 수 있다.

2.2 강공진 소자의 시야각 의존성 억제

본 연구그룹에서 개발한 호림도 40%로 된 3D NPF의 시야각 의존성 억제력을 평가하기 위해 그림 10a와 같이 2차 강공진 녹색 OLED 소자 구조를 제작하였다.⁷ 전가-광학 특성 비교를 위해 반투과 전극(ITO/Ag/ITO) 대신 투과 전극(ITO)으로 구성된 비공진 녹색 OLED 소자를 추가하였으며, NPF가 부착되지 않은 강공진 녹색 OLED 소자를 Device A, NPF를 부착한 강공진 녹색 OLED 소자를 Device B로 명기하였다. 각 소자의 전류 밀도-전압-휘도 특성은 그림 10b에 나타내었다.

전류 밀도-전압-휘도 결과로부터 1,000 cd/m²에서의 비공진 소자의 전류 효율은 66.9 cd/A, Device A의 전류 효율은 138.9 cd/A, Device B의 전류 효율은 117.8 cd/A를 나타내었다. 즉, 비공진 소자 대비하여 강공진 소자의 전류 효율은 2배 이상 높으며, 강공진 소자에 NPF를 부착하면 전류 효율은 약 15% 저하되지만 비공진 소자 대비하여 Device B의 전류 효율은 여전히 76% 이상 높은 수준을 나타내었다.

그림 11은 NPF의 시야각 의존성 억제력을 평가한 결과를 나타낸다.

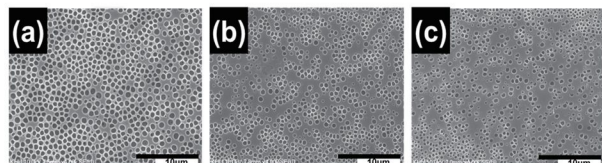


그림 9. 스핀코팅 속도에 따른 NPF의 SEM 이미지: (a) 1,000 rpm, (b) 2,000 rpm, (c) 3,000 rpm.

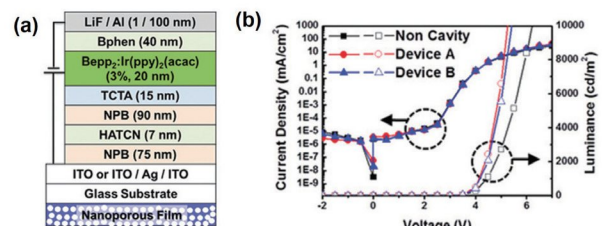


그림 10. (a) 소자 구조, (b) 전류 밀도-전압-휘도 특성.

NPF를 강공진 소자에 부착하더라도 정면 방향으로의 강공진 특성 변동이 크지 않음을 그림 11a를 통해 확인할 수 있었다. 또한 그림 11b를 통해 NPF를 부착한 Device B의 시야각 휘도 배광 특성이 Device A보다 더 Lambertian 배광 특성에 근접함을 확인할 수 있었다. Device A의 시야각별 피크 파장은 26 nm인 반면 Device B는 16 nm 수준으로 10 nm 피크 파장 변동을 억제하는 효과를 그림 11c, d에서 확인할 수 있었다.

NPF의 호림도별 공진 소자의 광학 특성 평가를 위해 그림 12와 같이 1차 공진 녹색 소자를 제작하였다.⁸ 그림에서 Device A는 NPF가 부착되지 않은 기준 소자이며 Device B, Device C는 기준 소자의 봉지 유리 상단에 호림도가 각각 20%, 30%로 된 2D NPF를 부착한 소자이다. 1,000 cd/m² 기준에서 Device A의 전류 효율은 55.7 cd/A이며 Device B와 C는 각각 45.3 cd/A, 41.0 cd/A으로 기준 소자 대비하여 각각 19%, 26% 효율 감소를 나타내었다. 이를 통해 호림도가 증가할수록 공진소자의 효율이 감소하는 것을 확인할 수 있었고, 3D 구조보다 2D의 효율 저하가 더 큼을 확인하였다.

각 소자의 시야각 특성은 그림 13에 표시하였다.

그림 13a는 각 소자의 시야각 휘도 배광 분포를 나타내는 것으로 기준 소자보다 NPF를 부착한 Device B, C의 시야각 휘도 배광이 좀 더 Lambertian 거동을 보이며, 호림도가 큰

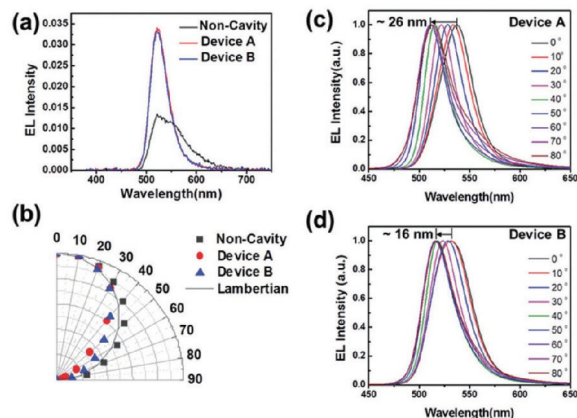


그림 11. (a) EL(Electroluminescence) Spectra 비교, (b) 시야각 휘도 배광 분포, (c) Device A의 시야각별 EL Spectra, (d) Device B의 시야각별 EL Spectra.

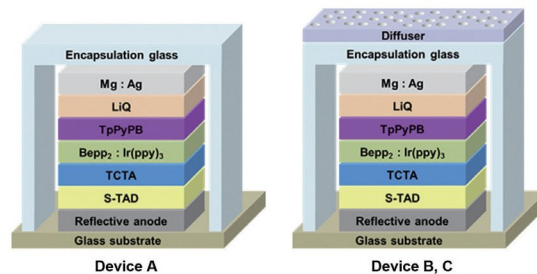


그림 12. 1차 공진 녹색 소자 구조 비교.

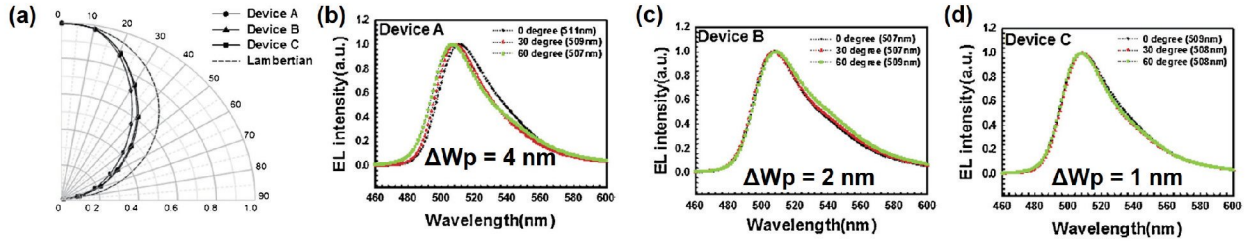


그림 13. (a) 시야각 휘도 배광 분포, (b) Device A의 시야각별 EL spectra, (c) Device B의 시야각별 EL spectra, (d) Device C의 시야각별 EL spectra.

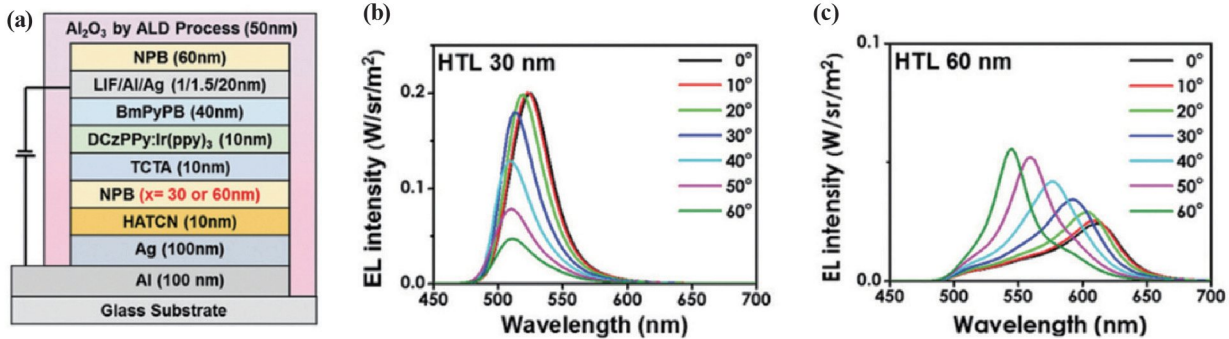


그림 14. (a) 공진 녹색 소자 구조, (b) NPB 30 nm 적용 소자의 시야각별 EL spectra 모사, (c) NPB 60 nm 적용 소자의 시야각별 EL spectra 모사.

Device C가 Device B보다 미세하게 좀 더 넓은 시야각 배광 분포 특성을 보였다. 그림 13b, c, d는 각각 Device A, B, C의 시야각 EL 스펙트럼 변동을 나타낸 것으로써 60° 시야각 범위 내 기준으로 Device A, B, C의 피크 파장 변동은 각각 4 nm, 2 nm, 1 nm를 나타내었다. 이러한 시야각에 따른 EL 스펙트럼 변동 억제에는 시야각별 색변동 억제에도 효과를 주며 그 결과로써, Device A의 시야각 색변동은 0.010이었으나 Device C는 0.003까지 억제할 수 있었다. 시야각 색변동은 CIE 1976 색좌표계를 기준으로 아래 수식으로 계산하였다.

$$\Delta u'v' = \sqrt{(u'_a - u'_0)^2 + (v'_a - v'_0)^2}$$

위의 식에서 u'_a, v'_a 는 각각 시야각 a 에서의 측정된 u', v' 색좌표이며, u'_0, v'_0 는 각각 정면 방향(0°)에서의 측정된 u', v' 색좌표를 나타낸다. 좀 더 다양한 공진 특성에 따른 시야각 의존성 억제력을 확인하기 위해 아래의 그림 14a와 같이 정공 수송 물질인 N,N' -bis(naphthalen-1-yl)- N,N' -bis(phenyl) benzidine(NPB)의 두께를 각각 30 nm와 60 nm 구분하여 강공진 녹색 소자를 제작하였다.⁹

앞서 설명한 Fabry-Perot 공진 특성으로 인해 전극 사이의 유기물 두께가 바뀌면 공진 효과가 최대가 되는 각도가 바뀌게 되는데, 그림 14b의 NPB가 30 nm 두께로 증착된 소자는 0도에서 공진 효과가 최대인 반면, NPB를 60 nm 두께로 증착한 소자는 50° 시야각에서 공진 효과가 최대치가 되는 것을 그림 14c에서 확인할 수 있다. NPB의 두께가 30 nm로 구성된 공진 녹색 소자를 Device A라고 명명하였으며,

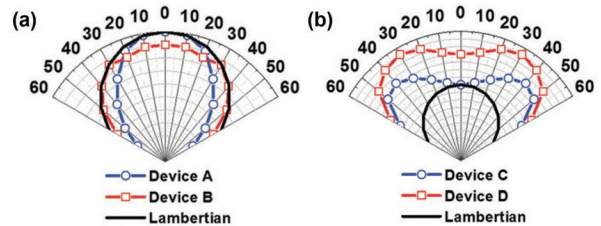


그림 15. (a) Device A, B의 시야각 휘도 배광 분포, (b) Device C, D의 시야각 휘도 배광 분포.

Device A의 알루미늄(Al_2O_3) 원자층 증착법(Atomic Layer Deposition, ALD)으로 구성된 봉지층 위에 3D NPF를 부착한 소자를 Device B로 명명하였다. 이와 동일하게 NPB의 두께가 60 nm로 구성된 공진 녹색 소자를 Device C라고 정의하였고, Device C의 ALD 봉지층 위에 3D NPF를 부착한 소자를 Device D로 명명하였다. Device A, B, C, D의 1,000 cd/m^2 전류 효율은 각각 101.6 cd/A , 87.8 cd/A , 37.9 cd/A , 57.2 cd/A 를 나타내었다. 매우 흥미로운 사실은 정면 방향에서 공진 효과가 최대로 된 Device A에서 3D NPF를 부착하면 전류 효율이 약 14% 감소하지만 50° 시야각에서 공진 효과가 최대치로 된 Device C에 3D NPF를 부착하면 전류 효율이 약 51% 상승한다는 점이다. 이는 소자에서 발광되는 빛들 중 시야각이 큰 영역의 빛들은 ALD 봉지층에 전 반사로 인해 출광되지 못하게 되지만, 3D NPF의 평탄하지 않은 표면 효과로 인해 전반사 손실을 억제하기 때문이다. 공진 특성에 따른 3D 나노다공성고분자의 시야각 휘도 배광 분포 변화는 그림 15에 표시하였다.

정면 방향의 공진 효과가 최대치인 Device A에 3D NPF를 부착하면 배광 분포는 Lambertian 분포에 근접하게 넓어지며, 50°에서 공진 효과가 최대치인 Device C에 3D 나노다공성 필름을 부착하면 시야각 배광 분포가 Lambertian 분포에 근접해 질 뿐만 아니라 휘도도 증가하는 특성을 보인다. 이로 인해 Device A, B, C, D의 1,000 cd/m² 전력 효율은 각각 38.6 lm/W, 49.7 lm/W, 28.2 lm/W, 40.1 lm/W로써 Device B는 Device A 대비하여 29% 상승하였고 Device D는 Device C와 비교하여 42% 상승하였다. 이와 마찬가지로 Device A, B, C, D의 1000 cd/m² 외부 양자 효율은 각각 17.9%, 21.2%, 13.8%, 18.4%로써 Device B는 Device A 대비하여 18% 상승하였고 Device B는 Device A 대비하여 29% 상승하였고 Device D는 Device C와 비교하여 33% 상승하였다. 그림 16은 Device A, B, C, D 각각의 시야각별 EL 스펙트럼 변동을 표시한 결과로써 Device A, B, C, D의 피크 파장 변동은 각각 5 nm, 0 nm, 39 nm, 0 nm를 나타내었다. 이러한 결과는 공진 소자 제작 공정 중 증착 두께의 변동 산포가 크게 증가하더라도 3D NPF로 인해 안정적인 시야각 EL 스펙트럼 변동을 가진다는 것을 의미한다. 그 결과, Device A, B, C, D 시야각 색변동인 $\Delta u'v'$ 은 각각 0.012, 0.002, 0.090, 0.020으로써 3D NPF의 시야각 의존성 억제력이 우수함을 확인하였다.

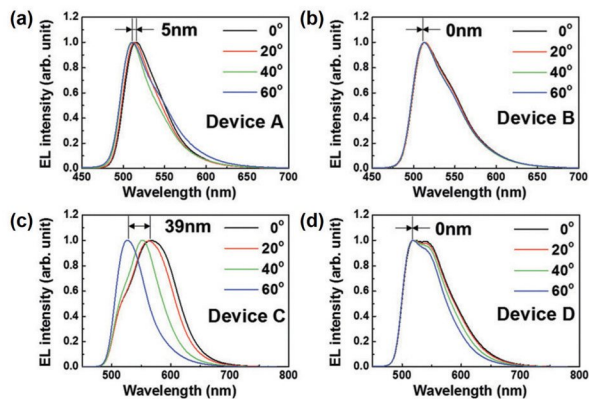


그림 16. (a) Device A의 시야각별 EL spectra, (b) Device B의 시야각별 EL spectra, (c) Device C의 시야각별 EL spectra, (d) Device D의 시야각별 EL spectra.

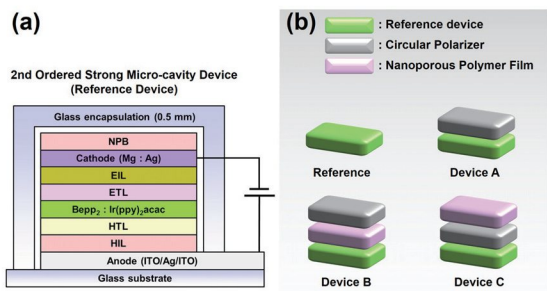


그림 17. (a) 기준 소자 구조 개념도, (b) 구성 조건별 소자 정의.

원형 편광 필름(Circular Polarizer, CP)이 부착된 강공진 소자 조건에서 3D NPF의 시야각 억제력을 평가하기 위해 그림 17의 구성으로 소자를 제작하였다.¹⁰

2차 강공진 녹색 소자로 된 기준 소자의 유리 봉지층 위에 CP 부착한 것을 Device A로 정의하였으며 CP 아래에 NPF가 위치한 소자는 Device B, CP 위에 NPF가 위치한 소자를 Device C로 정의하였다. 표 1은 각 Device의 광학 특성을 요약한 것으로써, Device B와 Device C의 광학 특성이 유사하여 NPF의 CP 부착 위치가 광학 특성에는 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

Device A 대비하여 Device B, C의 전류 효율 감소는 각각 15%, 18%로 감소하였지만 전력 효율 감소는 둘 다 5%만 감소하였는데 이는 NPF가 부착된 소자는 그림 18a처럼 시야각 배광 분포가 Lambertian 분포 방향으로 넓어졌기 때문이다. 그림 18b, c, d는 각각 Device A, B, C의 시야각별 EL Spectra 변동을 나타낸 것으로써 Device A의 피크 파장 변동은 11 nm인 반면, Device B와 C는 둘 다 6 nm만 피크 파장 변동을 가졌다. 이러한 결과로 인해, Device A, B, C의 시야각 $\Delta u'v'$ 은 각각 0.0165, 0.0114, 0.0115였으며 이는 CP가 부착된 강공진 소자에도 NPF의 시야각 의존성 억제력은 유지됨을 알 수가 있었다.

픽셀 블러를 평가하기 위해 우리는 Device A, B, C 외에도 직경이 80 μ m인 MLA를 Device A 위에 부착한 Device D, 두께가 50 μ m인 PET 봉지층으로 구성된 소자 위에 NPF와 CP를 부착한 Device E를 추가하여 비교하였다. 그림 19

표 1. 각 소자별 광학 특성 요약

Item	Device A	Device B	Device C
Current Efficiency	57 cd/A	47 cd/A	49 cd/A
Power Efficiency	29 lm/W	27 lm/W	27 lm/W
$\Delta u'v'$	0,0165	0,0114	0,0115

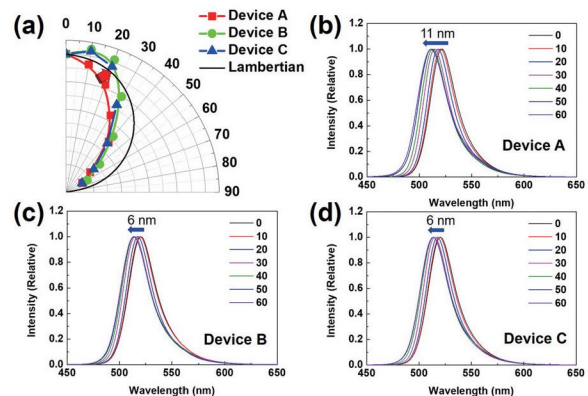


그림 18. (a) 소자별 시야각 휘도 배광 분포, (b) Device A의 시야각별 EL spectra, (c) Device B의 시야각별 EL spectra, (d) Device C의 시야각별 EL spectra.

는 4 mm^2 의 면적을 가지는 픽셀을 CCD 이미지 센서를 가진 카메라로 픽셀 블러를 촬영한 사진 이미지이다.

그림 19의 결과처럼 패턴 사이즈가 $80\mu\text{m}$ 인 MLA를 부착한 Device D의 픽셀 블러 수준이 가장 심한 것을 알 수 있으며, 그 외 소자는 육안으로는 픽셀 블러 수준 차이를 구분하기 힘들었다. 픽셀 블러 수준을 정량적으로 분석하기 위해 그림 20a와 같이 촬영한 사진 이미지의 밝기 정보를 측정 위치 별로 스캔한 뒤 그림 20b에 표시된 픽셀 가장 자리부의 휘도 대비하여 10분의 1 수준 휘도비를 가지는 픽셀 블러 거리를 구하였다.

그 결과, Device A, B, C, D, E의 픽셀 블러 거리는 각각 $180\mu\text{m}$, $350\mu\text{m}$, $387\mu\text{m}$, $670\mu\text{m}$, $190\mu\text{m}$ 이었으며, MLA를 부착한 소자 대비하여 NPF를 부착한 소자는 탁월한 픽셀 블러 억제력을 가지는 것을 확인하였다. 뿐만 아니라, 두께가 얇은 봉지층 위에 NPF를 부착한 Device E는 Device A와 거의 유사한 수준의 픽셀 블러 거리를 가짐을 확인할 수 있었다. 그러나, 그림 21처럼 NPF가 부착한 소자는 필름 자체의 표면 산란 특성으로 명실 조건에서의 검정색 시각 저하를 초래하였다.

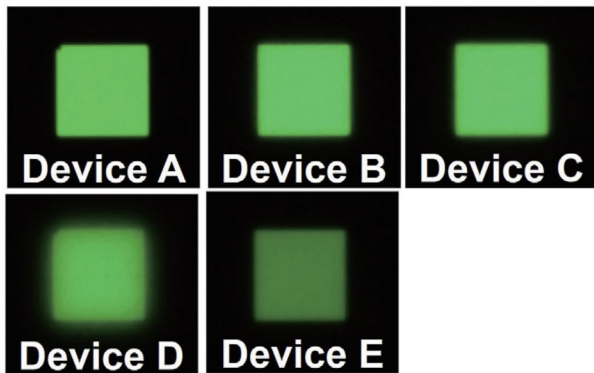


그림 19. 소자별 픽셀 블러 이미지.

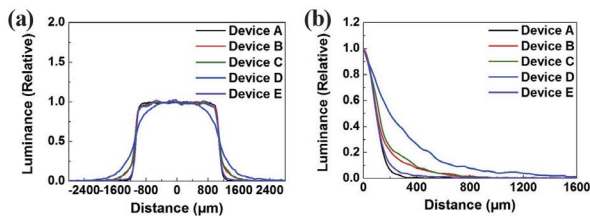


그림 20. (a) 소자별 픽셀 휘도 스캔 결과, (b) 소자별 픽셀 블러 거리 비교.

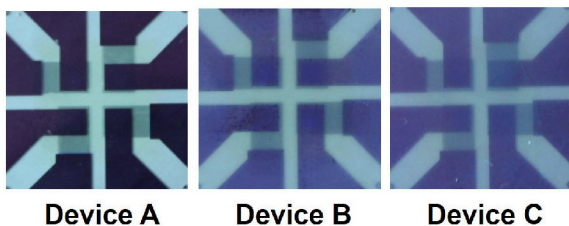


그림 21. 소자별 검정색 시각 비교.

NPF의 검정색 시각 개선을 위해 우리는 그림 22와 같은 공정으로 요철 특성이 있는 표면 위에 평탄층을 구성하였다.¹¹

CAB 재료 자체의 낮은 용매 저항성으로 인해 평탄층을 구성하기 위한 저굴절률 및 고굴절률 용액을 NPF 위에 코팅할 경우 그림 23a와 같이 기공이 사라지고 CAB와 평탄층 물질 간 섞임 현상이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 우리는 CAB와 chloroform 용액에 가교제인 Desmodur® N3300과 촉매제인 DBTDL을 추가하여 그림 23b에 표시된 가교 NPF(x-NPF)를 제작하였다. Desmodur® N3300 첨가된 용액 자체의 탁도 증가와 x-NPF의 기공 직경 크기가 약 $500\sim 1500\text{ nm}$ 수준으로 증가함에 따라 x-NPF 자체의 흐림도는 85%로 상당히 높은 값을 가지게 된다. 그러나 그림 23c의 굴절률이 1.83인 고굴절률 평탄층을 구성하면 흐림도는 45%로 낮아지게 되며, 그림 23d의 굴절률이 1.37인 저굴절 평탄층을 x-NPF 위에 코팅하면 흐림도는 29%까지 낮아지게 된다.

다층 NPF의 광학적 특성을 평가하기 위해 2차 강공진 녹색 소자를 기준 소자로 제작한 뒤 아래와 같은 조건으로 소자를 구분하였다.

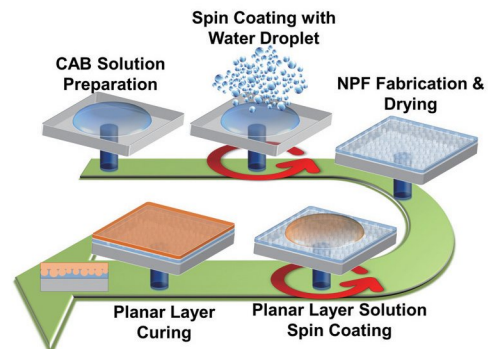


그림 22. 다층 NPF 제작 흐름 개념도.

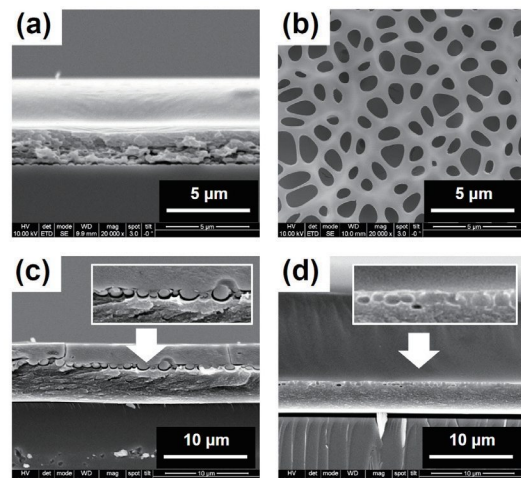


그림 23. (a) 가교되지 않은 NPF 위에 고굴절률 평탄층 코팅한 SEM 이미지, (b) x-NPF SEM 이미지, (c) x-NPF 위에 고굴절률 평탄층 코팅한 SEM 이미지, (d) x-NPF 위에 저굴절률 평탄층 코팅한 SEM 이미지.

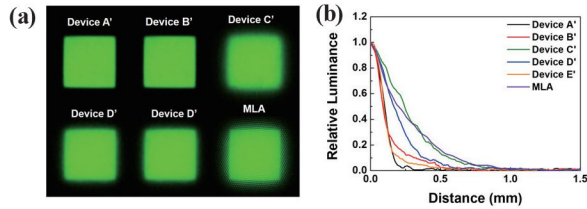


그림 24. (a) 소자별 픽셀 블러 이미지, (b) 소자별 픽셀 블러 거리 비교.

Device A': 기준 소자 + CP

Device B': 기준 소자 + CP + NPF

Device C': 기준 소자 + CP + x-NPF

Device D': 기준 소자 + CP + 고굴절 다층 NPF

Device E': 기준 소자 + CP + 저굴절 다층 NPF

x-NPF를 코팅한 Device C'는 높은 흐림도 특성으로 인해 Device A'와 비교하여 전류 효율과 전력 효율이 각각 37%, 25%의 저하가 발생되었다. 저굴절 평탄층을 코팅한 Device E'는 Device A' 대비 전류 효율과 전력 효율이 각각 8%, 5% 수준의 저하만 발생하였다. 흥미로운 점은 고굴절 평탄층을 코팅한 Device D'는 NPF만 코팅한 Device B'와 유사한 광학 특성을 보이는데 이는 다층 NPF를 제작할 때 평탄층의 굴절률 조절을 통해 시야각 의존성 억제력을 조절할 수 있다는 의미이다. 각각의 소자별 광학 특성은 표 2에 요약하였다. 다층 NPF의 픽셀 블러 수준을 비교하기 위해 그림 24a처럼 CCD 센서를 가진 카메라로 4 mm^2 크기로 된 픽셀의 발광 이미지를 촬영하였다.

육안으로 픽셀 블러 수준을 비교한 결과, MLA를 부착한 소자와 Device C'가 가장 나쁜 수준으로 확인되었으며, Device D'가 Device B'보다 픽셀 블러 수준이 미세하게 나쁜 것으로 확인된다. 이를 정량화하기 위해 그림 24b와 같이 픽셀 블러 거리를 평가한 결과, Device A', B', C', D', E'의 값은 각각 $167 \mu\text{m}$, $325 \mu\text{m}$, $566 \mu\text{m}$, $391 \mu\text{m}$, $207 \mu\text{m}$ 이었으며, MLA를 부착한 소자는 $616 \mu\text{m}$ 의 픽셀 블러 거리를 나타내었다.

그림 25는 각 소자별 검정색 시감 특성을 비교한 이미지로써 x-NPF를 코팅한 Device C'의 검정색 시감 저하가 가장 심함을 확인하였다. 그러나 x-NPF 위에 고굴절률 평탄층을 코팅한 Device D'와 저굴절률 평탄층을 코팅한 Device E'는 검정색 시감 저하가 억제되는 것을 확인할 수 있다. 특히 Device E'의 검정색 시감은 Device A와 근접한 수준까지 확보하였다.

3. 결론

OLED 디스플레이 시장이 확대되기 위해서는 대면적화된 패널의 안정적인 시야각 특성이 확보되어야 하며, 특히 웨어러블 디스플레이와 스트래처블 디스플레이 분야에서의 시야각 색안정성 이슈가 예상되므로 이를 해결할 수 있는 방안

표 2. 각 소자별 광학 특성 요약

Item	Device A'	Device B'	Device C'	Device D'	Device E'
Current Efficiency	57 cd/A	47 cd/A	36 cd/A	47 cd/A	52 cd/A
Power Efficiency	32 lm/W	29 lm/W	24 lm/W	28 lm/W	30 lm/W
$\Delta u'v'$	0,021	0,013	0,009	0,013	0,018
Peak Wavelength Shift	13 nm	8 nm	5 nm	8 nm	11 nm

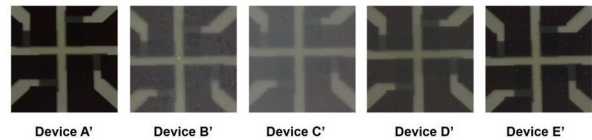


그림 25. 소자별 검정색 시감 특성 비교.

이 마련되어야 한다. NPF는 비교적 저비용으로 강공진 소자의 시야각 의존성을 억제할 수 있을 뿐만 아니라, 다양한 재료와 제조법 개발을 통해 스트래처블 디스플레이의 안정적인 시야각 특성 확보에 유일한 대안으로 주목받고 있다. 또한 이러한 NPF에 UV 차단, 검정색 시감 개선, 선택적 광 투과 및 흡수 등의 기능들을 추가하여 응용 분야를 다변화하는 시도가 필요하다. 이를 위해서는 산업체와 학계, 연구 기관 간의 유기적인 협력 체계를 구축하여 다양한 연구들이 시도되어야 하며 이를 바탕으로 중국의 거센 추격을 뿌리치며 디스플레이 강국의 지위를 더욱 굳건히 다지는 기반을 마련하여야 할 것이다.

참고문헌

1. R. Meerheim, M. Furno, S. Hofmann, B. Lüssem, and K. Leo, *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 253305 (2010).
2. L.H. Smith, E. Wasey, and W.L. Barnes, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 2986 (2004).
3. S. Nowy, B.-C. Krummacher, J. Frischeisen, N.-A. Reinke, and W. Brutting, *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 123109 (2008).
4. M. Thomschke, S. Reineke, B. Lüssem, and K. Leo, *Nano Lett.*, **12**, 424 (2012).
5. S. Möller and S. R. Forrest, *J. Appl. Phys.*, **91**, 3324 (2002).
6. B. W. Lim and M. C. Suh, *Nanoscale*, **6**, 14446 (2014).
7. A. Bolognesi, C. Mercogliano, and S. Yunus, *Langmuir*, **21**(8), 3480 (2005).
8. B. W. Lim, H. S. Jeon, and M. C. Suh, *Synthetic Metals*, **189**, 57 (2014).
9. B. Pyo, C. W. Joo, H. S. Kim, B. H. Kwon, J. I. Lee, J. H. Lee, and M. C. Suh, *Nanoscale*, **8**, 8575 (2016).
10. N. S. Kim, W. Y. Lee, B. Pyo, and M. C. Suh, *Org. Electron.*, **44**, 232 (2017).
11. N. S. Kim, W. Y. Lee, S. H. Jung, and M. C. Suh, *Opt. Express*, **26**(22), 1186 (2018).