

LiF/Al/LiF 구조를 적용한 OLED 소자의 발광 특성

박연석¹, 양재웅¹, 주성후^{1,a}

¹ 대진대학교 신소재공학과

Emission Characteristics of OLEDs Using LiF/Al/LiF Structure

Yeon-Suk Park¹, Jae-Woong Yang¹, and Sung-Hoo Ju^{1,a}

¹ Department of Advanced Materials Science and Engineering, Daejin University, Pocheon 487-711, Korea

(Received May 24, 2010; Revised August 11, 2010; Accepted August 23, 2010)

Abstract: We fabricated red and blue organic light emitting display (OLEDs) which had the two kinds of multi-structure of ITO/HIL/HTL/EML/ETL/LiF/Al and ITO/HIL/HTL/EML/ETL/LiF/Al/LiF. In the case of red OLED that had LiF/Al/LiF structure compared to LiF/Al structure, the current density increased from 4.3 mA/cm² to 7.3 mA/cm², and the brightness increased from 488 cd/m² to 1,023 cd/m² at 7.0 V, and as a result the current efficiency was improved from 11.28 cd/A to 13.95 cd/A. Also in the case of blue OLED that had LiF on Al cathode layer, the current density increased from 1.2 mA/cm² to 1.8 mA/cm², and the brightness increased from 45 cd/m² to 85 cd/m² at 7.0 V, and as a result the current efficiency was improved from 3.69 cd/A to 4.82 cd/A. Through these experimental results it could be suggested that the LiF layer formed on Al prevents the oxidation of Al surface, and the electrode resistance become low with increase of supplied electrons, therefore the brightness and the efficiency are improved from the influence to the well-balanced bonding of electron and hole at emitting layer.

Keywords: OLED, Structure, Cathode, LiF, Efficiency

1. 서 론

차세대 디스플레이로 주목 받고 있는 OLED (organic light emitting display)는 자발광, 빠른 응답속도, 넓은 시야각, 경량, 박형 등의 장점을 가지고 있어 많은 연구가 진행되고 있다. 특히 저분자를 사용하는 OLED는 물질 합성이 용이하고 다층 구조의 제작이 가능하다는 장점을 가지고 있어 이미 상용화 되어 있으며, 기존의 평판디스플레이인 LCD (liquid crystal display)나 PDP (plasma display panel)를 대체할 수 있는 차세대 디스플레이로 주목 받고 있다 [1].

OLED의 특성에서 가장 중요한 요소 중 하나는 발광 효율이다. 발광 효율을 향상시킬 수 있는 방법으로는

내부 양자효율을 증가시키는 방법과 외부 양자효율을 증가시키는 방법이 있다 [2]. 외부 양자효율을 향상시키는 방법으로는 광 방출효율을 증가시키는 연구가 이루어지고 있고, 내부 양자효율을 증가시키는 방법으로는 에너지 준위와 전하의 운반속도를 조절하여 발광층에서 많은 전자와 정공이 결합하도록 하는 방법과, 발광층에서 결합한 전자와 정공이 발광에 많이 기여할 수 있도록 두 종류의 활성제를 사용하거나 인광물질을 사용하는 방법 등에 의하여 발광효율을 증가시키는 방법이 연구되고 있다 [3]. 낮은 인가전압에서 구동이 가능하고 전자의 주입 효율이 우수하여 높은 발광효율을 나타낼 수 있는 방법으로는 주로 1 nm 이하 두께의 LiF와 Al을 적층한 구조를 음극전극으로 사용하고 있다 [4].

a. Corresponding author; sunghooju@daejin.ac.kr

본 연구에서는 발광효율을 증가시키기 위하여 LiF/Al 구조의 OLED에 추가로 LiF 층을 적층한 LiF/Al/LiF 구조를 적용하여 적색과 청색 OLED 소자를 제작하였다. 적색 OLED는 형광 첨가물과 인광 첨가물을 동시에 증착한 발광층을 사용하였고, 청색 OLED는 형광물질을 증착한 발광층을 사용하여 제작하였다. 제작한 OLED 소자의 발광 특성은 인가전압에 대한 전류밀도, 인가전압에 대한 발광휘도와 발광 스펙트럼을 측정하였다.

2. 실험 방법

OLED를 제작하기 위하여 양극전극으로 두께가 150 nm이고, 면저항이 10 Ω/□인 ITO가 증착된 100 mm×100 mm의 유리 기판을 사용하였다. 감광제를 사용하여 ITO의 패턴을 형성하고, 그 위에 발광 면적이 3 mm×3 mm가 되도록 감광제를 사용하여 절연막을 형성하였다. 제작된 기판은 습식 방법에 의한 표면 세척과 대기 분위기에서 UV를 조사하였다. 유기물 증착을 위하여 진공 용기는 2.0×10⁻⁷ torr까지 배기한 후, 정공 주입층으로 ELM_HIL 물질을 2 Å/s의 증착 속도로 50 nm를 증착하고, 정공 수송층으로 ELM_HTL을 2 Å/s의 증착 속도로 30 nm 두께로 증착하였다. 발광층으로는 형광모체인 CBP에 활성제로 rubrene과 GDI4349를 동시에 증착법에 의하여 증착하여 적색 발광을 하도록 한 소자와 청색 형광모체인 BH-002를 사용하여 청색 발광을 하도록 한 소자를 제작하였다. 적색 OLED 제작 시 CBP에 첨가한 rubrene과 GDI4349는 선행 실험을 통하여 최적화된 3 vol.%의 rubrene과 8 vol.%의 GDI4349를 첨가하여 제작하였다 [5]. 발광층 형성 시 증착 속도는 2 Å/s로 하여 30 nm를 형성하였다. 전자 수송층으로는 적색 소자의 경우 BAq를 청색 소자의 경우 Alq₃를 2 Å/s의 증착 속도로 30 nm 증착하였다. 다음으로 LiF를 0.7 nm, Al을 100 nm 증착하여 기준 소자를 완성하였고, LiF 층의 추가적인 형성에 의한 특성 비교를 위하여 기준 소자 위에 150 nm의 LiF를 추가적으로 증착하였다. 이와 같이 제작된 소자의 완성된 구조는 ITO(150 nm)/ELM_HIL(50 nm)/ELM_HTL(30 nm)/CBP : rubrene, GDI4349(30 nm)/BAq(30 nm)/LiF(0.7 nm)/Al(100 nm)의 적색소자 "Red_1"과, ITO(150 nm)/ELM_HIL(50 nm)/ELM_HTL(30 nm)/BH-002(30 nm)/Alq(40 nm)/LiF(0.7 nm)/Al(100 nm)의 청색소자 "Blue_1"를 제작하였다. 또한 LiF를 추가적

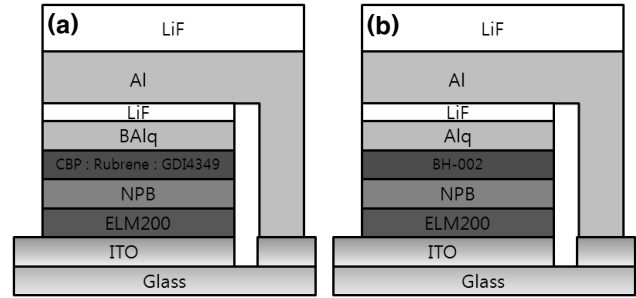


Fig. 1. OLED of LiF/Al/LiF structure. (a) red OLED, (b) blue OLED

으로 증착하여 ITO(150 nm)/ELM_HIL(50 nm)/ELM_HTL(30 nm)/CBP : rubrene, GDI4349(30 nm)/BAq(30 nm)/LiF(0.7 nm)/Al(100 nm)/LiF(150 nm) 구조의 적색소자 "Red_2"와 ITO(150 nm)/ELM_HIL(50 nm)/ELM_HTL(30 nm)/BH-002(30 nm)/Alq(40 nm)/LiF(0.7 nm)/Al(100 nm)/LiF(150 nm) 구조의 청색소자 "Blue_2"를 제작하였으며 Red_2(a) 및 Blue_2(b)의 구조를 그림 1에 표시하였다.

제작된 OLED 소자의 발광 특성을 관측하기 위한 전원 인가장치로는 Keithley의 2400 SourceMeter[®]를 사용하였고, 인가된 전압과 전류에 의해 발광되는 빛의 발광휘도 및 발광 스펙트럼은 Light Measurement Solution사의 PR-650을 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 토론

형광 모체로 CBP에 rubrene과 GDI4349를 동시에 증착하여 제작한 적색 OLED "Red_1", Red_1 소자 위에 150 nm의 LiF를 증착하여 제작한 적색 OLED "Red_2", 형광 모체로 BH-002를 사용하여 제작한 청색 OLED "Blue_1"과 Blue_1 소자 위에 150 nm의 LiF를 증착하여 제작한 청색 OLED "Blue_2"의 인가전압에 대한 전류밀도를 측정하여 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 인가전압이 증가함에 따라 4가지 종류의 소자에서 모두 전류밀도가 급격히 상승하고 있음을 알 수 있다. 인가전압이 7 V인 경우 적색 OLED에 흐르는 전류는 "Red_1"의 경우 4.3 mA/cm²의 전류가 흐르나 "Red_2"의 경우 7.3 mA/cm²의 전류가 흘러 추가적인 LiF층의 형성에 의하여 적색 소자의 경우 동일한 인가전압에서 약 1.7배 정도의 전류가 많이 흐르고 있음을 알 수 있었다. 또한 인가전압이

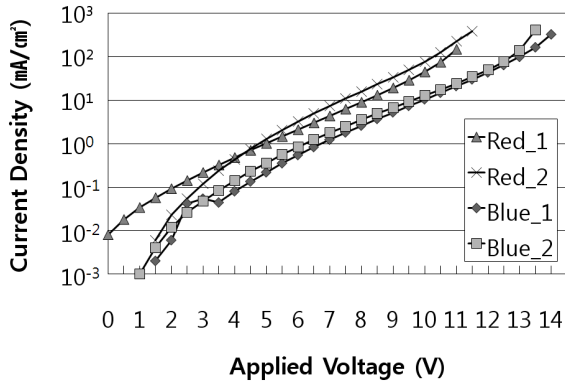


Fig. 2. Current density vs. applied voltage characteristics of OLED.

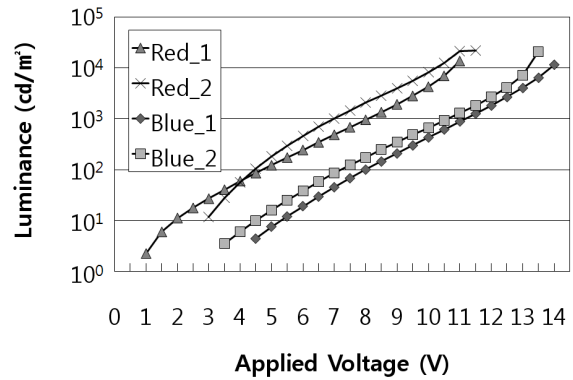


Fig. 3. Luminance vs applied voltage characteristics of OLED.

7 V인 경우 청색 OLED에 흐르는 전류는 "Blue_1"의 경우 1.2 mA/cm²의 전류가 흐르나 "Blue_2"의 경우 1.8 mA/cm²의 전류가 흘러 청색 소자의 경우에도 추가적인 LiF층의 형성에 의하여 동일한 인가전압에서 약 1.5 배 정도의 전류가 많이 흐르고 있음을 알 수 있었다. 이 결과로부터 추가적으로 LiF를 증착할 경우 동일한 인가전압에서 보다 많은 량의 전류가 흐르는 것을 확인할 수 있었다.

동일한 인가전압에서 OLED 소자에 보다 많은 전류가 흘러갈 수 있는 경우는 1) 음극이나 양극으로 사용되는 전극의 저항이 낮아지는 경우, 2) 전자가 주입되어 흐르는 음극전극의 일함수와 전자주입층 또는 전자수송층과의 LUMO (lowest unoccupied molecular orbital) 준위의 편차가 적은 경우, 3) 정공이 주입되어 흐르는 양극전극의 일함수와 정공주입층 또는 정공수송층과의 HOMO (highest occupied molecular orbital) 준위의 편차가 적은 경우, 4) 전자가 유기물에 주입되어 흐르는 전자이동도가 높은 경우, 그리고 5) 정공이 유기물에 주입되어 흐르는 정공이동도가 높은 경우 등에서 나타날 수 있다 [2]. LiF의 추가적인 형성은 음극전극 위에 형성하는 것으로 유기물의 특성에는 영향을 미치지 않고 Al인 음극전극의 표면 저항이 낮아져 동일한 인가전압에서도 보다 많은 전류가 흐르는 것으로 판단된다.

제작한 "Red_1", "Red_2"와 "Blue_1", "Blue_2" 소자의 인가전압에 따른 발광휘도를 측정하여 그림 3에 나타내었다. 그림에서 발광휘도가 1,000 cd/m²인 경우의 인가전압을 비교하면 적색 소자의 경우 "Red_1"의 8.1 V에서 "Red_2"의 7.0 V로 인가전압이 감소하였고, 청색 소자의 경우 "Blue_1"의 11.3 V에서 "Blue_2"의

10.6 V로 인가전압이 감소하였다. 이 결과에서부터 150 nm의 LiF를 추가적으로 증착함에 따라 보다 낮은 인가전압에서 동일한 휘도를 얻을 수 있었다. 동일한 인가전압인 7 V에서의 발광휘도는 "Red_1"의 경우 488 cd/m²에서 "Red_2"의 경우 1,023 cd/m²로 증가되었고, 또한 "Blue_1"의 경우 45 cd/m²에서 "Blue_2"의 경우 85 cd/m²로 증가되었다. 이 결과에서부터 150 nm의 LiF를 추가적으로 증착함에 따라 동일한 인가전압에서 약 2배 정도 높은 발광휘도를 얻을 수 있었다.

OLED에서 발광휘도가 증가하는 경우는 1) 발광층에 주입된 전자와 정공이 증가하는 경우 (즉 전류가 증가하는 경우), 2) 발광층에 주입된 전자와 정공의 결합효율이 증가하는 경우, 3) 발광층에서 발광된 빛이 외부로 방출되는 효율이 증가하는 경우 등에서 나타날 수 있다 [6,7].

그림 2와 그림 3에서 적색 OLED의 경우 7 V의 인가전압에서 흐르는 전류는 적색 소자의 경우 "Red_1"의 4.3 mA/cm²에서 "Red_2"의 7.3 mA/cm²로 증가하였고, 청색 소자의 경우 "Blue_1"의 1.2 mA/cm²에서 "Blue_2"의 1.8 mA/cm²로 증가하여 소자에 흐르는 전류가 증가함에 따라 발광휘도가 상승되었음을 알 수 있다. 또한 1,000 cd/m²의 값을 기준으로 소자에 흐르는 전류는 적색 소자의 경우 "Red_1"의 9.0 mA/cm²에서 "Red_2"의 7.3 mA/cm²로 감소하였고, 청색 소자의 경우도 "Blue_1"의 21.0 mA/cm²에서 "Blue_2"의 17.5 mA/cm²로 감소되었다. 따라서 그림 2에서 나타난 발광휘도의 증가 원인으로써 그림 1에 나타난 발광층에 주입된 전류의 량이 증가한 것과 함께 또 다른 요인이 작용하고 있음을 알 수 있다.

제작한 OLED 소자인 "Red_1", "Red_2"와 "Blue_1", "Blue_2"의 인가전압에 따른 발광효율을 그림 2와 그

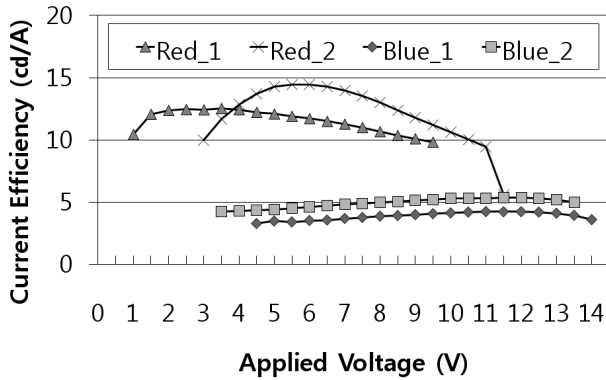


Fig. 4. Current efficiency vs. applied voltage characteristics of OLED.

림 3으로부터 계산하여 그림 4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 적색 OLED는 4 V이상에서 LiF를 추가 증착한 "Red_2" 소자의 발광효율이 더 우수하고, 휘도가 1,000 cd/m²인 경우 "Red_1" 소자는 8 V에서 10.68 cd/A의 발광효율을 나타낸 반면에 "Red_2" 소자는 7 V에서 13.95 cd/A로 향상된 발광효율을 얻을 수 있었다. 인가전압을 7 V로 하여 동일 전압에서 비교했을 때에도 적색소자인 "Red_1"은 11.28 cd/A의 효율을 나타내었으나 "Red_2"는 13.95 cd/A로 향상된 발광효율을 얻을 수 있었다. 청색 소자에서는 모든 인가전압의 영역에서 LiF를 추가 증착한 경우에 효율이 높게 나타났다. 발광휘도가 1,000 cd/m²인 경우 "Blue_1"은 4.24 cd/A인 반면에 "Blue_2"는 5.33 cd/A로 향상된 발광효율을 얻을 수 있었다. 인가전압을 7 V로 하여 동일 전압에서 비교했을 경우에도 청색소자인 "Blue_1"은 3.69 cd/A의 효율을 나타내었으나 "Blue_2"는 4.82 cd/A로 향상된 발광효율을 얻을 수 있었다.

동일한 발광휘도에서 발광효율이 증가하는 결과를 통해서 Al 위에 LiF를 추가 증착한 경우 단순히 많은 전류가 흐르게 되어 발광휘도가 증가하는 것이 아니라 하는 것을 확인할 수 있었는데 발광효율이 증가하는 원인으로서는 1) 주입된 전자와 정공의 균형이 잘 이루어진 경우, 2) 발광층에서 전자와 정공이 결합하여 발광에 기여할 수 있는 확률이 증가한 경우, 3) 발광층에서 발광된 빛이 외부로 방출되는 효율이 향상되는 경우 등에서 가능하다 [6,7].

제작한 "Red_1", "Red_2"와 "Blue_1", "Blue_2" 소자의 발광스펙트럼을 그림 5에 나타내었다. 적색 발광을 나타내는 "Red_1"과 "Red_2" 소자의 최대값은 630 nm이고, 반치폭은 100 nm 정도로 거의 유사한 스펙트럼을 나타내었다.

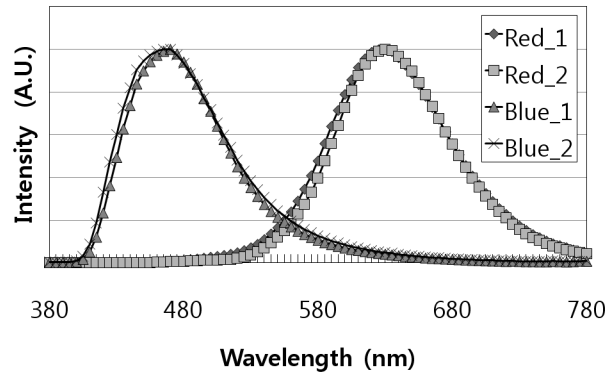


Fig. 5. Emission spectra of OLED.

펙트럼을 나타내었다. 청색 발광을 나타내는 "Blue_1"과 "Blue_2"에서도 최대값은 470 nm이고, 반치폭은 90 nm 정도의 거의 유사한 스펙트럼을 나타내었다. 이 결과를 통해서 LiF를 추가적으로 증착하는 것이 소자의 전기적인 특성에는 영향을 주지만 발광 스펙트럼에는 어떠한 영향도 주지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

이상의 결과에서 음극을 LiF/Al 구조로 형성한 OLED 위에 추가적으로 LiF를 150 nm 증착하여 동일한 인가전압에서 흐르는 전류밀도, 발광휘도, 발광효율 특성이 향상되었음을 확인하였다. 동일한 인가전압에서 흐르는 전류는 가장 바깥쪽에 형성되는 Al 위에 LiF 층을 연속 공정에 의하여 증착함으로써 Al의 표면이 산화될 수 있는 것을 방지할 수 있어 전극의 저항이 작아지게 되어 공급되는 전류가 증가된 것으로 판단된다. 또한, 동일한 인가전압에서 발광휘도의 증가는 흐르는 전류의 증가와 함께 발광효율의 증가에 의한 것으로 판단된다. OLED의 경우 정공의 주입이 전자의 주입과 비교하여 약 100배 정도 잘 이루어지고 있는 것으로 알려지고 있다 [8]. 이와 같이 충분한 량의 정공이 주입되고 있는 OLED 소자에 음극의 저항이 감소하게 되어 소자에 주입될 수 있는 전자의 공급이 증가하게 되고 이 결과로 발광층에서 전자와 정공의 균형이 이루어지게 되어 결합에 기여하는 전자와 정공이 증가하게 됨으로써 발광효율이 증가하는 것으로 해석할 수 있으며 그 결과 동일한 인가전압에서 보다 높은 발광휘도를 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

ITO/HIL/HTL/EML/ETL/LiF/Al과 ITO/HIL/HTL/

EML/ETL/LiF/Al/LiF 구조의 적색 및 청색 OLED 소자를 제작하여 발광특성을 조사하였다. 적색 OLED에서 LiF/Al 구조와 비교해 볼 때 LiF/Al/LiF 구조의 경우, 7 V의 인가전압에서 흐르는 전류는 4.3 mA/cm^2 에서 7.3 mA/cm^2 로 증가하고, 발광휘도도 488 cd/m^2 에서 $1,023 \text{ cd/m}^2$ 로 증가하여 그 결과 발광효율이 11.28 cd/A 에서 13.95 cd/A 로 개선되었다. 또한 청색 OLED의 경우도 Al 음극층 위에 LiF가 적층된 경우, 7 V의 인가전압에서 흐르는 전류는 1.2 mA/cm^2 에서 1.8 mA/cm^2 로 증가하고, 발광휘도도 45 cd/m^2 에서 85 cd/m^2 로 증가하였으며 그 결과 발광효율이 3.69 cd/A 에서 4.82 cd/A 로 개선되었다.

Al 위에 LiF 층을 연속 공정에 의하여 증착함으로써 Al 표면의 산화를 방지하여 전극의 저항이 낮아져 공급되는 전자가 증가하게 되어 전류가 증가하고, 충분한 량의 정공이 주입되고 있는 OLED 소자에 음극의 저항이 감소되어 소자에 주입되는 전자가 증가하게 됨으로써 발광층에서 전자와 정공이 균형을 이루게 된다. 따라서 결합에 기여하는 전자와 정공의 량이 증가하게 되어 발광효율이 증가하게 되고 주입된 전하량의 증가와 발광효율의 증가로 발광휘도 또한 향상되는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010학년도 대전대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

REFERENCES

- [1] J.-G. Jang, *J. KIEEME* **19**, 437 (2006).
- [2] Z. Kafafi, *Organic Electroluminescence* (Taylor & Francis Ltd., London, UK, 2005) p. 10, 147.
- [3] M. Pope and C. E. Swenberg, *Electronic Processes in Organic Crystals and Polymers* (Oxford University Press, Oxford, UK, 1999) p. 161.
- [4] L. S. Hung, C. W. Tang, M. G. Mason, P. Raychaudhuri, and J. Madathil, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 544 (2001).
- [5] Y.-S. Park, J.-W. Yang, and S.-H. Ju, *J. KIEEME* **22**, 1039 (2009)
- [6] W. J. Lee, Y. K. Fang, H.-C. Chiang, S. F. Ting, S. F. Chen, W. R. Chang, C. Y. Lin, T. Y. Lin, and J.-J. Ho, *Solid-State Electron.* **47**, 1127 (2003).
- [7] J.-H. Jang, K.-J. Kim, J.-H. Kim, and M.-C. Oh, *Kor. J. Opt. Photon.* **18**, 441 (2007).
- [8] T. C. Wong, J. Kovac, C. S. Lee, L. S. Hung, and S. T. Lee, *Chem. Phys. Lett.* **334**, 61 (2001).