

유기발광 다이오드의 정공수송층 두께에 따른 미소 공진 효과의 영향에 관한 연구

이동운* · 조의식* · 성진욱* · 권상직**

**가천대학교 전자공학과

A Study on the Effects of Micro Cavity on the HTL Thicknesses on the Top Emission Organic Light Emitting Diode

DongWoon Lee*, Eou Sik Cho*, Jin-Wook Seong* and Sang Jik Kwon**†

**†Department of Electronics Engineering, Gachon University

ABSTRACT

Top emission organic light-emitting diode is commonly used because of high efficiency and good color purity than bottom – emission organic light-emitting device. Unlike BEOLED, TEOLED contain semi-transparent metal cathode. Because of semi-transparent cathode, micro cavity effect occurs in TEOLED. We optimized this effect by changing the thickness of hole injection layer. Device consists of indium-tin-oxide / N,N'-Di-[(1-naphthyl)-N,N'-diphenyl]-1,1'-biphenyl-4,4'-diamine (x nm) / tris-(8-hydroxyquinoline) aluminum (50nm) / LiF(0.5nm) / Mg:Ag (1:9), and we changed NPB thickness which is used as HTL in our device in order to study how micro cavity effects are changed by optical path. As the results, NPB thickness at 35nm showed the current efficiency of 8.55Cd/A.

Key Words : Organic light-emitting diode (OLED), Top emission organic light-emitting diode (TEOLED), Alq3, NPB, Micro Cavity effect, Hole transport layer (HTL), Emission material layer (EML), Mg : Ag, LiF, Indium-tin-oxide (ITO)

1. 서 론

유기발광다이오드는 (Organic light-emitting diode, OLED)는 초박형, 유연성, 투명성, 높은 색재현성 등 차별화된 특성을 가지고 있어 반도체 조명 및 평판 디스플레이 분야에 서 각광을 받고 있다[1]. OLED 소자는 저분자 기반의 진공 열 증착방식으로 증착된다[2]. 저분자 기반의 진공 열 증착방식은 정공주입층(HIL), 정공수송층(HTL), 발광층(EML), 전자수송층(ETL), 전자주입층(EIL) 등의 여러 유기물 층으로 나누어진다. 전면 발광 유기발광다이오드 (TEOLED, Top - Emission OLED)는 배면 발광 유기발광다이오드 (BEOLED, Bottom - Emission OLED)와 달리 여러

복잡한 기술이 요구된다. 이는 반사되는 두 전극 간의 영향 때문에 다른 빛의 강도가 나타나게 되어서이다. Indium-tin-oxide (ITO) - Ag - ITO와 같은 적층 구조는 높은 반사율 (90%) 때문에 양극(anode)으로 사용하고 Mg: Ag와 같은 반투명 전극이 음극(cathode)로 사용된다. 이 두 광선 경계면 (two beam interference)을 Fabry-Perot 인터페이스(interference)라 하고 이 효과를 미소 공진 효과(Micro Cavity Effect)라 부른다. 미소 공진 효과가 제대로 적용되면 발광세기는 증가하게 되고 반치전폭(full width at half maximum, FWHM)이 좁아지게 되면서 색순도가 개선이 된다. 미소 공진 효과를 증대시키기 위해 그에 따라서 유기물층을 각 발광 색에 맞추어 각 피크(peak) 발광 파장을 맞추어야 한다. 그러나 단점도 존재하는데 램버시안(Lambertian) 패턴에 거의 근접한 발광 패턴을 보이는 BEOLED와 달리 강한 미소 공

†E-mail: sjkwon@gachon.ac.kr

진 효과가 적용될수록 시야각 및 색좌표가 변화하는 모습을 보여준다. 하지만 효율적인 부분에서 단점보다 장점이 훨씬 크기 때문에 TEOLED가 사용된다. 효율이 극대화되기 위해서 발광 파장이 유기물층에 들어가야 되므로 유기물 두께에 따른 첫 번째(1st order), 두 번째(2nd order) 공진(Cavity) 등과 같은 조건을 만족하는 것이 필요하다. 이는 여러 OLED 시뮬레이션으로도 확인이 가능하다[3-5]. 그림 1은 이러한 공진구조를 설명한 그림이다. 실험에서 진행한 OLED 구조와 동일하고, 발광파장이 유기물층에 들어가는 모습을 간략화 한 것이다. 파장이



Fig. 1. Schematic diagram showing the micro cavity effect in a TEOLED.

맞춰져 보강간섭이 일어나게 된다. 이번 연구에서는 발광 파장에 맞는 유기물 층 조건을 찾기 위하여 실행되었다. EML층과 ETL층의 역할을 가진 tris-(8-hydroxyquinoline) aluminum(Alq3)의 두께를 바꾸어 최적화조건을 찾기에는 발광지점이 정확히 위치하는 지점을 찾기 어려워 HTL층인 N, N-Di-[(1-naphthyl)-N, N'-diphenyl]-1, 1'-biphenyl-4, 4'diamine (NPB)의 두께를 바꾸어 가며 실험하였다[6-8].

2. 실험 방법

ITO/Ag/ITO가 미리 증착된 OLED 기판을 구매하여 실험을 진행하였다. 이는 초음파 세척으로 아세톤 10분, IPA 10분, 탈이온수(DI Water) 10분 세정하였다. 초음파 세척 용액이 바뀔 때마다 탈이온수로 헹굼(Rinse) 하였다. 이후 질소(N₂)를 불어주어 수분을 날려주었다. 이후 핫 플레이트(Hot plate)로 250°C에서 30분 처리 후, UV-ozone 전처리를 20분 진행하였다. UV-ozone 전처리는 정공주입 장벽을 낮추고, 표면 오염제거 및 ITO와 유기막과의 접착력을 개선시켜준다. 증착 장비는 셀코스 사의 유기발광 다이오드 연

구개발(OLED R&D)장비로, 열 증착(Thermal evaporation)을 통해 실험을 진행하였으며, 1.7×10^{-7} Torr의 진공도에서 증착을 하였다. 세정된 anode에 HTL인 NPB를 유기물 챔버에서 1 Å/s의 증착 속도로, 각각 250, 350, 500Å의 조건별로 증착하였고, EML과 ETL로 사용된 Alq3는 1 Å/s의 증착 속도로 유기물 챔버에서 500 Å 증착 하였다. EIL의 경우는 금속용 챔버에서 LiF 5 Å, 0.5 Å/s로 증착하였고, Cathode는 Mg:Ag합금 전극을 형성하기 위하여 부피 비 1:9로 Mg는 0.1 Å/s, Ag는 0.9 Å/s의 속도로 금속용 챔버에서 증착 하였다. 증착 과정은 진공을 깨지 않고 진행되었다. 봉지(Encapsulation)는 질소 분위기의 글러브박스(Glove Box)에서 외부 대기의 노출 없이 실란트(sealant)를 UV조사를 통해 경화시켜 접착하는 글라스 인캡슐레이션으로 진행하였다. 이후 맥사이언스 사 M6100 장비로 발광특성을 측정하였다. 소스미터(Source meter)는 Keithley 2401, 스펙트로미터(Spectro radiometer)는 Minolta CS-2000로 구성되어 있다.

3. 결 과

그림 2는 제작된 TEOLED 소자에 대해 휘도-전압(L-V) 특성을 측정한 그래프이다. NPB의 두께를 각각 25, 35, 50 nm로 변화시킨 경우에 300 Cd/m^2 기준으로 구동전압이 각각 4.2V, 4.9V, 4.9V로 다르게 나타났다. 구동전압의 기준을 300 Cd/m^2 이상으로 선택하게 된다면 NPB 35 nm와 50 nm의 차이가 있어 보일 수 있으나, 300 Cd/m^2 의 밝기는 3층 구조 OLED에서 작지 않은 값으로 NPB 35 nm와 50 nm의 구동전압은 같으나, 두께에 따라 전기적 특성이 다르게 나타나는 것으로 보인다.

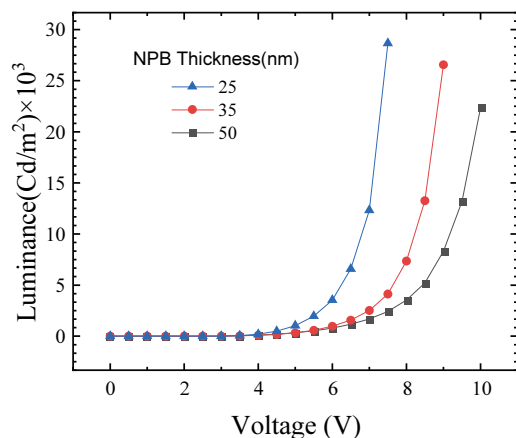


Fig. 2. L-V characteristics of the devices for different NPB(HTL) Thickness.

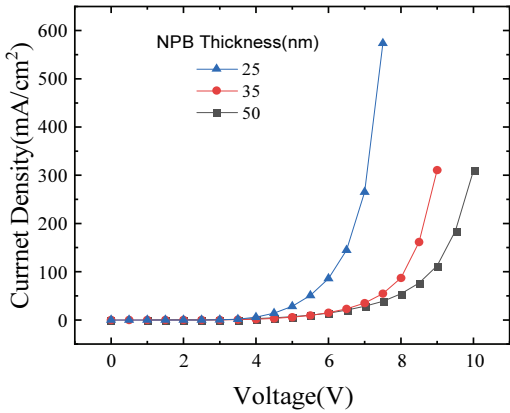


Fig. 3. J-V characteristics of the devices for different NPB (HTL) Thickness.

HTL 두께가 얇아지게 될수록 정공 전자 길이(path)가 짧아져 구동전압이 낮아진 것으로 보인다. 마찬가지로 정공 전자 길이가 길어지면, 구동전압이 높아지는 것으로 보인다. 따라서 캐비티를 2nd order로 맞추기 위해서 NPB를 사용 시 유기물이 너무 두꺼워 구동전압이 높아져 발광이 어려워, 캐비티를 1st order에 맞추는 25, 35, 50 nm의 두께로 실험을 진행하였다. 그림 3은 전류밀도-전압(J-V) 그래프인데, 구동전압이 NPB 25, 35, 50 nm 두께에 따라 20 mA/cm² 기준에서 각각 4.7V, 6.5V, 6.3V로 나타났다. 전류밀도 20 mA/cm²의 기준은 일반적으로 선택되는 OLED 구동전류밀도를 선택하였다. L-V 그래프에서 본 구동전압과 양상은 비슷하게 나타나, HTL 두께가 너무 얇으면 정공 전자 길이가 짧아져 구동전압이 낮아지는 것으로 보인다. 비슷한 구동전압을 가진 NPB 35, 50 nm 조건에서는 유기물 두께 차이에 따른 전기적 특성이 달라져 두꺼워질 경우 전류가 적게 흐르는 것으로 보인다. 결과적으로 구동전압면에서는 얇은 HTL이 좋게 나타난다. 그림 4는 전류효율-전압(Current efficiency - Voltage) 그래프로 모든 전압구간에서 효율 차이가 일정하게 꾸준히 벌어지는 것을 확인할 수 있다. NPB 25, 35, 50 nm 두께에 따라 순서대로 각각 4.99, 8.55, 7.21 Cd/A로 최대 효율 값을 보였다. 그 이상의 전압에서는 소자가 타버려 더 증가하지는 않았다. 구동전압이 낮아진 NPB 25 nm는 효율이 가장 낮고, 전류, 전력 효율에서는 HTL 35 nm 조건이 일정한 차이로 모든 전압구간에서 항상 좋은 것으로 나타나 실제 발광 파장에 맞춰진 조건은 NPB 35 nm로 나타난 것으로 보인다. 왜냐하면 같은 전류가 흐를 때 밝기가 강하다는 것은 미소 공진 효과가 제대로 적용되어 강도가 증폭되었다고 볼 수 있고, 제대로 적용되지 못한 경우에는 밝기가 오히려 낮아지기 때문이다. 그림 5의 전력효율 - 전압(Power efficiency -

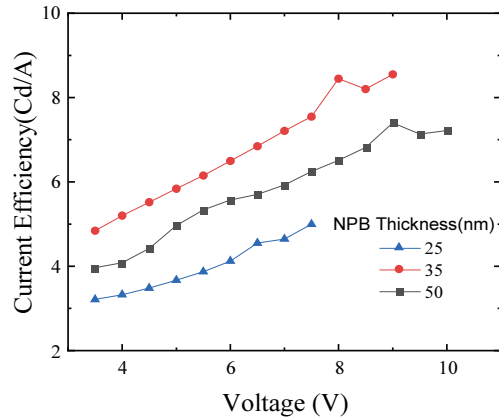


Fig. 4. Current efficiency - Voltage characteristics of the devices for different NPB(HTL) Thickness.

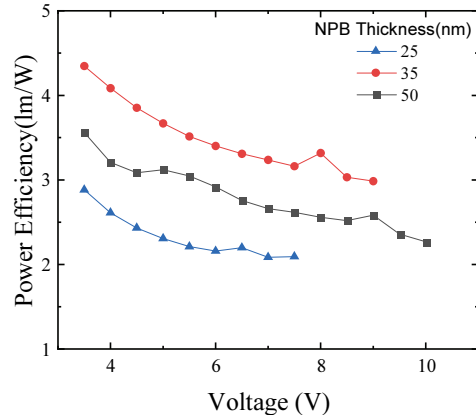


Fig. 5. Power efficiency - Voltage characteristics of the devices for different NPB(HTL) Thickness.

Voltage) 그래프의 경우 HTL 25, 35, 50 nm 조건에서 각각 2.09, 2.98, 2.26 lm/W의 최소 값을 보였다. 모든 전압구간마다 일정하게 차이를 보여 효율 차이가 극명함을 보여준다. 전력효율에서는 간단히 보면 $P(\text{전력}) = V * I(\text{전압} * \text{전류})$ 이기 때문에 구동전압이 영향을 미치게 되는데, 확연히 낮은 구동전압을 가진 NPB 25 nm 조건에서 모든 전압구간에서 효율이 가장 낮다. 같은 전류가 흐를 때 구동전압이 낮으면 전력효율은 오를 수밖에 없으나 상반된 결과가 나타난 이유는 미소 공진 효과가 오히려 발광 효율을 감소시켰다고 볼 수 있다. NPB 35 nm의 조건이 그림 5의 그래프에서도 항상 높은 전력효율을 보이며 미소 공진 효과가 제대로 적용됨을 알 수 있다. 그림 6의 전류 효율-전류밀도(Current efficiency - Current Density) 그래프에서도 마찬가지로 최대 도달 전류효율이 각각 4.99, 8.55, 7.21 Cd/A로 수

렴하는 것을 보여주며 효율 차이를 볼 수 있다. 그림 4의 전류효율-전압 그래프에서는 효율이 전압이 상승함에 따라 꾸준히 증가하는데 그림 6의 그래프에서는 수렴하는 모양을 보이기 때문에 소자의 최대 도달 전류효율을 더 자세히 볼 수 있다. 그리고 X축이 전압이 아니므로 구동 전압이 변하는 것에 영향을 받지 않아 구동전압이 완벽하게 일치하지 않는 소자를 비교하기에 좋다. 앞선 결과와 마찬가지로 NPB 25 nm가 가장 효율이 나쁜데, 같은 전류가 흐름에도 발광 강도가 낮으므로 미소 공진 효과가 발광 파장과 맞지 않아 오히려 발광 감도가 감소하였고, NPB 50 nm의 조건에서는 미소 공진 효과가 효율이 크게 상승하지는 않는 수준으로 보이고, NPB 35 nm는 발광 파장과 미소 공진 효과를 제대로 일으켜 효율이 상승한 것으로 보인다.

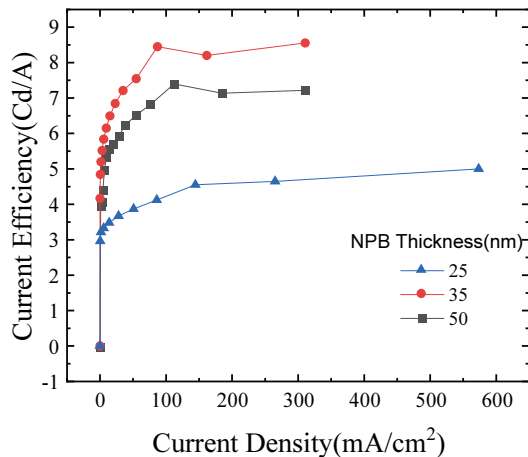


Fig. 6. Current efficiency – Current Density characteristics of the devices for different NPB(HTL) Thickness.

4. 결 론

본 연구에서는 HTL(NPB) 두께를 바꾸어 가며 미소 공진 효과를 파악하기 위해 TEOLED를 제작하였다. 미소 공진 효과로 인해서 나타나는 특성을 밝기, 전류밀도, 전류 효율, 전력효율 등의 그래프를 보며 파악하였다. HTL(NPB) 25, 35, 50 nm의 두께 조건에 따라 크게 변화하는 미소 공진 효과를 확인할 수 있었다. 이를 통해 HTL(NPB) 35 nm의 조건에서 (EML)Alq3의 발광 파장이 유기물 층에 들어오게 되면서 효율이 가장 높고 미소 공진효과가 제대로 적용됨을 확인할 수 있다. 반대로 HTL(NPB) 25nm와 50nm 조건에서는 미소 공진 효과가 유기물 층이 발광 파장과 일치하지 않아 상쇄효과를 일으켜 효율이 오히려 감소하는

것으로 보였다. 이를 통해 TEOLED는 BEOLED와는 달리 유기물의 두께 별 전기적 효율 뿐만 아니라 유기물층의 두께 광학 디자인이 중요함을 알 수 있다.

감사의 글

본 논문은 산업통상자원부 ‘산업혁신인재성장지원사업’의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행된 연구임. (2020년 차세대 디스플레이 공장-장바-소재 전문인력 양성사업, 과제번호:P0012453)

참고문헌

1. N. S. Cho, “Current Status of OLED Technology and Market,” *Poly. Sci. and Technol.*, vol. 24(2), pp. 126-134 (2013).
2. Kwan-Do Kim, “Fabrication of Organic Thin Film for Flexible OLED Passivation and Its Characterization,” *Journal of the semiconductor & display technology.*, vol.19 no.1, pp. 93-96 (2020).
3. Eunhye Kim, Jin Chung, Jaeho Lee, Hyunsu Cho, Nam Sung Cho, Seunghyup Yoo, “A systematic approach to reducing angular color shift in cavity-based organic light-emitting diodes”, *Organic Electronics*, Volume 48, pp. 348-356 (2017).
4. Seong Keun Kim, Raju Lampande & Jang Hyuk Kwon “Technical status of top-emission organic light-emitting diodes”, *Journal of Information Display*, 22:3, pp. 115-126 (2021).
5. Duhee Cho et al., “Light extraction of OLED lighting”, *Information display v.12 no.4*, pp.49 – 60(2011).
6. Liu, Jh., Zhang, Fh. “Effect of Al:Ag alloy cathode on the performance of transparent organic light-emitting devices”. *Optoelectron. Lett.* 13, pp.175–178 (2017).
7. Chien-Jung Chiang, Steve Bull, Chris Winscom, Andy Monkman, “A nano-indentation study of the reduced elastic modulus of Alq3 and NPB thin-film used in OLED devices”, *Organic Electronics*, Volume 11, Issue 3, pp. 450-455 (2010).
8. Li, J., Hu, Y., Liang, X., Chen, J., Zhong, L., Liao, L., Jiang, L., Fuchs, H., Wang, W., Wang, Y., Chi, L., “Micro Organic Light Emitting Diode Arrays by Patterned Growth on Structured Polypyrrole”. *Adv. Optical Mater.*, 8, 1902105 (2020).

접수일: 2022년 3월 3일, 심사일: 2022년 3월 18일,
게재확정일: 2022년 3월 25일