

Poly-TPD/PVK 이중 박막 정공수송층 구조의 양자점발광다이오드

김현수, 이도형, 김바다, 황보람, 김창교 

순천향대학교 전자정보공학과

Quantum Dot Light-Emitting Diodes with Poly-TPD/PVK Bilayer Hole Transport Layer

Hyun Soo Kim, Do Hyung Lee, Bada Kim, Bo Ram Hwang, and Chang Kyo Kim
 Department of Electronics and Information Engineering, Soonchunhyang University, Asan 31538, Korea

(Received June 27, 2019; Revised July 15, 2019; Accepted July 18, 2019)

Abstract: A poly[bis(4-butylphenyl)-bis(phenyl)benzidine] (poly-TPD) and poly(9-vinylcarbazole) (PVK) bilayer was employed as a hole transport layer (HTL) in solution-processed CdSe/ZnS quantum dot light-emitting diodes (QLEDs). The thickness of the PVK layer spin-coated onto the poly-TPD layer, whose thickness was fixed to 40 nm, was varied, with PVK layer thicknesses of 0 nm, 35 nm, 45 nm, and 55 nm. Because the thickness of the PVK can determine the hole transport properties of the HTL, a PVK thickness that maximizes the performance of the HTL for the QLEDs was investigated. By employing the optimized PVK thickness of 45 nm, the current efficiency of the QLED exhibited a 1.74 times improvement when compared with that of the QLED with poly-TPD based HTL without PVK. This was mainly attributed to the decrease in the energy barrier between the HTL and the quantum dot (QD) emitting layer (EML).

Keywords: Quantum dot, Quantum dot light-emitting diodes, Hole transport layer, Poly-TPD, PVK

1. 서 론

콜로이드 양자점(colloidal quantum dot)은 우수한 발광 효율과 높은 색순도를 가지고 있고 색 재현 범위를 OLED (organic light-emitting diode)에 비해 크게 넓힐 수 있을 뿐만 아니라, 양자점의 크기에 따라서 발광하는 빛의 파장을 쉽게 제어할 수 있어서 관심이 집중되고 있다 [1-6]. 현재 콜로이드 양자점의 전기발광(electroluminescence, EL) 현상을 이용하는 QLED (quantum dot light-emitting diode)의 발광재료가 무기재료이기 때문에 유기재료를 사용하는 OLED 재료의 한계를 극복하기 위해 많은 연구가 이루어지고 있다 [7,8]. 유기재료와 무기재료 또는 유기재료/무기재

료 하이브리드 재료를 사용해서 전하수송층과 전하주입층을 변화시켜서 QLED의 효율을 증가시키는 연구가 진행되고 있다 [9-13].

일반적으로 양자점의 가전자대역 상단은 QLED에서 사용하는 유기재료의 HOMO (highest occupied molecular orbital) 레벨보다 낮고 양자점의 전도대역 하단은 유기재료의 LUMO (lowest unoccupied molecular orbital) 레벨보다 낮다. 그래서 전자수송과 정공수송의 불균형에 의한 양자점 발광층에서 전자와 정공 농도의 불균형이 낮은 QLED 효율의 주요인으로 알려져 있다 [14]. 최근에 용액공정으로 도포하는 ZnO 나노입자가 높은 전자이동도와 적절한 전도대역 하단 에너지 준위를 가지고 있기 때문에 전자수송층으로 주로 사용되고 있다 [13,14].

QLED에서 많이 사용되는 정공수송층(hole transport layer, HTL)인 poly-TPD (poly[bis(4-butylphenyl)-bis(phenyl) benzidine])는 5.3 eV의 HOMO 레벨을 가지고 있고 정공수송 특성이 좋다 [15]. 그러나 poly-TPD에서 양자점 발광층으로 정공을 주입하기 위한 에너지

✉ Chang Kyo Kim; cckim1@sch.ac.kr

장벽이 1 eV로 전자를 양자점으로 주입시키기 위한 에너지 장벽이 매우 크다. 그러므로 전자와 정공의 평형을 맞추어서 QLED의 효율을 높일 수 있는 적합한 정공주입층이 필요하다 [15,16]. 정공주입/수송층으로는 NiO와 MoO₃와 같은 무기재료뿐만 아니라 유기재료가 많이 사용되고 있다 [10,15-20]. 일반적으로 전자수송층(electron transport layer, ETL)에서 전하이동도가 정공수송층에서 정공이동도보다 크기 때문에 정공수송층의 정공수송 특성을 향상시키기 위한 연구가 많이 진행되고 있다 [15-20]. 최근 정공수송층과 양자점 사이의 에너지 장벽을 최소화하기 위해 2개의 물질을 복합체로 합성하거나 2개의 물질을 이중 정공수송층 구조로 제작해서 QLED 효율을 증가시킨 보고가 있다 [13,15]. 정공수송층을 도포하기 위해 진공증착법과 함께 저가이면서 대면적 도포가 가능하기 때문에 용액 공정법에 대한 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 poly-TPD가 높은 정공이동도를 가지고 있고 PVK (poly(9-vinylcarbazole))의 깊은 HOMO 레벨이 정공수송층과 양자점 사이의 에너지 장벽을 낮추는 데 도움이 되기 때문에 poly-TPD와 PVK로 구성된 이중 정공수송층을 가지는 QLED를 용액공정으로 제작하고 특성을 분석하였다. Poly-TPD막 도포 후에 PVK 박막을 도포하였는데 PVK 용액의 용매에 의해 poly-TPD 박막이 손상되기 때문에 poly-TPD 박막을 열처리를 통해 가교화(cross-linking)한 후에 PVK를 도포하여 이중 정공수송층을 제작하였다 [21,22]. 전극으로 사용된 ITO와 Al을 제외하고는 용액공정으로 QLED를 제작하였다. Poly-TPD만의 단일 정공수송층을 사용하였을 때 QLED의 발광효율이 2.93 cd/A이었는데 반하여 이중 정공수송층을 채택하였을 때의 발광효율은 5.09 cd/A로 1.74배 증가하였다. 이러한 효율의 증가는 PVK의 깊은 HOMO 레벨에 의해서 정공수송층으로부터 양자점으로 정공이 쉽게 이동할 수 있는 것에 기인한 것으로 여겨진다.

2. 실험 방법

2.1 QLED 제조 방법

용액공정을 이용하여 QLED를 제작하였다. 유리기판 위에 스퍼터 증착된 ITO (indium tin oxide) 박막 기판을 양극으로 사용하였다. ITO 박막의 면저항은 10 Ω/□이었다. ITO 박막에 포토리소그래피 공정을 통해

패턴을 형성하였다. 이후에 패턴 형성된 ITO 기판을 습식으로 세정한 후, 산소 플라즈마 처리를 통해 ITO 기판을 표면처리 하였다. 산소 플라즈마 처리는 5.0×10⁻³ torr의 진공환경에서 산소가스를 30 sccm으로 챔버 내에 흘려주며 10 W의 RF power로 3분 동안 실시하였다.

소자의 정공수송층으로는 poly-TPD (Xi'an polymer)와 PVK (Sigma Aldrich)를 채택하였다. Poly-TPD는 우수한 정공수송특성을 보이는 물질로서 박막코팅 후 고온에서 열처리하면 분자사슬을 가교화시킬 수 있기 때문에 다음 공정에서 사용되는 용매에 쉽게 녹지 않는 특성을 지니고 있다. 톨루엔에 poly-TPD를 1 wt%의 농도로 분산한 후에 12시간 동안의 교반을 통하여 용해하여 poly-TPD 용액을 제작하였다. 제작된 poly-TPD 용액을 ITO 표면에 1,500 rpm (revolutions per minute)으로 15초 동안 스핀 코팅하여 도포하였다. 도포된 박막을 가교화하기 위해 220°C에서 30분 동안 열처리하여 40 nm 두께의 poly-TPD 박막을 형성하였다. 제작된 poly-TPD 박막의 두께는 알파스텝(Kosaka Laboratory ET200)을 이용하여 확인하였다. Poly-TPD보다 깊은 HOMO를 갖고 있기 때문에 PVK를 이중 정공수송층 재료로 채택하였다. 2 wt% PVK를 클로로벤젠에 분산한 후에 12시간 동안 교반하여 PVK 용액을 제작하였다. 열처리를 통해 가교화된 poly-TPD 박막 위에 제작된 PVK 용액을 2,000 rpm에서 15초 동안 스핀 코팅하여 형성된 박막을 50°C에서 열처리하여 45 nm 두께의 PVK 박막을 형성하여 poly-TPD/PVK 이중 정공수송층을 제작하였다. 제작된 PVK 박막은 알파스텝(Kosaka Laboratory ET200)을 이용하여 확인하였다. Poly-TPD 위에 형성한 PVK의 두께 변화에 따른 QLED의 특성을 최적화하기 위해 스핀코팅 회전수를 조절하여 35 nm, 45 nm 그리고 55 nm 두께의 PVK 박막을 형성하였다. CdSe/ZnS 양자점(ZEUS)은 10 mg/ml의 농도로 헵탄에 분산시킨 후 3,000 rpm에서 3초 동안 스핀코팅을 실시하여 20 nm 두께의 QD 박막을 poly-TPD/PVK 이중 정공수송층 위에 형성하였다.

전자수송층으로 사용되는 ZnO 나노입자 (nanoparticles, NPs)는 졸-겔(sol-gel)법을 이용하여 합성하였다 [23]. ITO/poly-TPD/PVK/QD 박막 위에 2,000 rpm에서 15초 동안 ZnO NPs 용액을 스핀코팅하여 40 nm 두께의 박막을 형성하였다.

마지막으로 ITO/poly-TPD/PVK/QD/ZnO NPs 기판을 진공챔버의 기판부에 위치시킨 후 음극마스크를 설치 후에 10⁻⁷ Torr의 고진공에서 100 nm의 두께로 Al 증착을 실시하여 QLED를 제작을 완료하였다. QLED 내

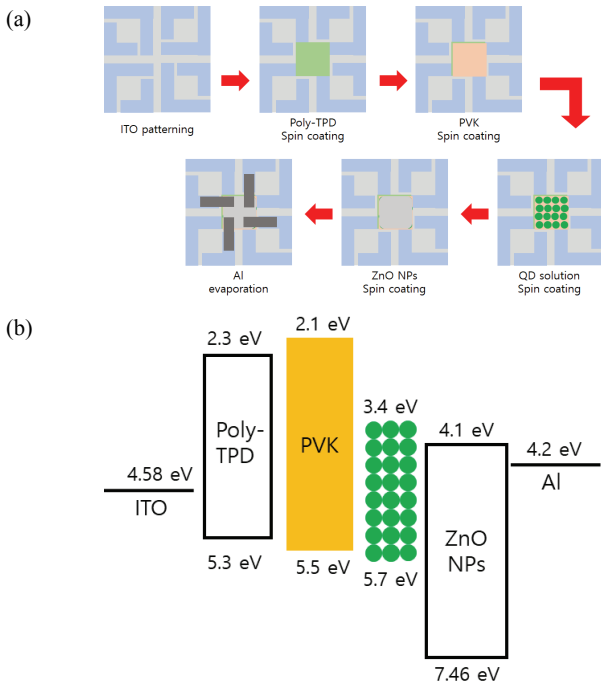


Fig. 1. (a) Schematic diagram of the fabrication process for the quantum dot light-emitting diodes (QLEDs) (b) energy band diagram of the QLEDs.

부로 침투되는 산소 및 수분을 차단하기 위해 QLED 기판에 봉지를 한 후에 QLED의 특성을 분석하였다. 그림 1(a)는 제작공정 순서도를 보여주고 그림 1(b)는 에너지 밴드 다이어그램을 보여주고 있다.

2.2 QLED 소자 특성 평가

본 연구에서는 poly-TPD의 제작된 QLED 소자의 전류밀도-전압-휘도 특성은 컴퓨터로 제어되는 Keithley 2400 Source-measure unit와 휘도미터 (Minolta LS100)로 측정하였다. 전기발광 스펙트럼(Electroluminescence spectra, EL spectra)와 광발광 스펙트럼(Photoluminescence, PL spectra)은 Spectroradiometer (Minolta CS1000)으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

이중 poly-TPD와 PVK로 구성된 이중 정공수송층에서 PVK의 두께를 변화시키면서 QLED 특성을 조사하기 위해 4개의 다른 구조를 가진 소자를 제작하여 특

성을 조사하였다. 전자이동도가 아주 우수하고 HOMO 레벨이 깊어 양자점 발광층에 주입된 정공이 음극으로 이동하는 것을 방지할 수 있는 ZnO NPs를 전자수송층으로 사용하였다. 음극으로는 일함수가 낮은 Al을 사용하였다. 소자 특성을 조사하기 위한 소자 구조는 다음과 같다.

- 소자 A: ITO (150 nm)/poly-TPD (40 nm)/QD (20 nm)/ZnO NPs (40 nm)/Al (100 nm)
- 소자 B: ITO (150 nm)/poly-TPD (40 nm)/PVK (35 nm)/QD (20 nm)/ZnO NPs (40 nm)/Al (100 nm)
- 소자 C: ITO (150 nm)/poly-TPD (40 nm)/PVK (45 nm)/QD (20 nm)/ZnO NPs (40 nm)/Al (100 nm)
- 소자 D: ITO (150 nm)/poly-TPD (40 nm)/PVK (55 nm)/QD (20 nm)/ZnO NPs (40 nm)/Al (100 nm)

그림 2는 4개의 정공수송층 구조의 QLED 소자의 전류밀도-전압 특성곡선을 보여주고 있다. 정공수송층으로 poly-TPD 단층박막이 적용된 소자 A의 턴온 전압(turn-on voltage)은 5.3 V로 가장 높았다. 반면에 poly-TPD/PVK의 이중 정공수송층을 채택한 소자 B, 소자 C와 소자 D에서는 모두 턴온 전압이 4.2 V로 동일한 값을 보여주었다. 이러한 결과로부터 PVK가 에너지 장벽 차이로 인해 발광층으로 주입이 어려웠던 정공을 더 낮은 전압에서 용이하게 주입시키는 역할을 하는 것으로 생각할 수 있다. 또한 그림 2로부터 인가 전압이 10 V일 때 전류밀도는 소자 A, 소자 B, 소자 C와 소자 D에 대해 각각 127.9 mA/cm², 170.8 mA/cm², 167.3 mA/cm²와 165.0 mA/cm²이었다. Poly-TPD 단일 정공수송층 구조를 가진 소자 A의 전류밀도가 가장 작았고 poly-TPD/PVK 이중 정공수송층 구조를 가진 소자 B의 전류밀도가 가장 높았고 소자 C와 소자 D에서는 PVK의 두께가 두꺼울수록 전류밀도가 낮았다.

그림 3은 QLED 소자의 휘도-전압 특성을 보여주고 있다. 소자 A, 소자 B, 소자 C와 소자 D의 휘도에 대한 턴온 전압은 5.3 V, 4.2 V, 4.1 V와 4.2 V이었다. 여기에서 휘도에 대한 턴온 전압은 휘도 1 cd/m²의 빛을 발광시키기 위한 인가전압으로 정의하였다. Poly-TPD 단층 정공수송층을 사용하는 소자 A가 가장 높은 휘도에 대한 턴온 전압을 보여 주었고 45 nm

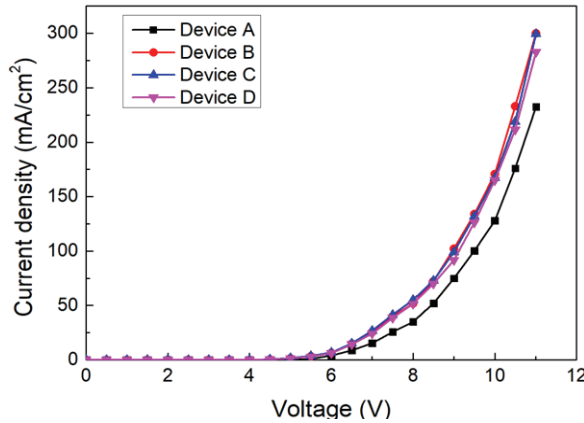


Fig. 2. Current density versus voltage characteristics for the QLEDs.

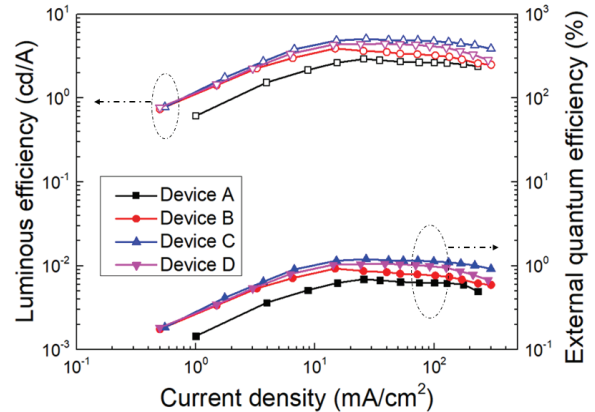


Fig. 4. Current efficiency and external quantum efficiency characteristics for the QLEDs.

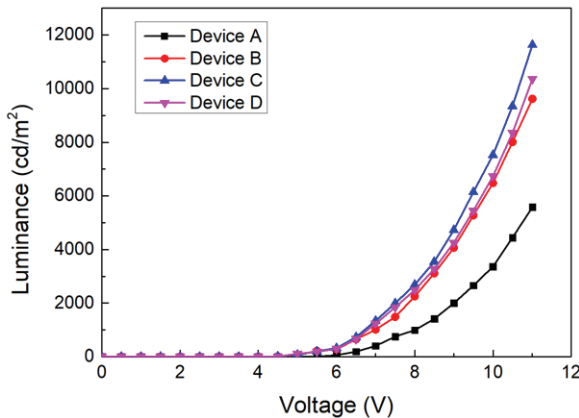


Fig. 3. Luminance versus voltage characteristics for the QLEDs.

PVK를 가지는 poly-TPD/PVK 이중 정공수송층을 갖는 소자 C가 가장 낮은 휘도에 대한 턴온 전압을 보여주었다. 소자 A, 소자 B, 소자 C와 소자 D에 대한 최대 휘도는 각각 $5,580 \text{ cd/m}^2$, $9,680 \text{ cd/m}^2$, $11,634 \text{ cd/m}^2$, $10,359 \text{ cd/m}^2$ 이었다. Poly-TPD 단층 정공수송층을 사용하는 소자 A가 가장 낮은 휘도를 보여주었고 45 nm PVK를 갖는 poly-TPD/PVK 이중 정공수송층을 갖는 소자 C가 가장 높은 최대 휘도를 보여주었다. Poly-TPD/PVK 구조의 정공수송층에서 PVK의 두께가 45 nm일 때 양자점에서 엑시톤 형성에 의한 재결합이 가장 많이 발생한다는 것을 나타낸다. 이는 소자 D의 전류밀도 특성이 소자 C보다 좋지만, 소자 D에서는 양자점으로 주입되는 정공보다 전자의 양이 충분하지 않아서 양자점에서 엑시톤 형성 효율이 감소하는 것으로 설명할 수 있다.

그림 4는 전류밀도-발광효율-외부양자효율 특성을

보여주고 있다. 소자 A, 소자 B, 소자 C와 소자 D에 대한 최대 발광효율은 각각 2.93 cd/A , 3.92 cd/A , 5.09 cd/A , 4.45 cd/A 이었고 소자 A, 소자 B, 소자 C와 소자 D에 대한 최대 양자효율은 각각 0.69% , 0.93% , 1.2% 와 1.05% 이었다. Poly-TPD 단일 정공수송층을 적용한 QLED 소자의 발광효율과 외부양자효율이 가장 작았다. 이는 poly-TPD와 양자점 사이의 에너지 장벽이 가장 크기 때문에 전자와 정공의 전하평형을 맞추기 위한 정공 공급이 충분하지 않았기 때문이다. Poly-TPD/PVK 이중 정공수송층을 사용하면 정공수송층에서 양자점 사이의 에너지 장벽이 감소하기 때문에 정공 공급이 원활하게 되어서 발광효율과 외부양자효율이 증가하였다. Poly-TPD/PVK 이중 정공수송층 구조를 가진 QLED 소자 중에서 PVK의 두께가 45 nm인 소자 C의 양자점에서 가장 효율적으로 엑시톤이 형성되어서 가장 높은 발광효율과 외부양자효율을 보여주었다.

그림 5(a)는 254 nm LED를 이용하여 양자점을 여기시켰을 때 광발광 스펙트럼을 보여주고 있다. 본 연구에서 사용한 양자점은 532 nm의 파장에서 발광 피크를 가지고 있고 반치폭은 32 nm이었다. 그림 5(b)는 10 V 전압을 인가하였을 때 QLED 소자의 전기발광 스펙트럼을 보여주고 있다. 모든 QLED 소자는 528 nm의 파장에서 발광 피크를 보여주었고 424 nm 파장에서 아주 작은 피크를 보여주었다. 이는 대부분의 전자와 정공의 재결합이 양자점에서 이루어지는 것으로 생각할 수 있다. 528 nm 파장에서의 피크는 소자 C가 가장 크고, 다음은 소자 D, 다음은 소자 B이고 소자 A는 가장 작은 피크를 보여 주었다. 이것은 소자 A가 단층 poly-TPD로 구성되어 있어서 정공수송층으로부터

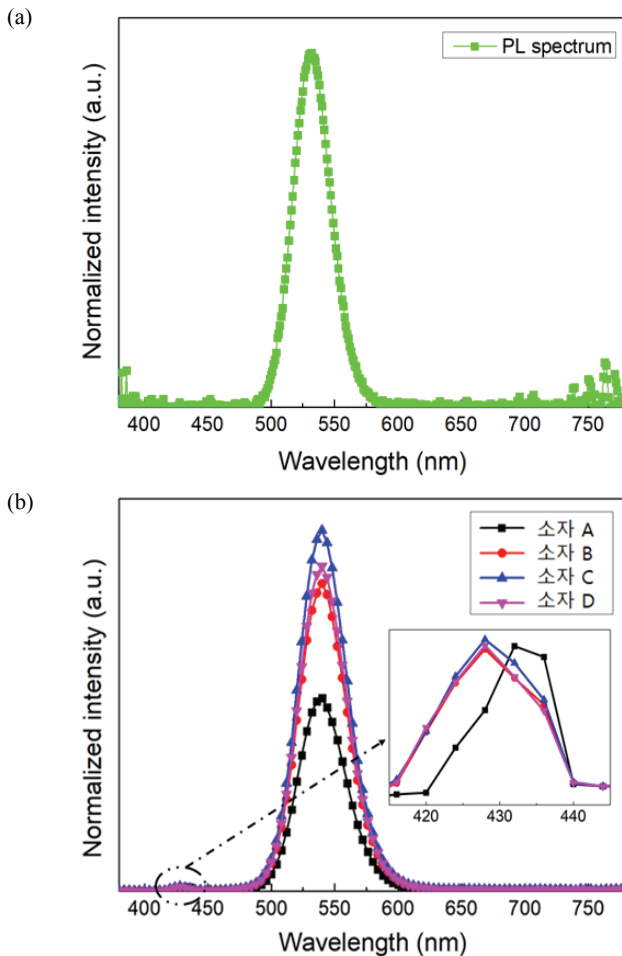


Fig. 5. EL spectra at 10 V for the QLEDs.

터 양자점 발광층으로 정공주입이 가장 어려웠기 때문이다. 그림 5(b) 안의 작은 그림을 보면 소자 A는 432 nm 파장에서 아주 작은 발광피크를 보여주고 있는데, 이것은 아주 작은 양의 전자와 정공의 재결합이 양자점과 가까운 poly-TPD의 표면 부근에서 일어나는 것으로 생각되고 소자 효율이 감소되는 원인이 된다. 또한 소자 B, 소자 C, 소자 D는 428 nm 파장에서 작은 피크를 보여주고 있는데, 이는 양자점과 가까운 PVK의 표면 부근에서 전자와 정공의 재결합에 의한 것으로 보인다. 전기발광 스펙트럼과 비교하여 광발광 스펙트럼에서 발광 피크 파장이 긴 방향으로 약간 이동하였다. 이것은 254 nm 파장의 광을 조사하였을 때 반지름이 작은 양자점에서 반지름이 큰 양자점으로 포스터 공명 에너지 전달(Föster resonant energy transfer)에 의한 것으로 생각된다 [24].

4. 결론

음극과 양극 전극 외에는 전 공정을 용액공정으로 제작한 QLED의 발광효율을 향상시키기 위해 소자의 정공수송층을 poly-TPD와 PVK 이중 박막으로 형성하여 양극으로부터 주입되는 정공을 효과적으로 양자점 발광층에 전달하여 전하의 불균형을 해소시켜 높은 발광효율의 QLED 소자를 개발하였다. Poly-TPD/PVK 이중 정공수송층에서 PVK를 사용하지 않고 poly-TPD만의 단일 정공수송층과 PVK의 두께를 변화시켜서 높은 발광효율을 얻을 수 있도록 소자 구조를 최적화하였다. Poly-TPD만의 단일 정공수송층을 가진 QLED의 휘도, 발광효율과 외부양자효율 특성이 poly-TPD/PVK 이중 정공수송층을 가진 QLED보다 낮았다. 이는 PVK를 poly-TPD와 양자점 사이에 위치시켜서 정공수송층과 양자점 사이의 에너지 장벽을 낮추었기 때문으로 사료된다. 또한 이중 정공수송층의 PVK 두께가 45 nm일 때 QLED의 휘도에 대한 턴온 전압이 4.1 V로 가장 작았고 최대 휘도는 11,634.4 cd/m², 최대발광효율은 5.09 cd/A이고 외부양자효율은 1.2%로 가장 높았다. 이는 이중 정공수송층을 구성하고 있는 PVK 두께가 45 nm일 때 양자점 안에서 엑시톤이 효율적으로 형성되었음을 나타낸다.

ORCID

Chang Kyo Kim

<https://orcid.org/0000-0002-5445-9867>

감사의 글

이 논문은 2018학년도 순천향대학교 교수 연구년제에 의하여 연구되었습니다. 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] P. O. Anikeeva, J. E. Halpert, M. G. Bawendi, and V. Bulović, *Nano Lett.*, **9**, 2532 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1021/nl9002969>]
- [2] X. Yang, D. Zhao, K. S. Leck, S. T. Tan, Y. X. Tang, J. Zhao, H. V. Demir, and X. W. Sun, *Adv. Mater.*, **24**, 4180 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201104990>]
- [3] W. K. Bae, J. Kwak, J. Lim, D. Lee, M. K. Nam, K. Char, C. Lee, and S. Lee, *Nano Lett.*, **10**, 2368 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1021/nl100168s>]

- [4] L. Qian, Y. Zheng, J. Xue, and P. H. Holloway, *Nat. Photonics*, **5**, 543 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2011.171>]
- [5] Z. Zhong, J. Zou, C. Jiang, L. Lan, C. Song, Z. He, L. Mu, L. Wang, J. Wang, J. Peng, and Y. Cao, *Org. Electron.*, **58**, 245 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2018.04.014>]
- [6] J. S. Steckel, P. Snee, S. Coe-Sullivan, J. P. Zimmer, J. E. Halpert, P. Anikeeva, L. A. Kim, V. Bulovic, and M. G. Bawendi, *Angew. Chem.*, **45**, 5796 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1002/anie.200600317>]
- [7] V. Wood and V. Bulović, *Nano Rev.*, **1**, 5202 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.3402/nano.v1i0.5202>]
- [8] Y. Shirasaki, G. J. Supran, M. G. Bawendi, and V. Bulović, *Nat. Photonics*, **7**, 13 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2012.328>]
- [9] V. Wood, M. J. Panzer, J. E. Halpert, J. M. Caruge, M. G. Bawendi, and V. Bulović, *ACS Nano*, **3**, 3581 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1021/nn901074r>]
- [10] J. M. Caruge, J. E. Halpert, V. Bulović, and M. G. Bawendi, *Nano Lett.*, **6**, 2991 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1021/nl0623208>]
- [11] R. Vasan, H. Salman, and O. Manasreh, *IEEE Electron Device Lett.*, **39**, 536 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1109/LED.2018.2808679>]
- [12] Y. Yang, Y. Zheng, W. Cao, A. Titov, J. Hyvonen, J. R. Manders, J. Xue, P. H. Holloway, and L. Qian, *Nat. Photonics*, **9**, 259 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.36>]
- [13] C. Jiang, H. Liu, B. Liu, Z. Zhong, J. Zou, J. Wang, L. Wang, J. Peng, and Y. Cao, *Org. Electron.*, **31**, 82 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2016.01.009>]
- [14] H. Zhang, H. Li, X. Sun, and S. Chen, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **8**, 5493 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.5b12737>]
- [15] X. Zhang, H. Dai, J. Zhao, S. Wang, and X. Sun, *Thin Solid Films*, **603**, 187 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.02.017>]
- [16] J. M. Caruge, J. E. Halpert, V. Wood, V. Bulović, and M. G. Bawendi, *Nat. Photonics*, **2**, 247 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2008.34>]
- [17] A. Castan, H. M. Kim, and J. Jiang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 2508 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1021/am404876p>]
- [18] J. H. Yu, S. B. Heo, M. Kim, Y. Yi, and S. J. Kang, *Thin Solid Films*, **687**, 137444 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.137444>]
- [19] X. L. Zhang, H. T. Dai, J. L. Zhao, C. Li, S. G. Wang, and X. W. Sun, *Thin Solid Films*, **567**, 72 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.07.030>]
- [20] A. Balati, A. Bazilio, A. Shahriar, K. Nash, and H. J. Shipley, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **99**, 68 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.04.017>]
- [21] G. R. Yi, H. S. Kim, K. W. Jeong, and C. K. Kim, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **651**, 99 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1080/09273948.2017.1338904>]
- [22] G. Klärner, J. I. Lee, V. Y. Lee, E. Chan, J. P. Chen, A. Nelson, D. Markiewicz, R. Siemens, J. C. Scott, and R. D. Miller, *Chem. Mater.*, **11**, 1800 (1999). [DOI: <https://doi.org/10.1021/cm9900271>]
- [23] K. W. Jeong, H. S. Kim, G. R. Yi, and C. K. Kim, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **663**, 61 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1080/15421406.2018.1468099>]
- [24] M. C. Schlamp, X. Peng, and A. P. Alivisatos, *J. Appl. Phys.*, **82**, 5837 (1997). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.366452>]