

투명 OLED 면광원 광 추출 향상 기술

박준범* · 신동균** · 한승조* · 박종운**†

*조선대학교 정보통신공학과

**†한국기술교육대학교 전기·전자·통신공학부

Enhancement of Light Extraction from Transparent OLED Lighting Panels

June Buem Park*, Dong-Kyun Shin**, Seun Gjo Han* and Jong-Woon Park**†

*Dept. of Information and Communication engineering, Chosun University

**†School of Electrical & Electronic & Communication Engineering

Korea University of Technology and Education

ABSTRACT

We have investigated the light extraction efficiency of large-area OLED lighting panels with a microlens array (MLA) or external scattering layer (ESL) by ray tracing simulation. The application of MLA and ESL to transparent OLEDs (TOLEDs) with an auxiliary metal electrode is also studied. It is found that MLA shows higher light extraction efficiency, compared with ESL. However, we have demonstrated that ESL is more suitable for TOLEDs having dual-sided equal light emission. Namely, equal light emission from the front and rear surfaces of TOLED can be achieved by increasing the scattering particle density of ESL. To compensate for a loss in light emission induced by auxiliary metal electrode, we come out with an OLED structure partially covered with MLA at the outer surface of glass substrate, which is aligned with metal electrode. With this scheme, it is observed that the light extraction efficiency can be boosted more than 20% from opaque OLED and 50% from transparent OLED.

Key Words : Transparent OLED, Light Extraction, Microlens Array, Scattering Layer, Ray Tracing Simulation

1. 서 론

최근 에너지 이슈로 인하여 고효율 반도체 광원인 LED(Light emitting diode)와 OLED(Organic LED)가 각광을 받고 있다. LED 점 광원(point source)은 고휘도, 장수명 특성을 갖는 반면 OLED 면 광원(area source)은 초슬림, 유연, 투명 특성을 갖는다[1,2]. 특히 투명 OLED 면광원은 window 기능과 조명 기능을 동시에 갖기 때문에 응용분야가 넓다. 하지만 아직까지 효율 및 수명 문제로 인하여 상용화가 지연되고 있다. 현재 LED 점광원의 효율은 150~200lm/W

로 매우 높아 이미 상용화가 되었지만 OLED 면광원은 상용제품의 효율이 아직 80lm/W로 형광등의 효율과 비슷한 수준이다. 따라서 OLED 면광원 효율을 향상시키기 위하여 내/외부 광 추출(Light extraction) 기술이 필요하다. 광 추출 향상 기술은 소자 내에 갇히는 약 80%에 달하는 빛을 소자 외부로 추출하여 효율을 높일 수 있는 기술이다. OLED 소자는 기판과 air 사이 또는 투명전극과 glass 사이에서 발생하는 전반사(Total internal reflection, TIR) 그리고 측면으로 빛의 waveguide 현상에 의한 소실에 의해 coupling factor가 20%정도로 낮다. OLED에서 발생하는 빛은 세 부류로 나눌 수 있다; 1) external mode (소자 밖으로 바로 나오는 빛), 2) substrate TIR mode, 3) ITO/organic mode. OLED가 램

†E-mail: pjwup@koreatech.ac.kr

버시안(Lambertian) 분포를 갖는다고 가정하면, external mode는 약 19%, TIR mode는 약 35%, ITO/organic mode는 약 46%에 달한다[3]. 따라서 TIR mode와 ITO/organic mode 안에 갇히는 빛을 외부로 추출하는 기술이 많이 개발되고 있다. 특히, microlens array (MLA) [4], Bragg scattering [5], 고굴절 유리기판[6], scattering 구조[7] 등이 각광을 받고 있다. 하지만 투명 OLED 면광원은 투과도 확보를 위하여 이러한 광추출 기술 적용이 제한되어 전력효율이 더 낮으며 cathode 전극이 투명해지면서 발광 균일도 및 패널 신뢰성 문제가 대두된다. 특히, 대면적 투명 OLED 면광원은 이러한 문제를 최소화하기 위하여 투명 ITO 전극 위에 전도도가 우수한 Al, Cu 메탈을 이용하여 보조전극을 형성한다[8]. 이 경우 전류는 메탈 보조전극을 따라 패널 전체에 골고루 분포됨으로써 발광 균일도를 향상시키고 열 분포도 분산시킬 수 있다. 하지만 메탈 보조전극이 있는 영역은 비발광 영역으로 메탈 coverage가 클수록 소자 밖으로 빠져 나오는 빛의 양은 감소한다.

본 논문에서는 MLA와 scattering layer를 이용하여 투명 OLED 면광원 외부 광 추출 향상 기술을 연구하였다. 투과도 손실 없이 광 추출 효율을 높이기 위하여 비발광 영역인 메탈 보조전극과 열라인(aligned)되도록 패터닝된 MLA를 갖는 OLED 소자를 광선 추적 툴(LightTools 7.0)을 이용하여 전산모사하였다. 보조전극이 있는 경우, MLA를 사용하면 약 50%정도 광 추출 효율이 증가함을 발견하였다.

2. 전산모사 방법

Fig 1은 전산모사를 위한 OLED 소자 층 구조 및 물질 특성을 보여준다. OLED 소자는 NPB(50nm)/Alq₃(45nm)의 bilayer 구조를 가지며 두께 150nm의 ITO anode 전극 상에 형성된다. ITO 전극 위에는 150nm 두께의 메탈 보조전극이 형성되어 있으며 전극의 폭은 100 μ m, 전극간 간격은 900 μ m로 설정하였다. 보조전극의 표면은 빛을 100% 반사하는 반사판으로 설정하였다. 소자 전체 면적은 4mm \times 4mm이며 발광층(emitting layer, EML)의 면적은 1mm \times 1mm이다. Cathode 전극은 투과도 60%를 갖는 반투명 Ag/Al 구조로 설정하였다. 전산모사를 위해 Alq₃내 EML에서 나오는 전체 전광속은 100 lm으로 하였으며 유리기판의 발광면(bottom emission)과 투명 cathode(top emission)에서 나오는 ray들을 추적하여 광 추출 효율을 계산하였다. 이때 사용된 총 광선수는 1,000,000개이다. 투과도 손실 없이 광추출 효율을 향상시키기 위해 보조전극과 align되도록 소자 밖 유리기판에 MLA를 배치하였으며 microlens 기본 크기는 직경 50 μ m의 반구 형태를 가진다. 비교를 위하여 외부 유리기판에 크기 1 μ m의 scattering particle(pore, 굴절률 1)이 분산

된 scattering layer를 설정하였다. 유리기판의 투과율은 실제 측정된 값을 입력하였으며 520nm에서 약 91.4%를 보인다.

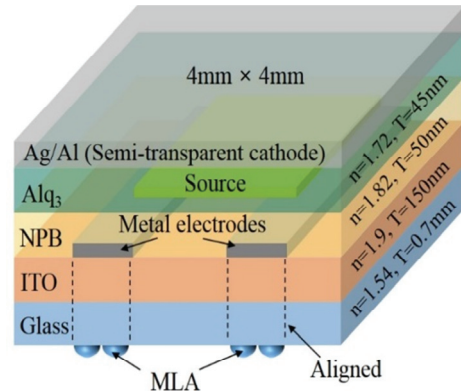


Fig. 1. Schematic view of layer structure used for ray tracing simulation.

3. 결과 및 분석

3.1 MLA 에 의한 광 추출 실험 및 전산모사

우선 사용된 ray tracing tool의 정확도를 검증하기 위하여 MLA를 갖는 불투명 OLED 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교하였다. 실험을 위해 직경 50 μ m를 갖는 반구 형태의 microlens가 배치된 1.6배 MLA 필름(Fig 2, 미래나노텍)을 실제 제작된 OLED 소자의 유리기판 외부 발광면에 부착하여 electroluminescence(EL) intensity를 측정하였다. 또한 전산모사를 위해 Fig 2와 같은 MLA 구조를 유리기판 외부

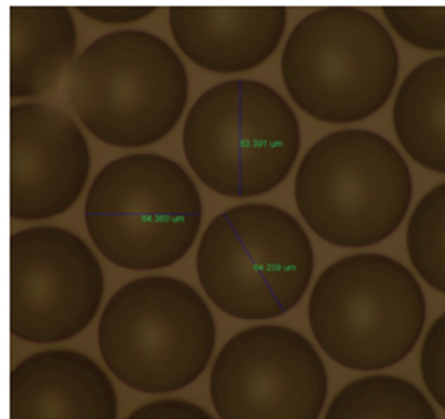


Fig. 2. Magnified image of MLA film used for experiment (radius=32 μ m).

전체에 형성하여 광 추출을 계산하였다. Fig. 3은 ray tracing tool 로 추적된 OLED 소자 외부(bottom emission)로 추출되는 ray들을 보여준다. 육안으로 알 수 있듯이 MLA가 부착된 경우 더 많은 빛이 OLED 소자 밖으로 빠져 나옴을 알 수 있다. Ref. 소자의 luminous flux는 15.495lm인데 반해 MLA가 있는 OLED 소자의 경우 23.42lm로 약 1.51배 증가하였다. 이는 실험 결과(1.6배)와 유사하며 따라서 사용된 ray tracing tool이 OLED 소자 구조 최적화에 사용될 수 있음을 알 수 있다.

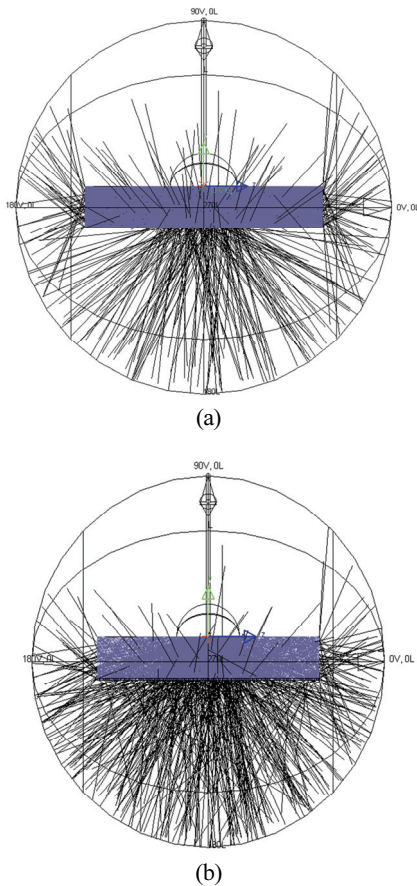


Fig. 3. Ray tracing simulation of light extraction from opaque OLED (a) without and (b) with MLA.

3.2 MLA 와 Scattering Layer 광 추출 비교

외부 광 추출 기술로 주로 micrlens와 scattering layer가 사용된다. 두 기술중 광 추출 효율이 높은 기술을 투명 OLED 면광원에 적용하기 위하여 성능을 비교하는 전산 모사를 수행하였다. Fig. 4는 microlens 크기에 따른 MLA에 의한 광 추출과 산란입자 밀도에 따른 external scattering

layer(ESL)에 의한 광 추출을 보여준다. MLA의 경우 microlens 반경이 작으면서 더 촘촘히 배치될수록 광 추출 효율이 향상될 것으로 기대하였으나 큰 변화가 없음을 알 수 있다. ESL의 경우 산란입자 밀도가 증가할수록 추출되는 빛의 양이 증가하다가 $5 \times 10^7 \text{mm}^{-3}$ 이상에서는 오히려 감소한다. 이는 산란입자 밀도가 일정 이상 높아지면 scattering layer 내에서 산란된 빛이 산란입자에 의해 재산란이 일어나 소자내로 갇히기 때문이다. Fig. 4로부터 광 추출은 ESL보다 MLA가 더 효과적임을 알 수 있다.

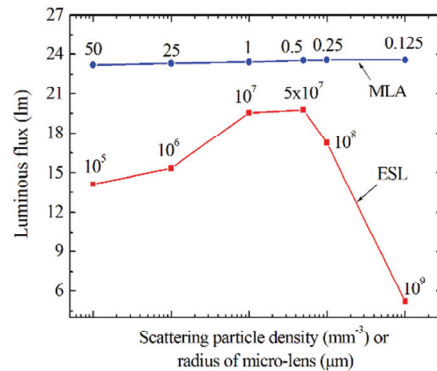


Fig. 4. Light extraction from opaque OLED fully covered with MLA or ESL as a function of the radius of microlens or scattering particle density.

3.3 Scattering layer 에 의한 양면 균등 발광

비록 ESL 구조가 MLA보다 광 추출 효율이 낮지만 투명 OLED 광원에서 필요로 하는 양면 균등 발광 기술에는 더 적합하다. 즉, 산란입자 밀도 조절(증가)을 통하여 bottom emission을 줄이고 top emission을 증가시킴으로써 양면 균등 발광이 가능해진다. 이를 확인하기 위하여 산란입자 증가에 따른 전광속을 전산모사하여 결과를 Fig. 5에 그래프로 나타냈다. 산란입자가 증가할수록 bottom emission은 증가하다 감소하지만 산란된 빛이 cathode 전극쪽으로 방출되면서 top emission은 증가한다. Cathode 투과도가 40%일 때 산란입자 밀도가 $1.3 \times 10^8 \text{mm}^{-3}$ 일 때 top emission과 bottom emission이 같아지는 것을 알 수 있다. Table 1은 반투명 cathode의 반사도에 따른 ESL-OLED의 양면 균등발광 시뮬레이션 결과를 보여준다. 반투명 cathode의 투과도가 증가(반사도가 감소)하면 양면 균등 발광을 얻기 위해 필요한 산란입자 밀도가 감소하며 이를 통해 양면 균등 발광소자의 전체 투과도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 즉, 산란입자 밀도가 높아지면 산란층 자체의 투과도가 낮아지며 또한 haze 하기 때문에 비록 양면 균등 발광을 얻을 수 있다 해도 투명한 양면 균등 발광소자를 만들기는 어렵다.

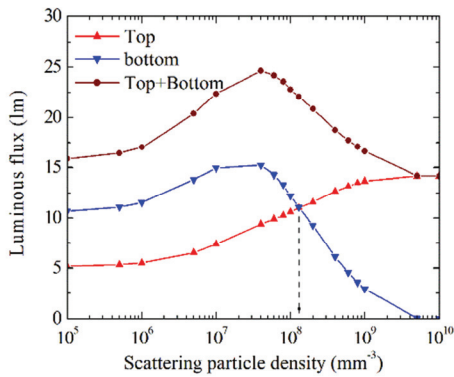


Fig. 5. Light extraction from ESL-OLED as a function of the scattering particle density when the cathode is semi-transparent (reflectivity=40%).

Table 1. Summary of luminous flux from ESL-OLED for different reflectivity of cathode.

Reflectivity of cathode (%)	40	30	20	10
Scattering particle density (mm ⁻³)	1.3×10 ⁸	1.0×10 ⁸	6×10 ⁷	3×10 ⁷
Top (lm)	11.01	11.985	12.56	12.83
Bottom (lm)	11.07	11.55	12.7	13.0
Top + Bottom	22.08	23.5	25.2	25.9
Transmittance of scattering layer	46.4	50.8	58.7	69.2

3.4 보조전극 유무에 따른 전광속 변화

보조전극 유무에 따른 전광속 변화를 전산모사 하였으며 결과를 Table 2에 정리하였다. 불투명 OLED의 bottom emission은 보조전극에 의해 전광속이 15.49lm에서 13.9lm으로 감소하였다. 투명 OLED 소자도 bottom emission이 7.26lm에서 5.88lm으로 감소하였지만 top emission은 메탈 전극의 반사에 의해 오히려 증가하였다. 하지만 전체 전광

Table 2. Summary of luminous flux from OLEDs with or without metal electrode when the cathode is opaque or semi-transparent.

	Emission	Opaque cathode	Semi-transparent cathode
Without metal electrode	Bottom(lm)	15.495	7.2641
	Top(lm)	-	5.6
With metal electrode	Bottom(lm)	13.9	5.88
	Top(lm)	-	6.5

속(bottom + top emission)은 불투명 소자보다 감소하였다. 따라서 보조전극은 metal coverage를 낮추면서 전도도를 높이는 방향으로 설계되어야 한다. 즉, metal coverage가 높으면 전도도는 향상되나 전광속이 감소하게 된다. 하지만 metal coverage가 너무 낮으면 전광속 감소는 줄어들어 전도도가 낮아지는 문제가 발생한다. 실제 패널의 경우 메탈 보조전극은 가급적 시인성이 낮도록 수십 μm폭으로 제작된다.

3.5 보조전극과 얼라인된 MLA

보조전극은 대면적 패널 신뢰성 향상을 위해 대다수 상용 패널에 적용된다. 이로 인한 전광속 손실을 줄이기 위하여 광 추출 기술이 필요하며 Fig 4에서 보듯이 scattering layer보다 MLA가 더 선호된다. 이 경우 MLA를 기판 모든 영역에 붙일 경우 투과도 감소뿐만 아니라 haze해져서 더 이상 투명 패널이라 할 수 없다. 따라서 MLA 필름을 patterning하고 메탈 보조전극과 align하여 부분적으로 유리 기판에 붙여야만 한다. 광 추출 효과를 조사하기 위하여 Fig 1의 구조를 전산모사 하였으며 기판 전 영역에 MLA를 부착한 경우와 비교한 결과를 Table 3에 정리하였다. Partially covered MLA는 bottom & top emission에서 fully covered MLA에 비해 광 추출 효율이 조금 줄어든다. 하지만 MLA가 없는 불투명 OLED bottom emission (Table 2)와 비교하면 전광속이 13.9lm에서 17.1lm으로 20% 이상 증가함을 알 수 있다. 또한 MLA가 없는 투명 OLED bottom emission (Table 2)과 비교하면 전광속이 5.88lm에서 8.8lm으로 50%정도 증가하였다. 이 효과는 metal coverage 또는 발광영역에서 MLA가 차지하는 면적에 비례하여 나타남을 알 수 있다. 따라서 MLA를 보조전극과 align하여 부분적으로 유리 기판에 부착하면 투과도 손실없이 불투명 OLED bottom emission에서는 20%, 투명 OLED에서는 50%정도 광 추출 효율 증가를 얻을 수 있다.

Table 3. Summary of luminous flux from OLEDs fully or partially covered with MLA in the presence of metal electrode when the cathode is opaque or semi-transparent.

	Emission	Opaque cathode	Semi-transparent cathode
Fully covered MLA	Bottom(lm)	23.42	15.2
	Top(lm)	-	8.3
Partially covered MLA	Bottom(lm)	17.117	8.8
	Top(lm)	-	6.9

4. 결 론

본 연구에서는 microlens와 scattering layer를 갖는 OLED 면광원을 ray tracing tool을 이용하여 전산모사 하였으며 투명 OLED 면광원 적용 가능성을 연구하였다. MLA가 external scattering layer보다 더 높은 OLED 광 추출 효율을 보임을 알 수 있었다. 하지만 scattering layer는 산란입자 밀도를 높여 양면 균등 발광 OLED 면광원 구현이 가능함을 알 수 있었다. 또한 보조전극이 사용되는 대면적 OLED 면광원의 경우 metal coverage에 의한 광 손실을 MLA 필름을 보조전극과 align시켜 부착함으로써 패널 투과도 손실 없이 광 추출 효율을 불투명 OLED에서 20%, 투명 OLED에서 50% 정도 증대시킬 수 있음을 발견하였다.

참고문헌

1. S. Reineke, F. Lindner, G. Schwartz, N. Seidler, K. Walzer, B. Lüssem, and K. Leo, "White organic light-emitting diodes with fluorescent tube efficiency," *Nature*, Vol. 459, pp. 234-238, (2009).
2. K. Leo, "Organic LEDs look forward to a bright, white future," *Science*, Vol. 310, pp. 1762-1763, (2005).
3. T. Nakamura, H. Fujii, N. Juni, and N. Tsutsumi, "Enhanced coupling of light from organic electroluminescent device using diffusive particle dispersed high refractive index resin substrate," *Optical Review*, Vol. 13, pp. 104-110, (2006).
4. S. Möller and S. R. Forrest, "Improved light out-coupling in organic light emitting diodes employing ordered microlens arrays," *J. Appl. Phys.*, Vol. 91, pp. 3324-3327, (2002).
5. B. J. Matterson, J. M. Lupton, A. F. Safonov, M. G. Salt, W. L. Barnes and I. D. W. Samuel, "Increased efficiency and controlled light output from a microstructured light-emitting diode," *Adv. Mater.*, Vol. 13, pp. 123-127, (2001).
6. T. Nakamura, N. Tsutsumi, N. Juni and H. Fujii, "Thin-film waveguiding mode light extraction in organic electroluminescent device using high refractive index substrate," *J. Appl. Phys.*, Vol. 97, pp. 054505-1-6, (2005).
7. V. Mann and V. Rastogi, "Dielectric nanoparticles for the enhancement of OLED light extraction efficiency," *Opt. Commun.*, Vol. 387, pp. 202-207, (2017).
8. J. Park, J. Lee, D. Shin, and S. Park "Luminance uniformity of large-area OLEDs with an auxiliary metal electrode," *J. Display Technol.*, Vol. 5, pp. 306-311, (2009).

접수일: 2017년 11월 27일, 심사일: 2017년 12월 20일,
게재확정일: 2017년 12월 20일