

상부 발광 유기 발광 소자에서 두께와 시야각에 따른 마이크로 캐비티 특성

이 원 재^{1,a}

¹ 경원대학교 전자공학과

Thickness and Angle Dependent Microcavity Properties in Top-Emission Organic Light-Emitting Diodes

Won-Jae Lee^{1,a}

¹ Department of Electronic Engineering, Kyungwon University, Seongnam 461-701, Korea

(Received November 8, 2010; Revised November 17, 2010; Accepted December 6, 2010)

Abstract: Top-emission device has a merit of high aperture ratio and narrow emission spectrum compared to that of bottom-emission one. Emission spectra of top-emission organic light-emitting diodes depending on a layer thickness and view angle were analyzed using a theory of microcavity. Device structure was manufactured to be Al (100 nm)/TPD/Alq₃/LiF (0.5 nm)/Al (2 nm)/Ag (30 nm). N,N'-diphenyl-N,N'-di(m-tolyl)-benzidine (TPD) and tris(8-hydroxyquinoline) aluminium (Alq₃) were used as a hole-transport layer and emission layer, respectively. And a thickness of TPD and Alq₃ layer was varied in a range of 40 nm~70 nm and 60 nm~110 nm, respectively. Angle-dependent emission spectrum out of the device was measured with a device fixed on a rotating plate. Since the top-emission device has a property of microcavity, it was observed that the emission spectrum shift to a longer wavelength region as the organic layer thickness increases, and to a shorter wavelength region as the view angle increases. Layer thickness and view-angle dependent emission spectra of the device were analyzed in terms of microcavity theory. A reflectivity of semitransparent cathode and optical path length were deduced.

Keywords: Microcavity, Top-emission, Spectrum, Angular

1. 서 론

현대 사회는 정보 통신 기술이 고도로 발달하고 정보화 사회로의 움직임이 가속화되면서 기존의 디스플레이 소자와는 다른 새로운 경쟁력을 가진 고성능, 저비용의 차세대 디스플레이 연구 개발이 중요시 되고 있다. 차세대 디스플레이로서 주목받고 있는 유기 발광 소자는 자발광으로서, 타 디스플레이보다 두께

가 얇고, 밝기 변화에도 동일한 색상을 유지하는 면 발광 소자이다. 또한 응답 속도가 빠르며, 고효율과 고해상도로 자연색에 가장 가까운 화면 표시 소자이다.

유기 발광 소자는 1963년 Helfrich 그룹에 의해 안트라센 단결정에서 발광을 관찰되었다. 1987년 Tang과 VanSlyke는 적층 구조의 소자를 발표하였으며 [2], 그 이후 유기 발광 소자의 연구는 더욱 활발하게 되었다. 상부 발광 유기 발광 소자에서 발광 스펙트럼은 발광층의 물질, 유기물층의 두께 및 소자 구조 등에 의

a. Corresponding Author; wjlee@kyungwon.ac.kr

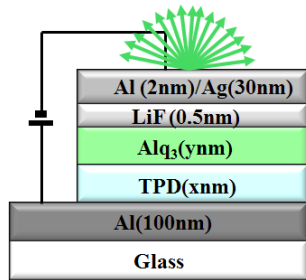


Fig. 1. Top-emitting device structure used in our study.

해서 결정된다 [3-5]. 또한 소자에 사용한 전극의 반사도가 적절히 크면, 발광 스펙트럼의 변화가 일어난다. 이러한 변화는 마이크로 캐비티 효과에 의하여 발생한다. 1994년에 Dodabalapur 그룹은 하나의 발광층을 사용한 마이크로 캐비티 효과를 이용하여 다양한 스펙트럼을 가지는 소자를 발표하였다 [6,7]. 마이크로 캐비티 효과의 장점은 하나의 발광층으로 전극의 반사도와 유기물층의 두께를 조절하여, 반폭치가 좁은 스펙트럼과 봉우리 파장의 변화를 가져올 수 있다는 점이다. 또한 폭이 좁은 스펙트럼은 고해상도 디스플레이에 적합하다. 이후로 마이크로 캐비티 효과의 연구는 계속 발전해 왔다 [8-10].

본 논문에서는 유기물층의 두께와 시야각 변화를 통하여 나타나는 상부 발광 유기 발광 소자의 광학적 특성을 마이크로 캐비티 이론으로 이해하고, 반투명 음전극의 반사도와 소자 내부에서 광학적 거리를 유추하였다.

2. 실험 방법

소자 구조는 그림 1에서 보는 바와 같이 Al (100 nm)/TPD (x nm)/Alq₃ (y nm)/LiF (0.5 nm)/Al (2 nm)/Ag (30 nm)로 하였다. 증착된 Al 100 nm 위에 정공 수송층인 N,N'-diphenyl-N,N'-di (m-tolyl)-benzidine (TPD) 를 40 nm~70 nm까지, 그리고 발광층으로 사용한 tris (8-hydroxyquinoline) aluminium (Alq₃)는 60 nm~110 nm까지 열증착하였다. 반투명 음전극은 LiF/Al/Ag를 사용하였다. 증착은 2 x 10⁻⁵ torr의 진공에서 하였고, 증착 속도는 유기물층은 0.5~1.0 Å/s, 그리고 전극은 0.5~5 Å/s로 하였다. 소자의 발광 면적은 3 x 5 mm²로 하였다.

제작된 소자를 측정하기 위해 그림 2와 같이 장치

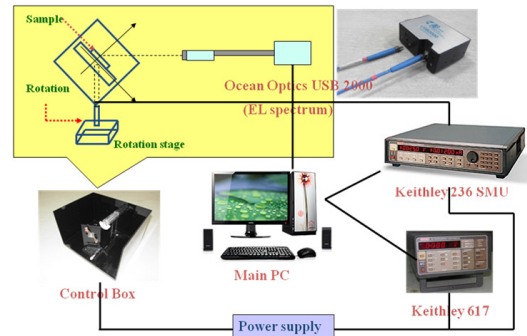


Fig. 2. Electrical and optical measurements.

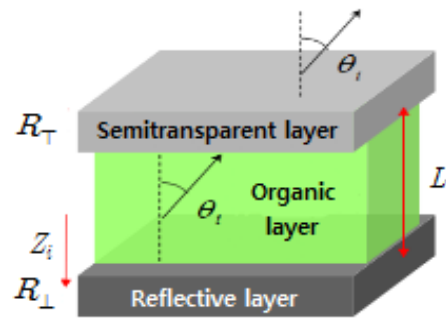


Fig. 3. Device model for an understanding of theoretical cavity formula.

를 구성하였다. 소자의 구동은 Keithley 236 (source-measure unit)과 617 (electrometer)을 사용하였다. 시야각에 따른 발광 스펙트럼은 회전 기관 위에 소자를 고정시켜 놓고, 0°~60°까지 기관을 회전시키며 Ocean Optics USB 2000을 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

$$I_{out}(\lambda) = \frac{T_{\tau} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [1 + R_{\perp} + 2\sqrt{R_{\perp}} \cos(\frac{4\pi z_i}{\lambda} - \phi_{\perp})]}{1 + R_{\perp} R_{\tau} - 2\sqrt{R_{\perp} R_{\tau}} \cos(\frac{4\pi L}{\lambda} - \phi_{\tau} - \phi_{\perp})} I_{normal}(\lambda) \quad (1)$$

제작된 소자의 발광 스펙트럼은 시야각이 증가함에 따라 단파장으로, 유기물층의 두께가 증가함에 따라 장파장으로 이동되는 마이크로 캐비티의 특성을 보인다. 다음은 캐비티 구조에서 스펙트럼 $I_{out}(\lambda)$ 를 나타내는 이론적인 식이다.

여기서 T 는 반투명 전극의 투과도, R 은 반투명 전극

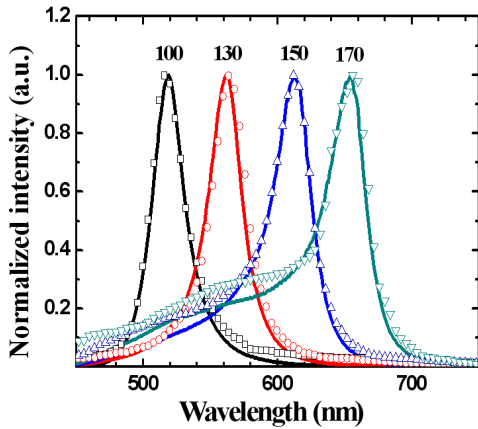


Fig. 4. Emission spectra depending on the thickness of top-emission organic light-emitting diodes in a direction normal to the surface.

과 반사 전극의 반사도, z_i 는 발광층의 실제 발광이 일어나는 지점에서 반사 전극까지의 거리, θ_i 는 내부에서의 입사각, L 은 소자 내부에서 광학적 두께, 그리고 $I_{nc}(\lambda)$ 는 발광층 자체의 PL 스펙트럼이다. 식 (1)의 이해를 돕기 위해 소자 모형을 그림 3에 나타내었다. 소자의 외부에서 시야각 θ 인 방향에서 스펙트럼을 측정하였을 때, 내부에서의 입사각 θ_i 와는 스넬의 법칙을 만족하게 된다. 즉,

$$n \sin \theta_i = \sin \theta \quad (2)$$

이다.

그림 4는 상부 발광 소자의 두께에 따라 정면에서 얻은 ($\theta=0$) 발광 스펙트럼이다. 유기물층의 전체 두께를 100 nm에서 170 nm까지 증가시켰을 때, 봉우리 파장이 장파장으로 이동하는 모습을 보이고 있다. 점선은 실험으로 얻은 파장에 따른 발광 스펙트럼이고, 실선은 식 (1)을 이용하여 광학적 거리를 100 nm에서 190 nm으로 대입하고, 반사 전극의 반사도를 100%로 하였으며, 반투명 전극의 반사도를 85%로 했을 때, 파장에 따라 나타나는 발광 스펙트럼이다. 식 (1)을 사용하여 스펙트럼을 피팅할 때, 사용한 변수들의 값은 표 1과 같다. 점선과 실선이 일치하기 때문에, 반투명 전극의 반사도를 예상할 수 있었으며, 소자 내에서 빛의 흡수가 거의 일어나지 않았다면 투과도 또한 15%가 될 것으로 예상된다.

그림 5 (a)와 (b)는 유기물층의 전체 두께가 130 nm

Table 1. Values of each parameter used in microcavity formula.

Thickness peak	R_{\perp}	R_{\top}	Z_i	L	ϕ_{\perp}	ϕ_{\top}	T
Spectrum (519 nm)	1	0.85	55	100	2.1	0.35	1
Spectrum (562 nm)	1	0.85	70	130	2.4	0.42	1
Spectrum (613 nm)	1	0.85	85	150	2.65	0.43	1
Spectrum (655 nm)	1	0.85	95	170	2.7	0.48	1

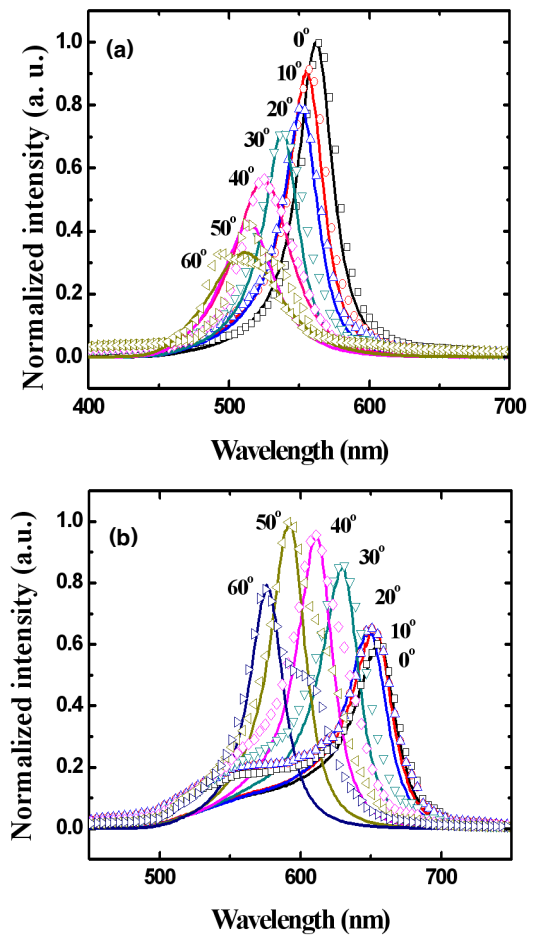


Fig. 5. Angle-dependent emission spectra of the top-emission organic light-emitting diodes for an organic layer thickness of (a) 130 nm and (b) 170 nm.

와 170 nm일 때의 시야각에 따른 상부 발광 유기 발광 소자의 발광 스펙트럼이다. 점선은 실험으로 얻은 발광 스펙트럼이며, 실선은 식 (1)을 통하여 이론적으로 피팅하여 얻은 파장에 따른 발광 스펙트럼을 나타

내었다. 소자의 정면에서 60° 까지 시야각에 따른 스펙트럼을 살펴보면, 봉우리 파장이 시야각에 따라 단파장으로 이동하는 모습을 확인할 수 있다. 실험과 이론적인 식을 통한 스펙트럼이 일치하는 반사도는 85%로서, 정면에서 예상한 값과 일치하였고, 광학적 거리는 145 nm와 167 nm로 실험 결과와 거의 일치하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 Al/TPD/Alq3/LiF/Al/Ag 구조의 상부 발광 유기 발광 소자에서 생기는 마이크로 캐비티 효과를 연구하였다. 발광 스펙트럼의 봉우리 파장은 유기물층의 두께가 증가함에 따라 장파장으로 이동하고, 시야각이 증가함에 따라 단파장으로 이동한다. 이들 현상은 마이크로 캐비티 식으로 이해할 수 있었으며, 이론적인 접근을 통해 반사도 R과 광학적 거리 L을 유추해 볼 수 있었다. 또한 예상한 반사도와 광학적 거리는 실험 결과와 이론적인 유추와 잘 일치하였다.

감사의 글

이 연구는 2010년도 경원대학교 지원에 의한 결과이다.

REFERENCES

- [1] W. Helfrich and W. G. Schneider, *Phys. Rev. Lett.* **14**, 7 (1965).
- [2] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, *Appl. Phys. Lett.* **51**, 913 (1987).
- [3] L. S. Hung, C. W. Tang, and M. G. Mason, *Appl. Phys. Lett.* **70**, 152 (1997).
- [4] L. S. Hung, C. W. Tang, M. G. Mason, P. Raychaudhuri, and J. Madathil, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 544 (2001).
- [5] H. Yokoyama, *Science*, **256**, 66 (1992).
- [6] A. Dodabalapur, L. J. Rothberg, and T. M. Miller: *Electron. Lett.*, **65**, 1000 (1994).
- [7] A. Dodabalapur, L. J. Rothberg, T. M. Miller, and E. W. Kwock, *Appl. Phys. Lett.* **64**, 2486 (1994).
- [8] Zhijun Wu, Hengqun Guo, Jiaxian Wang, and Shiyong Liu, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **39**, 5160 (2006).
- [9] Wenfa Xie, Shufen Chen, Letian Zhang, and Shiyong Liu, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40**, 5888 (2007).
- [10] H. C. An, S. H. Na, H. W. Joo, and T. W. Kim, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **10**, 28 (2009).