



<연구논문>

ISSN 1225-8024(Print)
ISSN 2288-8403(Online)

한국표면공학회지
J. Korean Inst. Surf. Eng.
Vol. 49, No. 3, 2016.

<http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2016.49.3.316>

전하생성층 MoO_x와 음극 Al의 두께에 따른 양면발광 적층 OLED의 발광 특성

김지현, 주성후*

대전대학교 신소재공학과

Emission Characteristics of Dual Emission Tandem OLED with Charge Generation Layer MoO_x and Cathode Al Thickness

Ji-Hyun Kim, Sung-Hoo Ju*

Department of Advanced Materials Science & Engineering, Daejin University, Pocheon 11159, Korea

(Received May 24, 2016 ; revised June 23, 2016 ; accepted June 28, 2016)

Abstract

To study emission characteristics for dual-emission tandem organic light emitting display (OLED), we fabricated blue fluorescent OLED according to thickness variation of MoO_x as charge generation layer and Al as cathode. The bottom emission characteristics of OLED with MoO_x 2, 3, 5 nm thickness showed threshold voltage of 9, 7, 9 V, maximum current emission efficiency of 19.32, 23.18, 15.44 cd/A and luminance of 1,000 cd/m² at applied voltage of 17.6, 13.2, 16.5 V, respectively. The top emission characteristics of OLED with MoO_x 2, 3, 5 nm thickness indicated threshold voltage of 13, 10, 13 V, maximum current emission efficiency of 0.17, 0.23, 0.16 cd/A and luminance of 50 cd/m² at applied voltage of 22.6, 16.5, 20.1 V, respectively. In case of thicker or thinner than MoO_x of 3 nm, the emission characteristics were decreased because of mismatching of electron and hole in emission layer. The bottom emission characteristics of OLED with Al 15, 20, 25 nm thickness showed threshold voltage of 8, 8, 7 V, maximum current emission efficiency of 18.42, 22.98, 23.18 cd/A and luminance of 1,000 cd/m² at applied voltage of 16.2, 13.9, 13.2 V, respectively. The reduction of threshold voltage and increase of maximum current emission efficiency are caused by the increase of current injection according to increase of Al cathode thickness. The top emission characteristics of OLED with Al 15, 20, 25 nm thickness indicated threshold voltage of 7, 7, 8 V, maximum emission luminance of 371, 211, 170 cd/m², respectively. The top emission OLED of Al cathode with 15 nm thickness showed maximum luminance and it decreased at thickness of 20 nm. These phenomena are caused by the decrease of intensity of emitted light by reduction of optical transmittance according to increase of Al cathode thickness.

Keywords : Organic light emitting display, Dual emission, Tandem, Charge generation layer, Cathode

1. 서 론

유기전계발광소자(Organic Light Emitting Device : OLED)는 빠른 응답 속도, 높은 명암비, 낮은 소

모 전력, 얇은 두께, 낮은 생산 비용 등의 다양한 장점을 가지고 있어 디스플레이 및 조명용 광원으로 적용하기 위한 발광효율 및 수명 향상에 대한 연구가 지속되고 있다[1,2]. 발광회도 및 수명 향상의 방법으로는 인광 물질을 적용한 OLED와 적층 구조 OLED가 많은 관심을 받고 있다[3-5]. 적층 구조 OLED란 두 개 이상의 단일구조 OLED 사이에 전자와 정공의 산화환원반응으로부터 전자와 정공이 생성되는 전하생성층(Charge Generation Layer;

*Corresponding Author : Sung-Hoo Ju

Department of Advanced Materials Science & Engineering,
Daejin University
Tel : +82-31-539-1985 ; Fax : +82-31-539-1980
E-mail : sunghooju@daejin.ac.kr

CGL)을 삽입하여 제작한 OLED이다. 이러한 전하 생성층의 구조에 따라 적층형 OLED의 특성이 변화되어 전하생성층의 중요성이 대두되고 있다[6-8].

OLED는 발광층에서 발광된 빛이 방출되는 방향에 따라 기판 방향으로 방출되는 배면 발광, 기판의 반대 방향으로 방출되는 전면발광, 기판과 기판의 반대 방향으로 모두 방출되는 양면발광 OLED로 분류할 수 있다. 양면발광 OLED는 양극과 음극 전극의 물질을 투명한 물질로 사용하여 빛이 발광하지 않는 경우에는 투명하게 되어 투명 OLED라고도 한다. 최근 기능성 재료를 투명전극으로 사용하여 발광하지 않는 경우에는 투명한 OLED 소자를 제작하는 연구가 진행되고 있다[9-12]. 투명한 화소 및 구동소자로 구현함으로써 기존 디스플레이가 가지고 있는 공간적·시각적 제약을 확대하고자 하는 노력이 경주되고 있다. 양면발광 OLED를 구현하기 위해서는 투명소재 기술과 공정 기술, 트랜지스터 등의 단위소자 기술, 그리고 투명 패널 등의 소자 설계 및 제작 기술 개발이 요구되고 있다[10].

본 연구에서는 양면발광 적층구조 OLED의 발광 특성을 연구하기 위하여 전하생성층으로 사용되는 MoO_x와 음극전극으로 사용되는 Al의 두께를 변화시켜 OLED를 제작하였다. 제작한 양면발광 적층구조 OLED의 전기적 광학적 특성은 전류-전압-휘도 (I-V-L)를 측정하여 분석하였다.

2. 실험 방법

투명한 양면발광 적층구조 OLED를 제작하기 위하여 면저항 10 Ω/□, 두께 150 nm의 ITO (Indium Tin Oxide)가 증착된 유리 기판을 사용하여 사진 식각 공정으로 2.8 mm × 2.8 mm 크기의 화소 모양을 형성하였다. 형성된 화소의 ITO는 표면처리를 위하여 대기압에서 UV를 조사하고, 1.6 × 10⁻¹ torr의 산소분위기에서 플라즈마 처리를 하였다. 이후 1.0 × 10⁻⁶ torr 이하의 고진공에서 열 기상 증착 방법으로 유기물은 1 Å/s, Liq는 0.5 Å/s, Al은 2 Å/s, MoO_x는 0.5 Å/s의 증착속도로 박막을 증착하였다.

그림 1은 제작한 청색 형광 양면발광 적층 OLED의 구조를 나타낸 것이다. 양면발광 적층 OLED는 ITO / MoO_x / 2-TNATA(4,4,4-tris(2-naphthyl phenyl)aminotriphenylamine) / NPB (N,N'-bis-(1-naphyl)-N,N'-diphenyl-1,1'-biphenyl-4,4'-diamine) / SH-1 : 3 vol.% BD-2 / Bphen (4-7-diphenyl-1,10-phenanthroline) / Liq (8-hydroxy-quinolinato lithium) / Al / MoO_x / 2-TNATA / NPB / SH-1 : 3 vol.% BD-2 / Bphen / Liq / Al의 구조로 제작하였다.

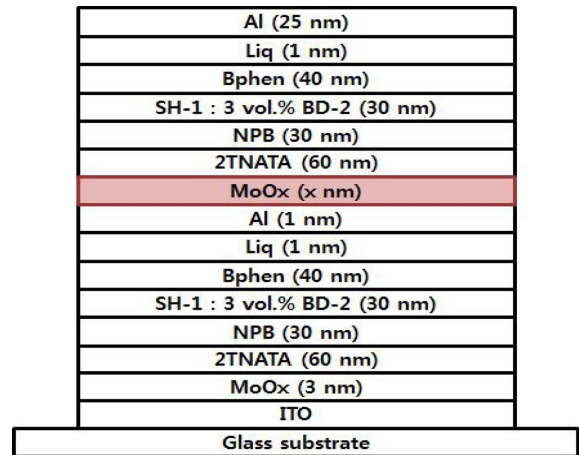


Fig. 1. Structure of dual-emission tandem OLEDs.

제작된 OLED 소자를 발광시키기 위하여 양극인 ITO에 (+) 전압을 인가하고, 음극인 Al에 (-) 전압을 인가하는 전원 인가 장치로 Keithley 2400을 사용하여 전압과 전류를 인가하였다. 소자에서 발광된 휘도는 Minolta사의 CS-100A Luminescence Meter와 Photo Research사의 PR-650 Spectrascan을 사용하여 측정하였다. 전류발광효율은 측정된 전류 밀도와 발광휘도로부터 전류발광효율(cd/A) = 발광휘도(cd/m²) ÷ 전류밀도(A/m²)의 계산식을 이용하여 도출하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 음극 Al의 두께를 25 nm로 고정하고 전하생성층의 MoO_x 두께를 2, 3, 5 nm로 변화시켜 제작한 청색 형광 양면발광 적층 OLED의 인가전

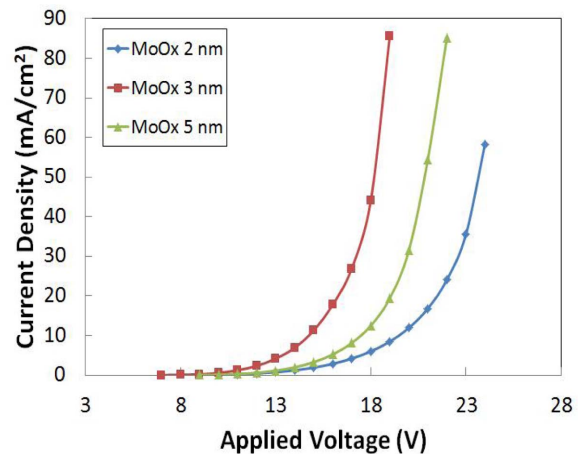


Fig. 2. Current density vs. applied voltage characteristics for dual emission tandem OLEDs with MoO_x thickness.

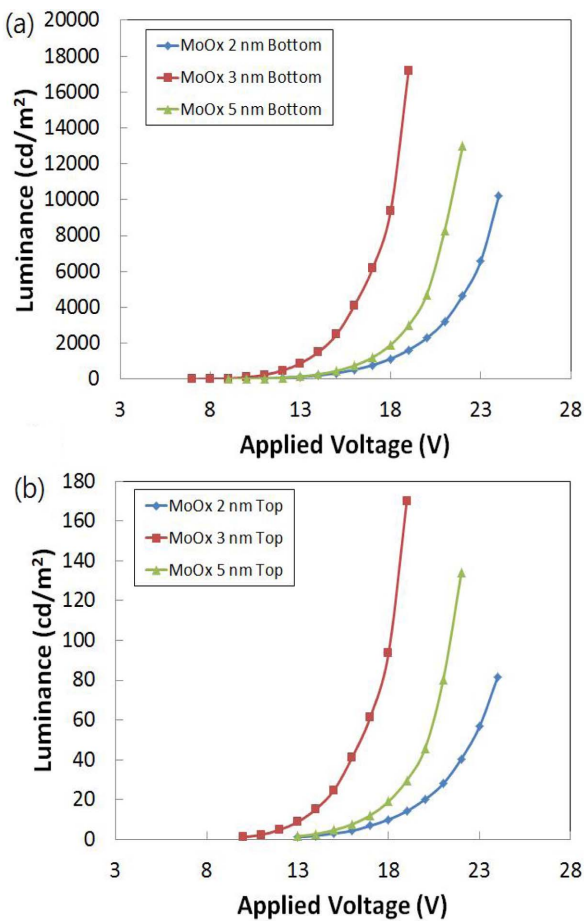


Fig. 3. Luminance vs. applied voltage characteristics for dual emission tandem OLED with MoO_x thickness. (a) bottom emission, (b) top emission.

압에 따른 전류밀도를 나타낸 것이다. OLED 소자에 인가된 전압이 증가함에 따라 전류밀도는 급격하게 증가하는 경향을 나타내었다. MoO_x의 두께가 2 nm에서 3 nm로 증가함에 따라 동일한 인가전압에서 전류밀도가 급격하게 증가하였고, 5 nm로 증가하면 다시 감소하는 경향을 나타내었다. MoO_x 두께 2, 3, 5 nm에서 전류밀도 50 mA/cm²를 나타내는 인가전압은 각각 23.6, 18.2, 20.8 V로 MoO_x 두께가 3 nm일 때 가장 낮은 인가전압에서 높은 전류밀도를 나타내었다.

그림 3(a)는 음극 Al의 두께를 25 nm로 고정하고 전하생성층의 MoO_x 두께를 2, 3, 5 nm로 변화시켜 제작한 청색 형광 양면발광 적층 OLED의 배면발광에 대한 인가전압에 따른 발광휘도를 나타낸 것이다. 전하생성층의 MoO_x 두께 2, 3, 5 nm에서 인가전압에 대한 배면 발광휘도는 그림 2의 인가전압에 대한 전류밀도와 유사한 경향을 나타내었다. MoO_x 두께 2, 3, 5 nm에서 배면 발광의 최대휘도는 각각 10,200, 17,200, 13,000 cd/m²를 나타내었으며, 발광 휘도 1,000 cd/m²를 나타내는 인가전압

은 각각 17.6, 13.2, 16.5 V, 발광 휘도 1 cd/m²를 나타내는 문턱전압은 각각 9, 7, 9 V를 나타내었다. 전하생성층의 MoO_x 두께가 3 nm일 때 가장 높은 최대발광휘도와 가장 낮은 문턱전압 및 가장 낮은 인가전압에서 1,000 cd/m²의 발광휘도를 나타내었다. 그림 2와 그림 3(a)에서 전하생성층의 MoO_x 두께 2, 3, 5 nm에서 배면 발광휘도 1,000 cd/m²를 나타내는 전류밀도는 각각 5.1, 4.5, 7 mA/cm²이다. 이 결과는 양면발광 단일구조 OLED에서 1,000 cd/m²의 배면 발광휘도를 나타내는 전류밀도가 10.1 mA/cm²인 기존의 연구결과와 비교하면 절반 정도의 낮은 전류밀도에서 1,000 cd/m²의 발광휘도를 나타낸 것이다[9]. 적층구조의 OLED에서 단일구조의 OLED보다 적은 전류가 주입되나 발광에는 많이 기여하고 있음을 알 수 있는 결과이다. 이러한 현상은 전하생성층에서 전자와 정공이 생성되어 발광에 기여함으로써 소자에 인가된 전류는 감소하고 발광은 증가한 것이다[13]. 그림 3(b)는 전하생성층의 MoO_x 두께를 2, 3, 5 nm로 변화시켜 제작한 청색 형광 양면발광 적층구조 OLED의 인가전압에 따른 전면발광 휘도를 나타낸 것이다. 인가전압에 대한 전면 발광의 휘도도 인가전압에 대한 배면 발광의 휘도와 유사한 경향을 나타내었다. 전하생성층의 MoO_x 두께 2, 3, 5 nm에서 전면 발광의 최대휘도는 각각 81.8, 170, 134 cd/m²를 나타내었으며, 발광휘도 50 cd/m²를 나타내는 인가전압은 각각 22.6, 16.5, 20.1 V, 문턱전압은 각각 13, 10, 13 V를 나타내었다. 전하생성층의 MoO_x 두께 3 nm에서 가장 높은 발광휘도 및 가장 낮은 인가전압과 문턱전압을 나타내어 배면발광의 특성과 유사한 결과를 나타내었다.

그림 4(a)는 MoO_x 두께를 2, 3, 5 nm로 변화시켜 제작한 청색 형광 양면발광 적층구조 OLED에 대한 배면발광의 인가전압에 따른 전류발광효율을 나타낸 것이다. 전하생성층의 MoO_x 두께 2, 3, 5 nm에서 배면발광의 최대 전류 발광효율은 각각 19.32, 23.18, 15.44 cd/A를 나타내었다. 그림 4(b)는 MoO_x 두께를 2, 3, 5 nm로 변화시켜 제작한 청색 형광 양면발광 적층구조 OLED에 대한 전면발광의 인가전압에 따른 전류발광효율을 나타낸 것이다. 전하생성층의 MoO_x 두께 2, 3, 5 nm에서 전면발광의 최대전류발광효율은 각각 0.17, 0.23, 0.16 cd/A를 나타내었다. 배면발광과 전면발광에서 전하생성층의 MoO_x 두께 3 nm에서 가장 높은 최대 전류 발광효율을 나타내었다. 그림 2~4에서 전하생성층의 MoO_x 두께 3 nm에서 가장 낮은 문턱전압, 가장 높은 전류밀도, 가장 높은 발광휘도 및 가장 높은 전류발광효율을 나타내었다. 이러한 현상은 MoO_x 두

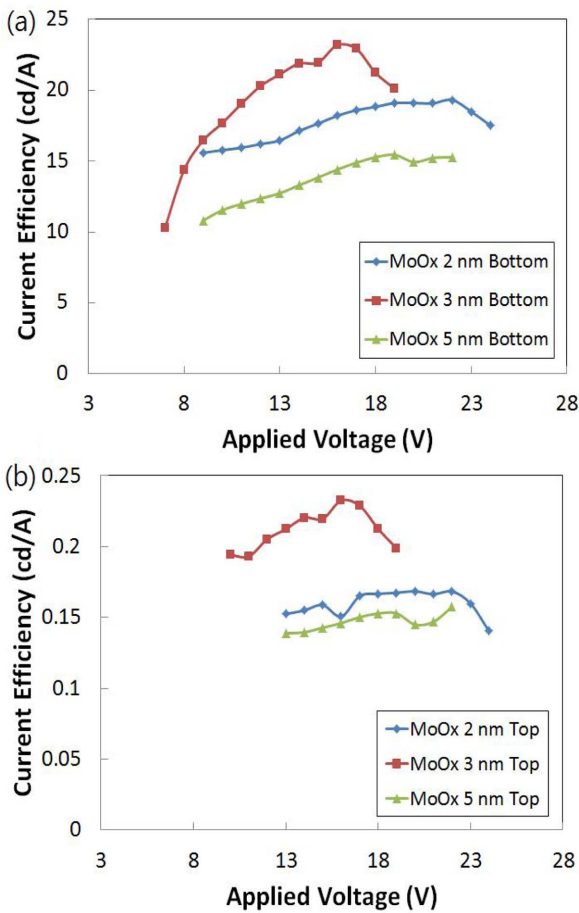


Fig. 4. Current efficiency vs. applied voltage characteristics for dual emission tandem OLEDs with MoO_x thickness. (a) bottom emission, (b) top emission.

께 2 nm인 경우에는 적절한 전하 생성이 이루어지지 않아 낮은 발광특성을 나타내나, MoO_x 두께 3 nm인 경우에는 적절한 전하 생성이 이루어져 하부층에는 전자를 공급하고 상부층에는 정공을 적절하게 공급하여 높은 발광특성을 나타내고, MoO_x 두께 5 nm인 경우에는 두께의 증가에 의하여 전자와 정공의 균형이 맞지 않아 다시 발광특성이 감소하는 것이다[14,15].

그림 5는 음극전극인 Al 두께를 15, 20, 25 nm로 변화시켜 제작한 청색 형광 양면발광 적층구조 OLED의 인가전압에 따른 전류밀도를 나타낸 것이다. 인가전압이 증가함에 따라 전류밀도는 급격하게 증가하는 경향을 나타내었고, 음극 Al의 두께가 15 nm에서 25 nm로 증가함에 따라 인가전압에 대한 전류밀도가 증가하여 낮은 인가전압에서 높은 전류밀도를 나타내었다. 음극 Al의 두께 15, 20, 25 nm에서 전류밀도 50 mA/cm²를 나타내는 인가전압은 각각 21.6, 18.6, 18.1 V이었다. 음극 Al의 두께가 증가할수록 전류밀도가 증가하는 현상은 Al의 두께

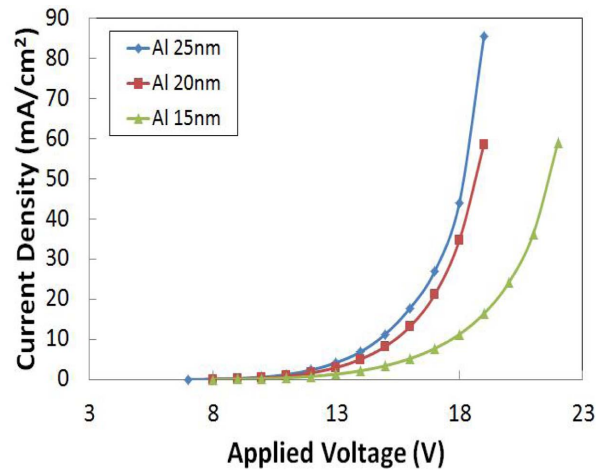


Fig. 5. Current density vs. applied voltage characteristics for dual emission tandem OLEDs with Al thickness.

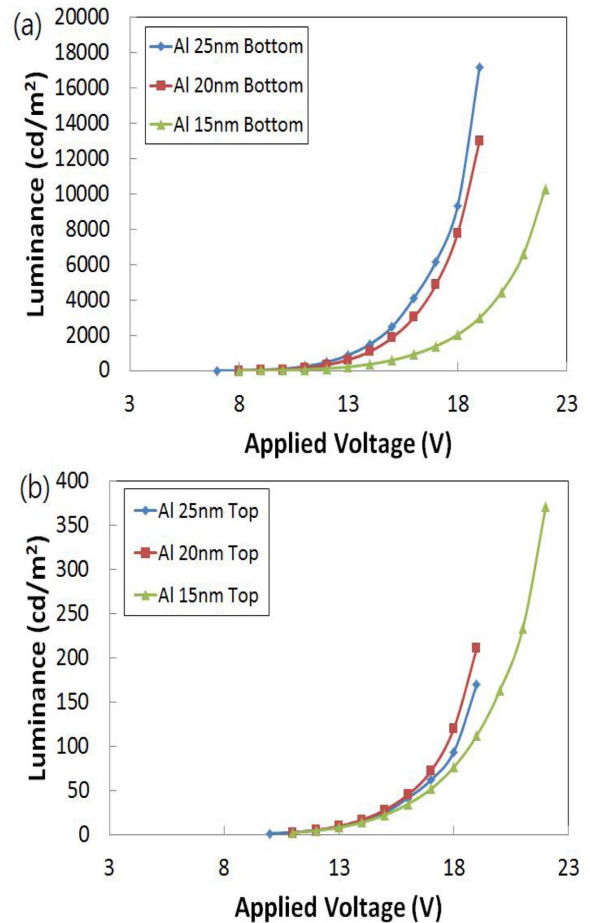


Fig. 6. Luminance vs. applied voltage characteristics for dual emission tandem OLEDs with Al thickness. (a) bottom emission, (b) top emission

가 증가함에 따라 저항이 감소하여 전류 주입이 원활하게 되어 나타난 현상이다.

그림 6(a)는 음극전극인 Al 두께를 15, 20, 25 nm로 변화시켜 제작한 청색 형광 양면발광 적층구조

OLED의 배면발광에 대한 인가전압에 따른 발광휘도를 나타낸 것이다. 음극 Al의 두께 15, 20, 25 nm에서 최대 발광휘도는 각각 10,300, 13,000, 17,200 cd/m^2 로 음극 Al 두께의 증가에 따라 최대 발광휘도가 증가하였다. Al 음극의 두께 15, 20, 25 nm에서 발광휘도 1,000 cd/m^2 를 나타내는 인가전압은 각각 16.2, 13.9, 13.2 V, 문턱전압은 각각 8, 8, 7 V로 음극 Al의 두께가 증가할수록 감소하였다. 이러한 현상은 음극 Al의 두께가 두꺼워지면서 저항이 감소하여 전류의 주입이 원활하게 되어 낮은 인가전압에서 발광이 시작되고 휘도가 증가하는 것이다. 그림 6(b)는 음극전극인 Al 두께를 15, 20, 25 nm로 변화시켜 제작한 청색 형광 양면발광 적층구조 OLED의 전면발광에 대한 인가전압에 따른 발광휘도를 나타낸 것이다. 음극 Al의 두께 15, 20, 25 nm에서 최대 발광휘도는 각각 371, 211, 170 cd/m^2 로 음극 Al의 두께 15 nm에서 가장 높은 최대 발광휘도를 나타내었고, 문턱전압은 각각 7, 7, 8 V로 두께가 두꺼워질수록 문턱전압이 높아지는 경향을 보였다. 음극 Al의 두께가 15 nm에서 가장 높은 최대 발광휘도를 나타내고 20 nm로 증가함에 따라 감소하는 현상은 음극 Al의 두께가 증가함에 따라 광 투과도가 감소하게 되어 전면발광으로 방출되는 휘도의 세가가 감소하여 나타난 현상이다.

그림 7(a)는 음극전극인 Al 두께를 15, 20, 25 nm로 변화시켜 제작한 청색 형광 양면발광 적층구조 OLED의 배면발광에 대한 인가전압에 따른 전류발광효율을 나타낸 것이다. 최대 전류발광효율은 음극 Al의 두께 15, 20, 25 nm에서 각각 18.42, 22.98, 23.18 cd/A 로 음극 Al의 두께가 증가함에 따라 최대 전류발광효율이 증가되었다. 이러한 현상은 Al 음극의 두께가 증가함에 따라 음극의 저항이 감소하게 되어 음극에서의 전류 주입이 원활하게 되고, 주입되는 전류만큼 발광에 기여하여 음극의 두께가 증가할수록 최대 전류발광효율이 증가한 것이다. 그림 7(b)는 음극전극인 Al 두께를 15, 20, 25 nm로 변화시켜 제작한 청색 형광 양면발광 적층구조 OLED의 전면발광에 대한 인가전압에 따른 전류발광효율을 나타낸 것이다. 최대 전류발광효율은 음극 Al의 두께 15, 20, 25 nm에서 각각 0.68, 0.36, 0.23 cd/A 를 나타내었다. 전면발광에서의 발광 특성은 배면발광에서의 발광특성과 서로 다른 결과를 나타내었는데, 전면발광에서는 Al 음극의 두께가 증가함에 따라 광투과도가 감소하여 전류 주입은 배면발광과 동일하지만 발광된 빛이 전면 부분으로의 투과가 감소하여 최대 전류발광효율이 감소하는 결과를 나타낸 것이다. 이상의 결과에서 음

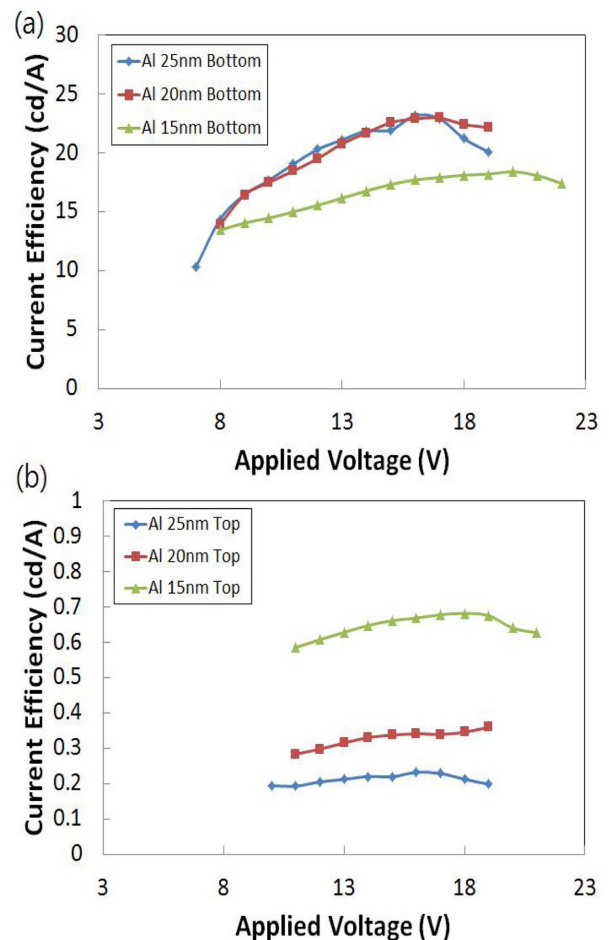


Fig. 7. Current efficiency vs. applied voltage characteristics for dual emission tandem OLEDs with Al thickness. (a) bottom emission, (b) top emission.

극전극인 Al의 두께 변화에서는 15 nm의 두께일 때 가장 우수한 전면발광 특성을 나타내어 양면발광 소자로 적용할 수 있는 최적의 Al 두께는 15 nm임을 알 수 있었다.

4. 결 론

정공주입층으로 MoO_x , 2TNATA, 정공수송층으로 NPB, 발광층으로 BD-2가 첨가된 SH-1, 전자수송층으로 Bphen, 전자주입층으로 Liq, 전하생성층으로 MoO_x 와 Al, 음극전극으로 Al을 사용하여 청색 형광 양면발광 적층구조 OLED를 제작하여 발광특성을 조사하였다. 전하생성층인 MoO_x 두께를 2, 3, 5 nm로 변화시켜 제작한 양면발광 적층구조 OLED에서는 MoO_x 두께 3 nm에서 배면발광의 최대 발광휘도 17,200 cd/m^2 , 최대 전류효율은 23.18 cd/A 의 발광특성을 나타내었으며, 전면발광은 최대 발광휘도 170 cd/m^2 , 최대 전류효율 0.23 cd/A 로 가

장 우수한 발광특성을 나타내었다. 전하생성층의 MoO_x 두께가 얇은 2 nm인 경우 충분한 전하가 생성되지 못하였고, 두께가 두꺼운 5 nm인 경우에는 전자와 정공의 불균형에 의하여 특성이 감소하였다.

음극 Al의 두께를 15, 20, 25 nm로 하여 제작한 양면발광 적층구조 OLED에서 배면발광에 대한 최대 발광휘도는 10,300, 13,000, 17,200 cd/m^2 , 최대 전류발광효율은 18.42, 22.98, 23.18 cd/A 로 음극 Al의 두께가 증가할수록 음극의 저항이 감소하여 주입되는 전류의 증가에 의하여 향상되는 특성을 나타내었다. 그러나 전면발광에 대하여는 음극 Al의 두께가 15, 20, 25 nm로 증가함에 따라 최대 발광 휘도는 371, 211, 170 cd/m^2 , 최대 전류발광효율은 0.68, 0.36, 0.23 cd/A 로 감소하였다. 이러한 현상은 Al 음극의 두께가 증가할수록 투과도가 감소하게 되어 발광층에서 생성된 빛이 음극을 통과하여 전면부분으로 방출되는 것을 차단하게 되어 나타난 현상이다.

References

- [1] C. W. Tang, S. A. Vanslyke, Organic electroluminescent diodes, *Appl. Phys. Lett.*, 51 (1987) 913-915.
- [2] J. Clark, G. Lanzani, Organic photonics for communications, *Nature photonics*, 4 (2010) 438-446.
- [3] Qi Wang, Junqiao Ding, Zhiqiang Zhang, Dongge Ma, Yanxiang Cheng, Lixiang Wang, and Fosong Wang, A high performance tandem white organic light emitting diode combining highly effective white-units and their interconnection layer, *J. Appl. Phys.*, 105 (2009) 076101.
- [4] L. S. Liao, K. P. Klubek, and C. W. Tang, High efficiency tandem organic light emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.*, 84 (2004) 167-169.
- [5] Liang-Sheng Liao, Wojciech. K. Slusarek, Tukaram K. Hatwar, Michele L. Ricks, and Dustin L. Comfort, Tandem organic light emitting diode using hexaazatriphenylene hexacarbonitrile in the intermediate connector, *Adv. Mater.*, 20 (2008) 324-329.
- [6] Hiroshi Kanno, Noel C. Giebink, Yiru Sun, and Stephen R. Forrest, Stacked white organic light emitting devices based on a combination of fluorescent and phosphorescent emitters, *Appl. Phys. Lett.*, 89 (2006) 023503.
- [7] Takayuki Chiba, Yong-Jin Pu, Ryoichi Miyazaki, Ken-ichi Nakayama, Hisahiro Sasabe, and Junji Kido, Ultra-high efficiency by multiple emission from stacked organic light emitting devices, *Org. Electronics*, 12 (2011) 710-715.
- [8] Xiangfei Qi, Ning Li, and Stephen R. Forrest, Analysis of metal oxide based charge generation layers used in stacked organic light emitting diodes, *J. Appl. Phys.*, 107 (2010) 014514.
- [9] Ji-Hyun Kim, Sung-Hoo Ju, Emission characteristics of dual-side emission OLED with Al cathode thickness variation, *J. Kor. Inst. Surf. Eng.*, 48 (2015) 174-178.
- [10] B. W. D'Andrade, S. R. Forrest, White organic light emitting devices for solid state lighting, *Adv. Mater.*, 16 (2004) 1585-1595.
- [11] Sung-Nam Lee, Dong-Myung Shin, Dual emission from organic light emitting diodes using deep red novel phosphorescent iridium(III) complex, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 599 (2014) 112-117.
- [12] Jung Hyuk Im, Kyung-Tae Kang, Sang Ho Lee, Jun Young Hwang, Heuseok Kang, Kwan Hyun Cho, Bulk-like Al/Ag bilayer film due to suppression of surface plasmon resonance for high transparent organic light emitting diodes, *Organic Electronics*, 33 (2016) 116-120.
- [13] Chan-Suk Park, Sung-Hoo Ju, Optical and electrical properties of two-wavelength white tandem organic light-emitting diodes using red and blue materials, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, 28 (2015) 581-586.
- [14] Tae-Ho Kwak, Sung-Hoo Ju, Emission characteristics of blue fluorescence tandem OLED using MoO_x , *J. Kir. Inst. Surf. Eng.*, 47 (2014) 104-108.
- [15] Chih-Hao Chang, Zih-Jyun Wu, Yi-Hu Liang, Yu-Shuo Chang, Chuan-Hao Chiu, Cheng-Wei Tai, Hsin-Hua Chang, Aligned energy-level design for decreasing operation voltage of tandem white organic light-emitting diodes, *Thin Solid Films*, 548 (2013) 389-397.