

정공수송층이 역구조 OLED의 전기 및 광학적 특성에 미치는 영향

임세진, 문대규 

순천향대학교 디스플레이신소재공학과

Effect of Hole Transport Layer on the Electrical and Optical Characteristics of Inverted Organic Light-Emitting Diodes

Se-Jin Im and Dae-Gyu Moon

Department of Display Materials Engineering, Soonchunhyang University, Asan 31538, Korea

(Received April 28, 2023; Revised May 12, 2023; Accepted May 18, 2023)

Abstract: We have developed inverted green phosphorescent organic light emitting diodes (OLEDs) using 1,1-bis[(di-4-tolylamino)phenyl]cyclohexane (TAPC) and bis(carbazole-9-yl)biphenyl (CBP) hole transport layers. The driving voltage, current efficiency, power efficiency, and emission characteristics of devices were investigated. While the driving voltage for the same current density was about 1~2 V lower in the devices with the TAPC layer, the maximum luminance was higher in the device with the CBP layer. The maximum current efficiency and power efficiency were 3.2 and 2.7 times higher in the device with the CBP layer, respectively. The higher efficiency in the CBP device resulted from the enhanced hole-electron balance although weak parasitic recombination takes place in the CBP hole transport layer.

Keywords: OLED, Inverted, Hole transport layer, CBP, TAPC

1. 서론

OLED (organic light-emitting diode)는 양극과 음극으로부터 주입된 정공과 전자가 유기박막에서 재결합하여 빛을 발광하는 소자로, 응답 특성이 좋고 시야각이 넓으며 휘거나 접을 수 있는 기판을 이용하여 제작이 가능하여 디스플레이 및 조명에 응용되고 있다 [1,2]. OLED의 효율은 정공과 전자의 재결합에 의해 형성된 단일항 여기자(singlet exciton)와 삼중항 여기자(triplet exciton)를 모두 발광에 이용할 수 있는 인광재료, TADF (thermally assisted delayed fluorescence) 재료 및 이에 적합한 다층 구조의

개발에 의해 크게 향상되어 왔다 [3,4]. 그러나 OLED는 아직까지 전자수송층(electron transport layer)의 이동도가 낮고 Mg, Li와 같이 안정성이 낮은 재료를 음극 또는 전자 주입층(electron injection layer) 재료로 이용하기 때문에 수분과 산소에 의해 산화 또는 부식되어 안정성이 저하되는 문제가 있다 [5].

역구조(inverted structure) OLED는 양극으로 indium tin oxide (ITO), 음극으로 Al을 주로 사용하기 때문에 산화 또는 부식 안정성이 우수한 장점이 있다 [6]. 또한 능동구동(active matrix driving) OLED를 위한 TFT (thin film transistor)로 이용되는 산화물 TFT는 n형 반도체로 구성되어 있기 때문에 역구조 OLED를 이용하면 구동전압을 감소시킬 수 있다 [7]. 역구조 OLED는 음극으로 일함수가 큰 ITO를 사용하기 때문에 ITO 음극으로부터 유기박막으로 전자의 주입이 용이하지 않은 단점이 있어, 전자 주입 특성

✉ Dae-Gyu Moon; dgmoon@sch.ac.kr

Copyright ©2023 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

을 향상시키기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다 [8-11]. Lee 등은 ITO 음극과 전자수송층 사이에 tin oxide (SnO_2) 나노입자를 삽입하여 전자의 주입 장벽을 감소시켰으며 [8], Chen과 Ma 등은 lithium carbonate (Li_2CO_3) 기반의 전자 주입층을 이용하여 역구조 OLED의 효율을 향상시켰다 [9,10]. Kwon 등은 전자수송층에 Ag 또는 Li를 도핑하여 전자 주입 특성을 향상시켰다 [11].

ZnO 나노입자는 n형 반도체로 전도대 에너지가 낮아 전자의 주입이 용이하며 전하이동도가 높고 화학안정성이 우수하여 OLED의 전자 주입층으로 사용하기 위한 연구가 진행되어 왔다 [12-15]. ZnO 나노입자는 에탄올과 같은 유기 용매에 분산되기 때문에 스펀코팅, 잉크젯 프린팅과 같은 용액 공정 방식에 의해 박막으로 코팅된다. ZnO 나노입자 하부에 유기박막이 놓여 있는 일반적인 OLED의 경우 ZnO 나노입자를 코팅하는 과정에서 유기용매에 의해 하부 유기박막이 손상될 수 있는 반면, 역구조의 OLED는 ZnO 하부에 유기용매에 의해 손상되지 않는 ITO가 놓여 있다 [13]. 따라서 ZnO 나노입자는 역구조 OLED에 적합하기 때문에, 이를 이용하여 역구조 OLED의 전자 주입 효율을 향상시키기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다 [14,15].

ZnO 나노입자를 전자 주입층으로 이용하여 고효율의 역구조 OLED를 제작하기 위해선 전자 주입 특성과 더불어 정공 주입 특성이 중요하다. OLED의 재결합 효율은 전자와 정공의 균형에 의해 결정되기 때문에 전자 주입과 정공 주입의 균형을 맞추는 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 ZnO 나노입자를 역구조 OLED의 전자 주입층으로 사용하고 정공수송층(hole transport layer)으로 1,1-bis[(di-4-tolylamino)phenyl]cyclohexane (TAPC)와 4,4'-bis(carbazole-9-yl)biphenyl (CBP)를 이용하여 역구조 OLED를 제작한 후 전자와 정공의 재결합 특성을 조사하고, 정공수송층이 전기전도 및 발광 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 방법

역구조 OLED를 제작하기 위하여 면저항 $10 \Omega/\square$ 의 ITO가 증착된 유리 기판을 이용하였다. ITO 기판을 isopropyl alcohol 및 DI water를 이용하여 세정한 후 photolithography 공정에 의해 ITO 음극 패턴을 형성하고 ITO 표면을 산소 플라즈마로 처리하였다. ITO 음극 위에 약 3 nm 입자 크기의 ZnO 나노입자를 스펀코팅하여 전자 주입층을 형성하였다. ZnO 나노입자는 zinc acetate dihydrate, dimethyl sulfoxide (DMSO), tetramethylammonium

hydroxide pentahydrate (TMAH5)과 에탄올을 이용하여 합성하였다. Zinc acetate dihydrate 0.75 mmol을 7.5 ml의 DMSO 용액에 녹인 후 TMAH5 1.2 mmol을 2.5 ml의 에탄올에 용해시켰다. Zinc acetate dihydrate를 녹인 용액을 TMAH를 녹인 용액에 한 방울씩 떨어뜨린 후 교반을 진행하여 합성시킨 후 에틸 아세테이트를 넣어 ZnO 나노입자를 침전시켰다. 침전이 완료된 ZnO 나노입자 용액의 상청액을 걸여낸 후 마이크로 튜브를 이용하여 담고 원심분리를 통해 ZnO 나노입자를 모아 에탄올에 분산시켰다. 에탄올에 분산된 ZnO 나노입자를 스펀코팅에 의해 두께 약 10 nm의 전자 주입층을 형성하였다. 이후 유기물과 양극의 증착을 위해 열증착 방식의 진공증착기에 장착하였다. 전자수송층으로 두께 50 nm의 2,2',2''-(1,3,5-benzinetriyl)-tris-(1-phenyl)-1-H-benzimidazole (TPBi)를 증착한 후, 발광층(emission layer) 호스트 재료로 CBP와 녹색 인광 재료로 5 wt%의 tris(2-phenylpyridine) iridium [$\text{Ir}(\text{ppy})_3$]을 동시에 증착하였다. CBP: $\text{Ir}(\text{ppy})_3$ 발광층의 두께는 20 nm였다. 발광층을 형성한 후 정공수송층으로 30 nm 두께의 TAPC 또는 CBP를 진공증착하였다. 이후 정공 주입층으로 10 nm 두께의 MoO_3 와 양극으로 100 nm 두께의 Al을 증착하여 역구조 OLED를 완성하였다. 그림 1에 본 실험에서 사용된 역구조 OLED의 구조를 나타내었다. 완성된 소자는 질소 분위기에서 봉지하여 수분과 산소의 유입을 차단하였다. 유기물과 금속을 증착하기 위한 진공도는 약 10^{-6} torr였으며 유기물과 금속의 증착 속도는 각각 0.1 nm/s 및 1 nm/s로 유지시켰다. 제작된 역구조 OLED의 전류밀도-전압-휘도 측정을 위해 Keithley 2400 소스/미터 및 미놀타 CS1000 spectroradiometer 및 포토다이오드를 이용하였으며, EL (electroluminescence) 스펙트럼 또한 CS1000 spectroradiometer를 이용하여 측정하였다.

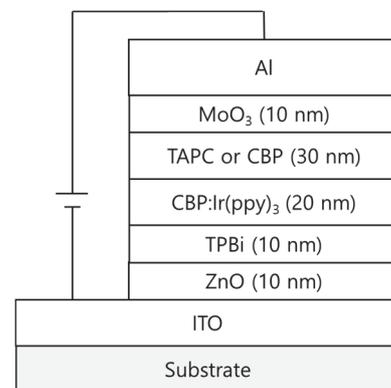


Fig. 1. Device structure of the inverted OLEDs with TAPC and CBP hole transport layers.

3. 결과 및 고찰

그림 2에 정공수송층으로 TAPC와 CBP를 이용하여 제작한 역구조 OLED의 전압에 따른 전류밀도 특성을 나타내었다. 전자수송층으로는 약 3 nm 입자 크기의 n-type ZnO를 이용하였다 [15]. 정공수송층으로 TAPC를 이용한 소자는 CBP를 사용한 소자보다 같은 전압에서 전류밀도가 높았으며 낮은 구동전압을 나타내었다. 예를 들어 TAPC를 정공수송층으로 사용한 역구조 OLED는 약 50 mA/cm²의 전류밀도를 얻기 위해 8 V의 전압이 필요하였으나 CBP를 사용한 소자는 9.6 V의 전압을 필요로 하여, TAPC를 정공수송층으로 사용한 소자가 CBP를 사용한 소자에 비해 1.6 V 구동전압이 낮았다.

정공수송층 변화에 의한 구동전압 차이를 분석하기 위하여 HOD (hole only device)를 제작하였다. 그림 3에 제작된 HOD에 대한 전류밀도-전압 특성을 나타내었다. HOD의 구조는 ITO/TAPC or CBP (80 nm)/MoO₃ (10 nm)/Al이었다. 그림에서 보는 바와 같이 TAPC를 정공수송층으로 사용한 소자가 CBP를 사용한 소자에 비해 같은 전압에서 더 많은 전류밀도를 나타내고 있어, TAPC 소자가 CBP 소자에 비해 구동전압이 낮은 것을 알 수 있다. 또한 TAPC 소자와 CBP 소자는 모두 전압이 증가함에 따라 전류밀도가 거의 선형적으로 증가하고 있으며, 이로부터 MoO₃는 CBP 및 TAPC와 오믹 특성을 갖는 것을 알 수 있다. MoO₃는 NPB와 같은 정공수송재료와 오믹 컨택을 형성하는 것으로 알려져 있다 [16,17]. CBP의 정공이동도 (hole mobility)는 약 10⁻³ cm²/Vs인 반면 TAPC는 정공이동도가 약 10⁻² cm²/Vs 정도로 높은 것으로 알려져 있다 [18,19]. 따라서 TAPC와 CBP 소자에서의 구동전압 차이는 정공 주입보다는 두 재료의 정공이동도 차이에 기인한 것으로 판단된다.

그림 4는 정공수송층으로 TAPC와 CBP를 이용하여 제작한 역구조 OLED의 전압에 따른 휘도 특성을 나타낸 것이다. TAPC를 정공수송층으로 사용한 소자의 발광개시전압 (turn on voltage, 1 cd/m²의 휘도를 얻기 위해 필요한 전압)은 4.0 V였으며, CBP를 사용한 소자의 발광개시전압은 4.4 V로 TAPC를 정공수송층으로 사용한 소자가 0.4 V 낮았다. 또한 1,000 cd/m²의 휘도를 얻기 위한 전압의 경우 TAPC 소자에서 약 6.6 V였으나 CBP 소자의 경우 약 7.2 V로 TAPC 소자에서 약 0.6 V 낮았다. 그러나 CBP를 이용한 소자의 경우 전압에 따른 휘도 증가가 더욱 빨라 최대 휘도는 CBP를 정공수송층으로 이용한 소자가 더 높았다. 예를 들어 11.8 V에서 TAPC 소자의 휘도는 50,180 cd/m²인 반면 CBP 소자는 69,360 cd/m²의 휘도를 나타내었다.

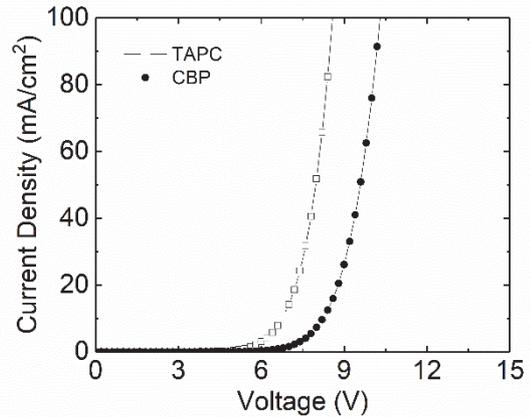


Fig. 2. Current density as a function of voltage for the inverted OLEDs with TAPC and CBP hole transport layers.

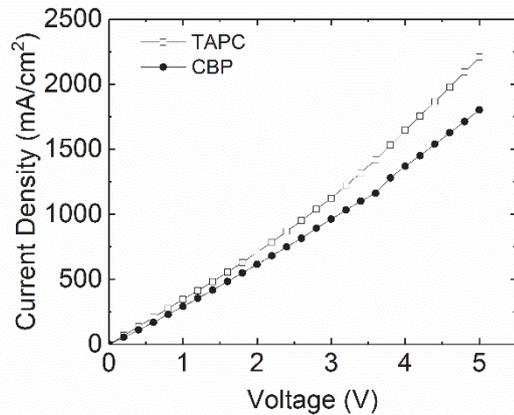


Fig. 3. Current density as a function of voltage for the HOD devices with TAPC and CBP hole transport layers.

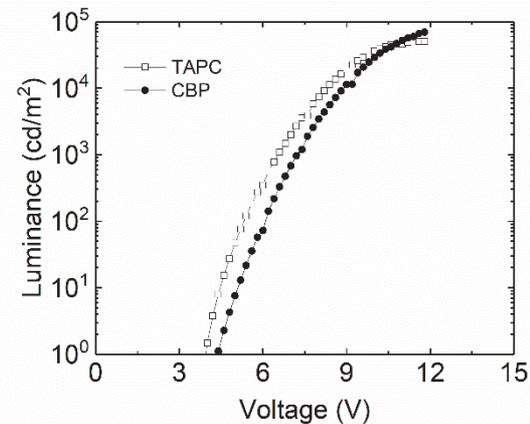


Fig. 4. Luminance as a function of voltage for the inverted OLEDs with TAPC and CBP hole transport layers.

그림 5는 정공수송층으로 TAPC와 CBP를 이용하여 제작한 역구조 OLED의 휘도에 따른 전류효율을 나타낸 것이다. CBP를 이용한 역구조 OLED가 TAPC를 이용한 소자에 비해 높은 전류효율을 나타내고 있다. CBP를 이용한 소자의 경우 최대 전류효율은 47 cd/A인 반면 TAPC를 이용한 소자의 경우 14.6 cd/A의 최대 전류효율을 나타내고 있어, CBP를 이용한 소자가 TAPC를 이용한 소자에 비해 최대 전류효율이 약 3.2배 높았다. Ir(ppy)₃의 삼중항 (triplet) 에너지는 약 2.4 eV이며 CBP와 TAPC의 삼중항 에너지는 각각 2.66 eV 및 2.87 eV이므로 [20-22], Ir(ppy)₃에서 생성된 삼중항 여기자의 에너지는 CBP 또는 TAPC 정공수송층으로 전달되지 않고 발광층 내에 갇히게 된다. 따라서 전류효율은 발광층 내에서 전자와 정공의 재결합 효율에 의해 결정된다. 그림 3에 나타낸 것처럼 MoO₃를 통한 정공의 주입은 오믹 특성을 나타내기 때문에 정공 주입에 대한 에너지 장벽은 거의 없는 것으로 판단된다. 역구조 OLED는 음극인 ITO로부터 전자수송층으로 전자 주입에 대한 장벽이 크기 때문에 전자의 주입이 상대적으로 어려운 것으로 보고되고 있다 [8-11]. ZnO 나노입자를 전자 주입층으로 사용될 경우 전자의 주입 특성이 향상되어 효율이 증가하지만 여전히 전자의 주입이 정공의 주입에 비해 어려운 것으로 알려져 있다 [13-15]. ZnO 나노입자를 이용한 EOD (electron only device) 소자의 경우 HOD 소자에 비하여 여전히 전류밀도가 낮다 [15]. 그림 2와 3에 나타낸 바와 같이 TAPC를 사용한 소자의 경우 CBP를 사용한 소자에 비하여 정공의 흐름으로 인한 전류밀도가 높다. 따라서 TAPC를 이용한 소자의 경우 CBP를 이용한 소자에 비하여 전자와 정공의 불균형이 더욱 큰 것으로 판단되며 이로 인하여 TAPC 소자가 CBP를 이용한 소자에 비하여 전류효율이 낮은 것으로 판단된다.

그림 6은 정공수송층으로 TAPC와 CBP를 이용하여 제작한 역구조 OLED의 휘도에 따른 전력효율을 나타낸 것이다. TAPC를 이용한 소자의 전력효율은 CBP를 이용한 소자에 비하여 낮은 전력효율을 나타내고 있다. TAPC를 이용한 소자의 최대 전력효율은 7.05 lm/W인 반면 CBP를 사용한 소자의 최대 전력효율은 19.5 lm/W로, TAPC를 사용한 소자에 비해 약 2.7배 높은 전력효율을 나타내고 있다. 전력효율은 전류효율에 비례하고 구동전압에 반비례한다. 그림 3에 나타낸 바와 같이 TAPC를 정공수송층으로 이용한 소자는 CBP를 이용한 소자에 비하여 구동전압이 낮은 반면 그림 5에 나타낸 바와 같이 TAPC를 이용한 소자의 전류효율이 CBP 소자에 비하여 매우 낮아, CBP 소자의 전력효율이 높게 나타나고 있다.

그림 7은 정공수송층으로 TAPC와 CBP를 이용하여 제

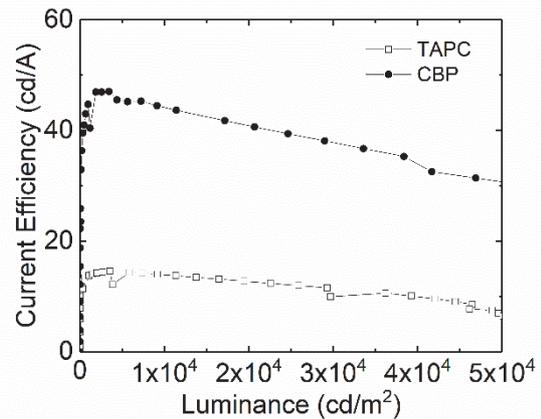


Fig. 5. Current efficiency as a function of luminance for the inverted OLEDs with TAPC and CBP hole transport layers.

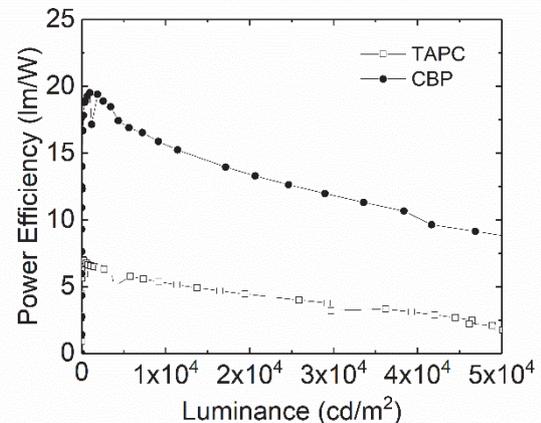


Fig. 6. Power efficiency as a function of luminance for the inverted OLEDs with TAPC and CBP hole transport layers.

작한 역구조 OLED에 대한 EL 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림 7(a)에 나타낸 바와 같이 TAPC를 이용하여 제작한 OLED는 513 nm에서 피크 값을 나타내었으며 전압에 따른 스펙트럼의 차이가 거의 없었다. 513 nm에서의 발광은 녹색 인광 재료인 Ir(ppy)₃에서의 발광에 해당한다 [20]. Ir(ppy)₃의 삼중항 에너지는 2.4 eV이며 TAPC의 삼중항 에너지는 2.87 eV이다 [22]. 따라서 Ir(ppy)₃ 삼중항 여기자의 에너지가 TAPC로 전달되지 않고 발광층에 갇히게 된다. 또한 호스트로 사용한 CBP의 삼중항 에너지는 2.66 eV로 [21], Ir(ppy)₃의 삼중항 에너지보다 크기 때문에 CBP에서 생성된 삼중항 여기자는 Ir(ppy)₃로 에너지 전달에 의해 Ir(ppy)₃에서 발광이 이루어진다. 그림 7(b)에 나타낸 바와 같이 CBP를 정공수송층으로 이용하여 제작한 OLED 또한 513 nm에서 피크 값을 나타내고 있어

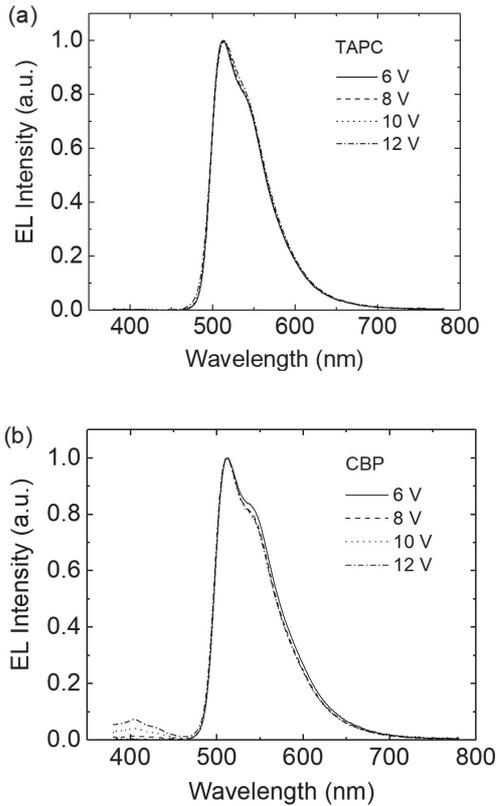


Fig. 7. EL spectra for the inverted OLEDs with (a) TAPC and (b) CBP hole transport layers.

Ir(ppy)₃에서 발광을 나타내고 있다. 그러나 CBP를 정공수송층으로 이용하여 제작한 OLED의 경우 400 nm 파장 부근에서 약한 기생 발광(parasitic emission)이 관찰되고 있다. 또한 그림에서 보는 바와 같이 400 nm 부근의 발광은 구동전압이 증가함에 따라 증가한다. 400 nm 파장 부근의 발광은 CBP에서의 발광에 해당한다 [23]. CBP의 삼중항 에너지는 Ir(ppy)₃의 삼중항 에너지보다 크기 때문에 Ir(ppy)₃에서 CBP로 에너지 전달이 일어나기 어렵다. 따라서 400 nm 부근에서 약한 발광은 CBP 정공수송층에서 전자와 정공의 재결합에 의한 것으로 판단된다. 그림 8에 TAPC와 CBP를 이용하여 제작한 역구조 OLED의 에너지 준위를 나타내었다. 그림 8(a)에 나타낸 바와 같이 TAPC를 이용하여 제작한 역구조 OLED의 경우 TAPC의 LUMO (lowest unoccupied molecular orbital) 에너지 준위는 2.0 eV이며 호스트로 사용한 CBP의 LUMO 에너지 준위는 2.9 eV이기 때문에 ITO 음극에서 주입된 전자가 CBP 호스트를 거쳐 정공수송층인 TAPC로 넘어가기 어렵다. 반면, 그림 8(b)에 나타낸 바와 같이 CBP를 정공수

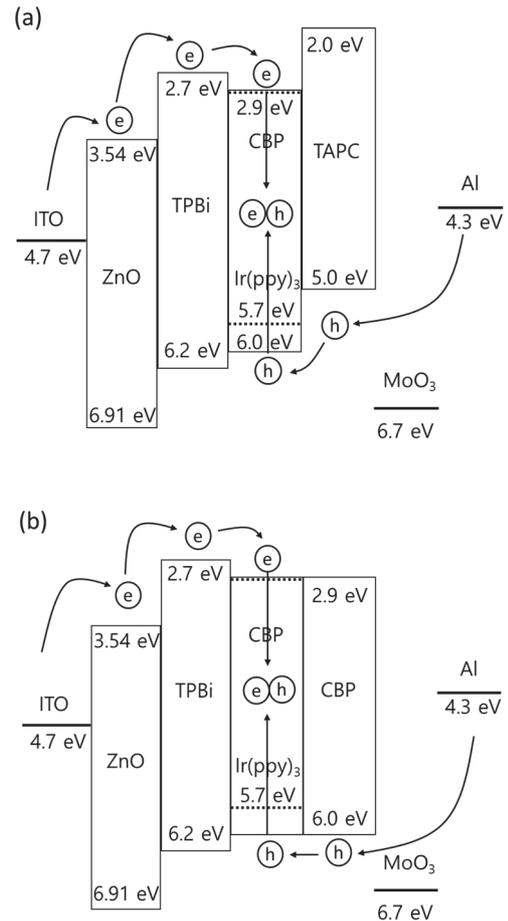


Fig. 8. Energy diagram for the inverted OLEDs with (a) TAPC and (b) CBP hole transport layers.

송층으로 사용하는 경우 CBP 호스트와 CBP 정공수송층의 LUMO 에너지 준위가 같기 때문에 음극에서 주입된 전자가 호스트를 거쳐 정공수송층까지 이동하여 정공과 재결합함에 의해 그림 7(b)에서 보는 바와 같이 CBP 정공수송층에서 약한 기생 발광이 일어나게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 TAPC와 CBP를 정공수송층으로 이용하여 역구조 OLED를 제작하고 구동 및 효율 특성, 발광 특성을 조사하였다. CBP를 정공수송층으로 이용한 역구조 OLED는 TAPC를 정공수송층으로 이용한 소자에 비해 구동전압이 높았다. CBP를 정공수송층으로 이용한 역구조 OLED의 경우 정공수송층에서 약한 재결합에 의해 기생 발광이 있었지만, 전자와 정공의 균형적 주입에 의해 최대 전

류효율이 47 cd/A로 TAPC를 사용한 소자에 비하여 3.2배 높았다. CBP를 정공수송층으로 사용한 역구조 OLED의 최대 전력효율 또한 19.5 lm/W로 TAPC를 사용한 소자에 비하여 2.7배 높았다.

ORCID

Dae-Gyu Moon

<https://orcid.org/0000-0001-9725-8718>

감사의 글

본 연구는 순천향대학교의 학술연구비 지원과 교육부-연구재단의 지자체대학협력기반 지역혁신사업으로 수행된 연구 결과임.

REFERENCES

- [1] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 913 (1987). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.98799>]
- [2] G. Hong, X. Gan, C. Leonhardt, Z. Zhang, J. Seibert, J. M. Busch, and S. Bräse, *Adv. Mater.*, **33**, 2005630 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202005630>]
- [3] M. A. Baldo, D. F. O'Brien, Y. You, A. Shoustikov, S. Sibley, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, *Nature*, **395**, 151 (1998). [DOI: <https://doi.org/10.1038/25954>]
- [4] J. M. Teng, Y. F. Wang, and C. F. Chen, *J. Mater. Chem. C*, **8**, 11340 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1039/d0tc02682d>]
- [5] M. Lu, P. de Bruyn, H. T. Nicolai, G.J.A.H. Wetzelaer, and P.W.M. Blom, *Org. Electron.*, **13**, 1693 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2012.05.032>]
- [6] L. Ding, J. N. Wang, T. Ni, Q. Xue, S. Hu, R. Wu, D. Luo, H. Zheng, Y. Liu, and B. Liu, *J. Mater. Chem. C*, **11**, 2672 (2023). [DOI: <https://doi.org/10.1039/d2tc04282g>]
- [7] H. Lee, I. Park, J. Kwak, D. Y. Yoon, and C. Lee, *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 153306 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3400224>]
- [8] H. Lee, C. M. Kang, M. Park, J. Kwak, and C. Lee, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **5**, 1977 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1021/am302787y>]
- [9] C. H. Chang, M. K. Hsu, S. W. Wu, M. H. Chen, H. H. Lin, C. S. Li, T. W. Pi, H. H. Chang, and N. P. Chen, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **17**, 13123 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1039/c5cp01692d>]
- [10] X. Wang, C. Shi, Q. Guo, Z. Wu, D. Yang, X. Qiao, T. Ahamad, S. M. Alshehri, J. Chen, and D. Ma, *J. Mater. Chem. C*, **4**, 8731 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1039/c6tc02842j>]
- [11] H. I. Yang, S. H. Jeong, S. M. Cho, R. Lampande, K. M. Lee, J. A. Hong, J. W. Choi, B. S. Kim, Y. Park, R. Pode, and J. H. Kwon, *Org. Electron.*, **89**, 106031 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2020.106031>]
- [12] S. Höfle, A. Schienle, M. Bruns, U. Lemmer, and A. Colmann, *Adv. Mater.*, **26**, 2750 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201304666>]
- [13] Y. J. Pu, N. Morishita, T. Chiba, S. Ohisa, M. Igarashi, A. Masuhara, and J. Kido, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 25373 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.5b07742>]
- [14] Y. Murat, E. Langer, J. P. Barnes, J. Y. Laurent, G. Wantz, L. Hirsch, and T. Maindron, *Org. Electron.*, **48**, 377 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2017.04.023>]
- [15] H. A. Hwang, H. J. Park, and D. G. Moon, *Synth. Met.*, **287**, 117078 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1016/J.synthmet.2022.117078>]
- [16] T. Matsuhima, Y. Kinoshita, and H. Murata, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 253504 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2825275>]
- [17] T. Matsushima, G. H. Jin, and H. Murata, *J. Appl. Phys.*, **104**, 054501 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2974089>]
- [18] J. W. Kang, S. H. Lee, H. D. Park, W. I. Jeong, K. M. Yoo, Y. S. Park, and J. J. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 223508 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2745224>]
- [19] C. W. Lee and J. Y. Lee, *Org. Electron.*, **15**, 399 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2013.11.037>]
- [20] Y. Y. Noh, C. L. Lee, J. J. Kim, and K. Yase, *J. Chem. Phys.*, **118**, 2853 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1535211>]
- [21] S. Gong, X. He, Y. Chen, Z. Jiang, C. Zhong, D. Ma, J. Qin, and C. Yang, *J. Mater. Chem.*, **22**, 2894 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1039/c1jm14903b>]
- [22] J. Lee, N. Chopra, S. H. Eom, Y. Zheng, J. Xue, F. So, and J. Shi, *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 123306 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2978235>]
- [23] P. P. Sun, J. P. Duan, H. T. Shih, and C. H. Cheng, *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 792 (2002). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1497714>]