

UV-나노임프린트를 이용한 폴리머 광결정구조 OLED의 광학적 특성 시뮬레이션 및 실험적 고찰

Optical Simulation of UV-Nanoimprinted Polymer-Photonic-Crystal OLED and its Light Emission Characteristic

*#심종엽¹, 전소희², 정준호¹, 이응숙¹, 박천홍¹, 김장주², 김세현³

*#Jongyoup Shim (jyshim@kimm.re.kr)¹, Sohee Jeon², Jun-ho Jeong¹, Eung-sug Lee¹, Chun-Hong Park¹, Jang-Joo Kim², Se-Heon Kim³

¹ 한국기계연구원, ² 서울대학교 재료공학부, ³ 카이스트 물리학과

Key words : UV-Nanoimprint, Polymer Photonic-Crystal, OLED, FDTD

1. 서론

최근 유기발광소자(OLED, Organic light-emitting diode)는 차세대 디스플레이 및 조명기술로 각광을 받고 있다[1]. 저 전력소비, 빠른 응답성, 높은 명암비 등 많은 장점을 가지고 있고 최근에는 모바일기에 탑재되는 등 디지털제품에 적용되고 있다. OLED는 또한 대면적 면발광 및 뛰어난 가시성을 요구하는 특별한 디지털표지판 등에 응용이 될 것으로 예견된다. 그러나, OLED의 해결해야 할 문제점 중의 한가지는 구조적으로 20% 정도밖에 되지 않는 빛의 추출률이다. 대부분의 유기발광층에서 생성된 빛은 대부분 ITO (Indium Tin Oxide) 층이나 투명기판층에 guided-mode 형태로 갇혀 빠져 나오지 못하게 된다. 따라서, OLED가 차세대 디스플레이 및 조명 제품으로 실용화 되기 위해서는 이러한 추출률을 향상시키는 것이 중요한 과제 중 하나이다.

지금까지 OLED의 광추출률을 향상시키기 위하여 투명기판의 표면에 광학적 기능을 가지는 형상을 추가하거나 표면처리를 하는 연구들이 수행되어 왔다[2-5]. 또한, 최근에는 2차원 슬랩 광결정구조를 사용하는 것이 광추출률 향상에 효과적이라는 연구결과도 보고 되었다[6-10]. 그러나, 이러한 기술들은 화학적 에칭이나 리소그래피공정을 이용하는 등 복잡하고 고가의 공정을 요구하게 되고 이러한 단점들은 대면적의 OLED 디스플레이나 조명제품으로의 응용에 단점으로 작용할 수 있다. 또한, 최근의 R2R(Roll-to-Roll) 공정에 의한 플렉시블 대면적 OLED 응용에 있어서 대량생산에 적합한 광결정구조의 형성기술이 요구된다 하겠다.

본 연구에서는 광결정구조를 제작하는 새로운 공정을 제안하고 이것을 대면적 OLED에 적용하고자 한다. 제안하는 공정은 에칭이 필요없는 UV-나노임프린트 공정을 이용한다. 전형적인 UV-나노임프린트 공정은 잔류층을 제거하기 위한 목적 및 기판에 패턴을 전사시키기 위한 에칭 목적의 공정이 필요하지만 OLED에 광결정구조의 형성을 목적으로 UV-나노임프린트를 이용하게 되면 이러한 공정은 필요치 않게 된다. OLED의 원리상 잔류층의 존재가 빛의 진행에 영향을 주지 않기 때문이다. 폴리머 광결정구조를 형성하는 공정을 설명하면, 광결정과 역상의 패턴을 가지는 스탬프에 UV-경화 레진을 떨어뜨리고 그 위에 투명기판을 가압시킨다. 그리고, 가압된 상태에서 자외선에 노출시키면 레진은 경화되고 스탬프와 투명기판을 분리하면 폴리머 광결정구조가 형성된 투명기판을 얻게 된다. 최종적으로는 이 광결정구조층 위에 SiNx 층을 PECVD 공정으로 형성하고 그 위에 ITO 및 OLED 유기물을 증착하고 전극공정을 거치면 모든 공정이 완료된다.

2. FDTD 시뮬레이션

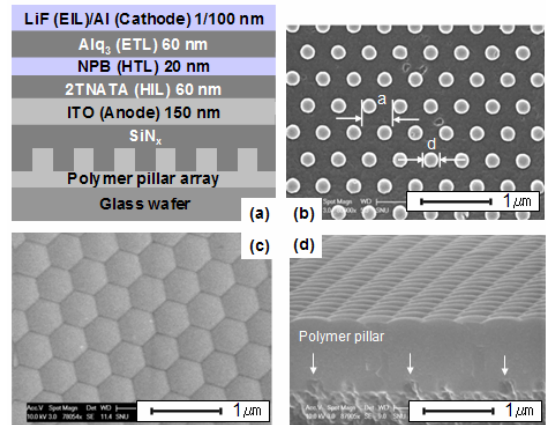


Fig. 1 (a) Vertical structure and materials of OLED (b) SEM image of the imprinted polymer pillars. The pillar array is hexagonal lattice and its lattice constant and diameter are 530 nm and 265 nm, respectively (c) Top view of the 2D polymer/SiNx PC slab. The surface of PC slab is honeycomb shape because buffer layer is deposited on a hexagonal lattice pillar. (d) Cross-sectional view of the PC slab. The polymer pillars in the PC slab can be observed.

이러한 광결정구조 OLED를 제작 및 연구함에 있어서 전기적, 광학적 특성의 예측은 중요하다 하겠다. 특히, 광결정구조의 파라미터에 의해서 추출되는 빛의 특성이 변하게 되므로 수치적으로 이러한 광결정구조의 광학적 특성 연구가 필요하다. 광결정 구조가 1um 이하의 크기를 갖고 있고 OLED 소자의 층두께 등을 고려할 때 FDTD(Finite Difference Time Domain) 방법으로 맥스웰 방정식을 풀어내는 전산모사법이 채택되었다.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{D} &= 0 \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} &= \frac{1}{\epsilon} \nabla \times \vec{H} \\ \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} &= -\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} \end{aligned} \quad (1)$$

구현될 OLED구조를 모사하기 위하여 3D-FDTD 시뮬레이션이 수행되었으며, 시뮬레이션 수치해석 공간은 공기층, 투명기판층, 폴리머 광결정층, SiNx 층, ITO층, 유기소자층 및 전극층으로 나뉜다. 시뮬레이션 도메인 크기는 3.13 × 2.71 × 6.19 μm³ 이다. 폴리머 광결정모양은 실린더배열의 형태로 묘사되고 FE-SEM으로 관찰된 크기와 길이를 이용하여 실제 값을 적용하였다. 시뮬레이션 네개의 수직면에 대해서는 Periodic Boundary 조건을 적용하였으며 공기층에 접한 면에 대해서는 PML (Perfectly Matched Layer) 조건을 적용하였다. OLED 발광을 구현하기 위하여 E-polarized

dipole 진동원을 전자-홀 재결합지점에 무작위로 배열하였으며 그 진동의 방향 및 위상도 모두 무작위로 부여하였고 그 진동원은 511nm를 중심파장으로 하는 gaussian enveloped 펄스형태로 진동하며 실제 발광실험에서 Spectrometer를 이용하여 측정된 파장분포형태를 가지도록 수치 파라미터를 설정하였다. Figure 2에 시뮬레이션을 이용하여 OLED의 광추출량을 평가한 그래프를 보인다. 광결정층이 없는 기준 상태보다 광결정 OLED 소자가 90%가 넘는 광추출 향상을 보임을 알 수 있다. 광결정 OLED의 경우 투명기판의 두께를 세가지로 한 결과를 보이고 있는데 이것은 두께에 의한 시뮬레이션 오차를 평가해 보기 위함이다. 실제 사용되는 투명기판은 soda-lime glass wafer로서 두께가 0.5mm 정도 되므로 시뮬레이션 도메인에 포함시키기에는 너무 큰 물리적 두께이다. 따라서, 투명기판의 두께에 따른 결과의 차이를 비교하여 보았으나 1um 정도 이상의 두께에서는 거의 차이가 보이지 않았고 빛의 파장에 가까워 질수록 조금씩 tunneling effect 등의 효과로 인하여 추출량 수치결과가 다소 증가하는 경향을 보였다.

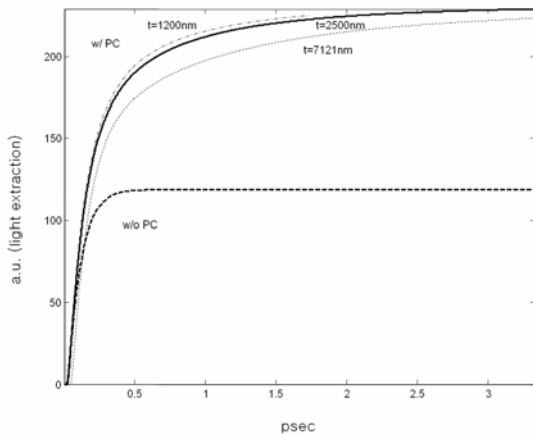


Fig. 2 FDTD simulation results with varying glass thickness. The light extraction enhancement can be said to be constant along with the reasonable thickness variation and simulation shows no interference effect and therefore adopting glass thickness in the calculation is reasonable. The enhancement is about 100% comparing with the conventional OLED.

투명기판의 두께에 대한 영향을 제거하기 위하여 두께를 무한대로 설정하고 투명기판 내부에서 공기로 방출되려는 광량을 비교하여 보았으나 실험치 보다 훨씬 작은 향상률을 보이는 등 실제 현상을 잘 설명하지 못하였다. 이러한 이유는 광결정 투명기판의 광학적 역할에 대하여 기존 연구의 분석방식으로는 설명을 잘 하지 못하는 부분이다. 이러한 현상은 광결정층의 존재가 ITO guided mode 와 더불어 더 커다란 영향으로 판단되는 glass guided mode 의 추출로서 설명이 가능하다는 것을 시뮬레이션을 이용하여 알 수 있었다.

3. OLED 소자 광방출 실험

Figure 3에서는 실제 OLED 소자를 제작하여 광방출특성을 측정한 결과를 보여준다. Integrating Sphere(Labsphere Co., 6" dia)를 사용하여 측정하였고 실제 소자에서는 약 50% 정도의 향상률을 보임을 알 수 있다. 또한, 광결정층의 효과에 의하여 방출 빛의 방사형태가 Lambertian 에서 벗어나 45도 각도에서 많이 방출되는 형태를 보임을 알 수 있다. 광결정층을 이용한 OLED 소자의 특성에서는 전기적 특성 중 전류누설의 문제가 야기될 가능성이 있다. 이러한 누설

전류문제 및 고세장비 패턴의 gap filling 특성, 평탄화를 위하여 추가적인 연구가 연계되어 수행하여지고 있다.

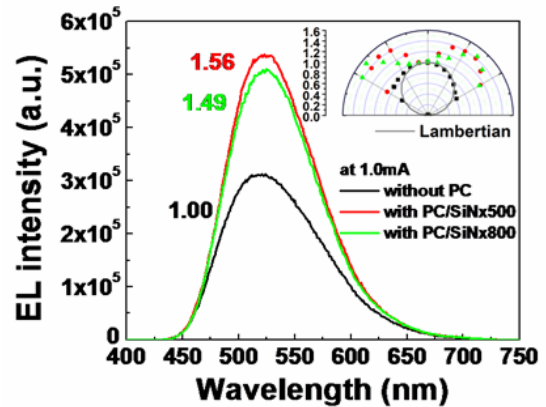


Fig. 3 EL-intensity using integrating sphere measurement. The EL intensity of PC-OLED is increased by a factor about 1.5 compared with reference. Inset: normalized radiation profile. The far field radiation profiles of PC-OLEDs are similar to shape of butterfly wings.

4. 결론

본 연구에서는 폴리머 광결정구조 OLED 라는 새로운 구조의 OLED 소자 및 그 생성 공정으로서 UV-나노임프린트 공정을 제안하였으며, 50% 정도의 광추출률 향상을 이루었다. 또한, FDTD 시뮬레이션 기법을 사용하여 광결정층이 광추출률에 미치는 영향을 모사할 수 있다는 것과 추출된 광의 물리적 원인을 판단하는 기반을 마련하였다.

참고문헌

1. Tang CW and Vanslyke SA(1987) Appl. Phys. Lett. 51: 913-915
2. Madigan CF, Lu MH, and Sturm JC(2000) Appl. Phys. Lett. 76: 1650-1652
3. Schnitzer I and Yablonovitch E(1993) Appl. Phys. Lett. 63: 2174-2176
4. Lu MH and Sturm JC(2001) Appl. Phys. Lett. 78: 1927-1929
5. Moller S and Forrest SR(2002) J. Appl. Phys. 91: 3324-3326
6. Fan S, Villeneuve PR, Joannopoulos JD and Schubert EF(1997) Phys. Rev. Lett. 78: 3294-3297
7. Kim YC, Cho SH, Song YW, Lee YJ, Lee YH, and Do YR(2006) Appl. Phys. Lett. 89: 173502
8. Lee YJ, Kim SH, Huh J, Kim GH, Lee YH, Cho SH, Kim YC and DO YR(2003) Appl. Phys. Lett. 82: 3779-3781
9. Do YR, Kim YC, Song YW, Cho CO, Jeon H, Lee YJ, Kim SH and Lee YH(2003) Adv. Mater. (Weinheim, Ger.) 15: 1214
10. Ishihara K, Fujita M, Matsubara I, Asano T, Noda S, Ohata H, Hirasawa A, Nakada H and Shimoji N(2007) Appl. Phys. Lett. 90: 111114