

청색 발광층에 의한 백색 OLED의 발광 특성

천현동¹, 나현석¹, 주성후^{1,a}

¹ 대전대학교 신소재공학과

Emission Properties of White Organic Light-Emitting Diodes with Blue Emitting Layer

Hyun-Dong Chun¹, Hyunseok Na¹, and Sung-Hoo Ju^{1,a}

¹ Department of Advanced Materials Science & Engineering, Daejin University, Pocheon 487-711, Korea

(Received April 22, 2013; Revised May 14, 2013; Accepted May 20, 2013)

Abstract: To study emission properties of white phosphorescent organic light emitting devices (PHOLEDs), we fabricated white PHOLEDs of ITO(150 nm) / NPB(30 nm) / TcTa(10 nm) / mCP(7.5 nm) / light-emitting layer(25 nm) / UGH3(5 nm) / Bphen(50 nm) / LiF(0.5 nm) / Al(200 nm) structure. The total thickness of light-emitting layer with co-doping and blue-doping/co-doping using a host-dopant system was 25 nm and the dopant of blue and red was FIrpic and Bt₂Ir(acac) in UGH3 as host, respectively. The OLED characteristics were changed with position and thickness of blue doping layer and co-doping layer as light-emitting layer and the best performance seemed in structure of blue-doping(5 nm)/co-doping(20 nm) layer. The white PHOLEDs showed the maximum current density of 34.5 mA/cm², maximum brightness of 5,731 cd/m², maximum current efficiency of 34.8 cd/A, maximum power efficiency of 21.6 lm/W, maximum quantum efficiency of 15.6%, and a Commission International de L'Eclairage (CIE) coordinate of (0.367, 0.436) at 1,000 cd/m².

Keywords: OLED, CIE, White, Phosphorescent, Structure

1. 서론

OLED (organic light emitting diode)는 1987년 다층 막 구조를 이용하여 고효율 특성을 보고한 이후, 발광 소자로서 본격적인 검토가 시작되었다 [1]. OLED는 유기 재료에 전계를 가하여 전기 에너지를 빛 에너지로 바꾸어 주는 전자 소자로서 자체 발광형으로 대조비가 높고, 시야각이 넓으며, 시인성이 우수

하고, 완전 고체 구조로 견고하고, 응답 속도가 빨라 동영상 표시에 적합하고, 패널 구조가 간단하여 가볍고 얇게 만들 수 있으며 제조 공정을 단순화시킬 수 있어 저가격화가 가능하고, 플라스틱 필름 등을 사용한 경우 플렉시블 디스플레이가 가능하다는 다양한 특징을 가지고 있다 [2-4].

백색 발광 OLED는 디스플레이 및 조명으로서 사용이 가능하며, 디스플레이에 사용되는 백색 OLED는 높은 효율 및 낮은 구동전압 등의 기본적인 요구 조건 외에 적색, 녹색, 청색에서 최대 파장을 가지는 발광스펙트럼을 나타내어야 한다. 반면 조명용으로 사용되는 백색 OLED는 태양광과 유사한 스펙트럼을 나타내야 하므로 넓은 영역의 파장을 가지는 발광스

a. Corresponding author: sunghooju@daejin.ac.kr

Copyright ©2013 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.

펙트럼이 요구된다.

백색광을 구현하기 위해서는 3과장 방식이 가장 이상적인 것으로 인식되어 왔으나, 형광 물질의 경우 적색물질, 인광 물질에서는 청색 물질의 효율 및 안정성에 문제점이 있어 이를 해결하기 위해 높은 안정성 및 효율을 보이는 2과장 방식이 연구되었다 [5]. 특히, 인광 백색 OLED는 일중항과 삼중항을 모두 사용하여 높은 효율을 나타내었다 [6-8]. 백색 인광 OLED의 효율 향상을 위한 최적의 활성제 첨가량과 소자 구조에 대하여 사전 연구를 진행하였다 [9].

본 논문에서는 높은 효율을 나타내는 인광 물질을 사용하여 청색과 적색계열의 백색을 적용한 co-doping 백색, co-doping 백색 / 청색, co-doping 백색 / 청색 / co-doping 백색, 청색 / co-doping 백색 및 두께 증가 청색 / co-doping 백색의 구조로 OLED를 제작하여 청색 발광층의 위치와 두께 변화에 의한 백색 인광 OLED의 특성을 연구하였다. 제작된 OLED의 특성은 전류-전압-휘도와 발광스펙트럼 및 색좌표를 측정하였고, 전류-전압-휘도 측정으로부터 발광효율을 계산하였다.

2. 실험 방법

OLED 제작을 위하여 두께 140 nm, 면 저항 12.5 Ω/\square , 광 투과율 85% 이상, 표면 평탄도 (Ra) 10 Å 이하의 특성을 갖는 ITO가 증착된 유리 기판을 사용하였다. 기판의 표면 세정을 위하여 아세톤 (acetone), 이소프로필알콜 (isopropyl alcohol), 중성세제, 초순수물 (deionized water)을 사용하여 세척하였다. 세정이 완료된 ITO 기판은 감광액 (photo resist)을 균일하게 도포하고, 약경화, 노광, 현상, 강경화 과정을 진행하였고, 이후 습식식각에 의하여 ITO의 pattern을 형성하였다. 또한 ITO의 표면 특성을 개선하기 위하여 자외선과 산소 플라즈마를 이용한 표면처리를 진행하였다.

ITO 위에 유기물을 증착하기 위하여 저항가열 증착기를 사용하였고, 증착기 내부의 진공을 1.0×10^{-6} torr 이하로 유지하였다. 정공 재료로는 NPB (4,4-bis[N-(1-naphyl)-N-phenyl-amino] biphenyl), TcTa (4,4,4-Tris (carbazole-9-yl) triphenylamine)를 사용하였고, 차단층으로 높은 삼중항 에너지 준위를 가지는 mCP (N,N-dicarbazolyl-3,3-benzen)가 사용되었고, 발광층의 모체로는 UGH3 (m-bis-(triphenylsilyl)benzene)를 청색 인광물질로 FIrpic

(iridium(III) bis (4,6-difluorophenyl)-pyridinato-N, C2) picolinate)을, 적색 인광 물질로 Bt₂Ir(acac) (bis(2-phenylbenzothiazolato-N,C2) iridium (III) (acetylacetonate))을 사용하였다. 이후 버퍼층으로 LiF, 음극층으로 Al을 사용하였다. 박막의 증착 속도는 유기물은 1 Å/s를 유지하였고, LiF는 0.5 Å/s, Al은 2 Å/s의 속도를 유지하였다.

제작된 OLED 소자를 발광시키기 위하여 양극인 ITO에 (+) 전압을 인가하고, 음극인 Al에 (-) 전압을 인가하는 전원 인가 장치로 Keithley 2400 SourceMeter를 사용하여 전압과 전류를 인가하였고, 제작된 소자의 전류효율, 전력효율, 양자효율, 발광 휘도 및 스펙트럼을 측정하기 위해 photo research사의 PR-650 SpectraScan을 사용하여 전기적 및 광학적 특성을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

ITO(150 nm) / NPB(30 nm) / TcTa(10 nm) / mCP(7.5 nm) / emitting layer(25 nm) / UGH3(5 nm) / Bphen(50 nm) / LiF(0.5 nm) / Al(200 nm) 구조로 백색 OLED를 제작하였다. 발광층의 두께를 25 nm로 하고 UGH3를 발광 모체로 사용하여 청색 인광 활성제로 FIrpic을 12 vol.%, 적색 인광 활성제로 Bt₂Ir(acac)를 1 vol.% 첨가하여 청색과 적색 인광 활

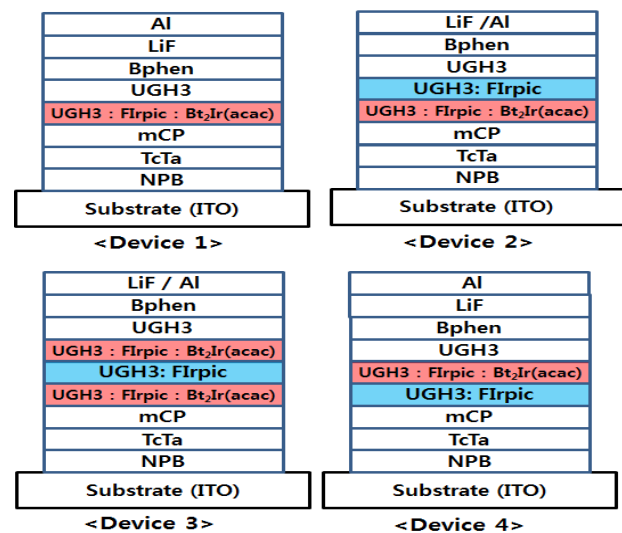


Fig. 1. Device structure of OLED with position change of co-doping white emitting layer and blue emitting layer.

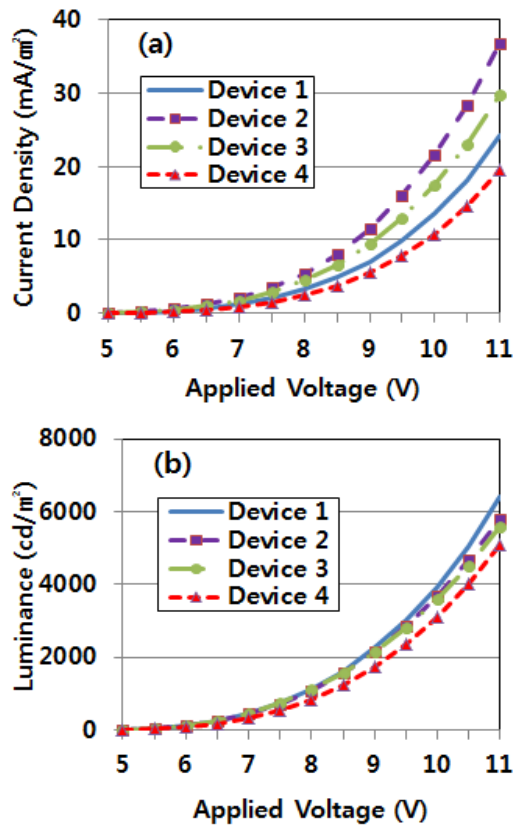


Fig. 2. Current and luminance characteristics of OLED with position change of co-doping white emitting layer and blue emitting layer. (a) current density vs applied voltage, (b) luminance vs applied voltage.

성제를 co-doping하여 제작한 OLED (Device 1), 발광층의 두께를 25 nm로 하고, 24 nm의 UGH3 : 12 vol.% FIrpc : 1 vol.% Bt₂Ir(acac) co-doping 층과 1 nm의 UGH3 : 12 vol.% FIrpc를 적층하여 제작한 OLED (Device 2), 발광층의 두께를 25 nm로 하고, 12 nm의 UGH3 : 12 vol.% FIrpc : 1 vol.% Bt₂Ir(acac) co-doping 층과 1 nm의 UGH3 : 12 vol.% FIrpc층 그리고 다시 12 nm의 UGH3 : 12 vol.% FIrpc : 1 vol.% Bt₂Ir(acac) co-doping 층을 적층하여 제작한 OLED (Device 3), 발광층의 두께를 25 nm로 하고, 1 nm의 UGH3 : 12 vol.% FIrpc과 24 nm의 UGH3 : 12 vol.% FIrpc : 1 vol.% Bt₂Ir(acac) co-doping 층을 적층하여 제작한 OLED (Device 4) 구조의 백색 OLED를 제작하였다. 제작한 4가지 구조의 백색 OLED 구조를 그림 1에 나타내었다.

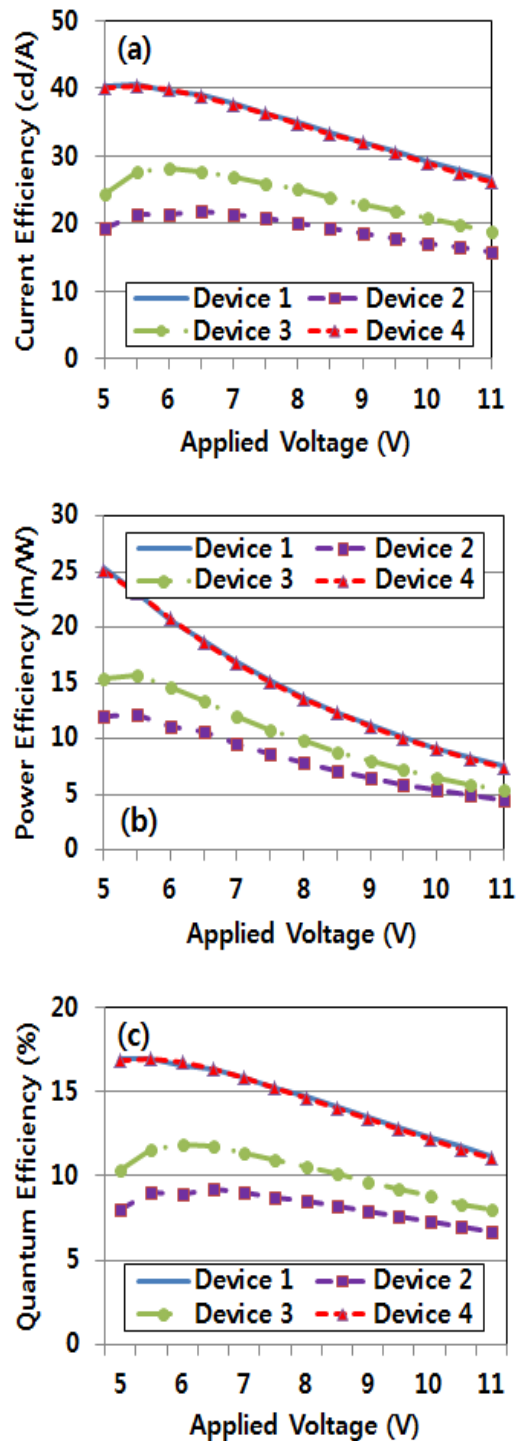


Fig. 3. Efficiency characteristics of OLED with position change of co-doping white emitting layer and blue emitting layer (a) current efficiency vs applied voltage, (b) power efficiency vs applied voltage, (c) quantum efficiency vs applied voltage.

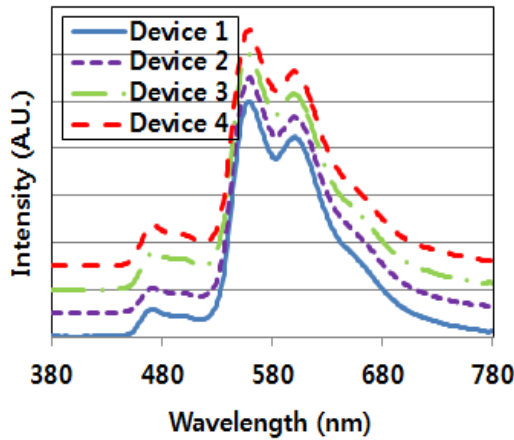


Fig. 4. Electroluminescence spectra of OLED with position change of co-doping white emitting layer and blue emitting layer.

그림 2는 전압-전류-발광휘도를 측정한 결과로 그림 2(a)는 인가전압에 대한 전류밀도를 나타낸 것이고, 그림 2(b)는 인가전압에 대한 발광휘도를 나타낸 것이다. 그림 2(a)에서 인가전압에 대한 전류밀도는 인가전압에 의존하여 증가함을 보이고 있다. 청색과 적색 인광 활성제를 co-doping한 UGH3 : 12 vol.% FIrpic : 1 vol.% Bt₂Ir(acac) 발광층 24 nm와 청색 인광 활성제를 첨가한 UGH3 : 12 vol.% FIrpic 발광층 1 nm로 구성된 Device 2, 3, 4의 인가전압에 대한 전류밀도를 비교하면 Device 2 > Device 3 > Device 4 순으로 전류밀도가 높게 나타나고 있어, 청색 발광층이 음극에 가까운 Device 2에서 전류가 가장 많이 흐르고 양극에 가까운 Device 4에서 전류가 가장 적게 흐르는 현상을 나타내었다. 그림 2(b)에서 인가전압에 대한 발광휘도도 그림 2(a)의 인가전압에 대한 전류밀도와 유사하게 인가전압에 의존하여 증가함을 보이고 있다. Device 1~4의 발광휘도를 비교하면 청색 발광층으로 UGH3 : 12 vol.% FIrpic 1 nm를 삽입한 경우 위치에 따라 감소하는 경향을 나타내나 적은 크기의 발광휘도 변화를 나타내었다.

그림 3은 인가전압에 대한 발광 효율을 나타낸 것으로 그림 3(a)는 인가전압에 대한 전류 발광 효율을 나타낸 것이고, 그림 3(b)는 인가전압에 대한 전력 발광 효율을 나타낸 것이며, 그림 3(c)는 인가전압에 대한 양자효율을 나타낸 것이다. 그림 3(a)의 인가전압에 대한 전류 발광 효율에서 최대 전류 발광 효율은

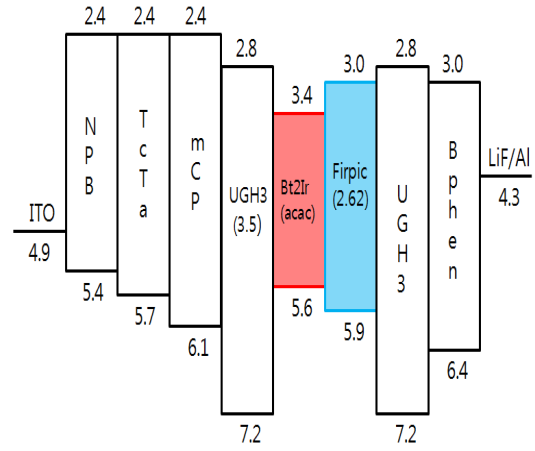


Fig. 5. Energy level diagram of fabricated phosphorescent OLED.

Device 1에서 40.5 cd/A, Device 2에서 21.9 cd/A, Device 3에서 28.1 cd/A, Device 4에서 40.3 cd/A의 값을 나타내었다. 그림 3(b)의 인가전압에 대한 전력발광 효율에서 최대 전력 발광 효율은 Device 1에서 25.3 lm/W, Device 2에서 12.2 lm/W, Device 3에서 15.7 lm/W, Device 4에서 25.1 lm/W의 값을 나타내었다. 그림 3(c)의 인가전압에 대한 양자효율에서 최대 양자 효율은 Device 1에서 17%, Device 2에서 9.6%, Device 3에서 14.4 %, Device 4에서 17%의 값을 나타내었다. 청색 발광층과 co-doping 발광층의 위치 변화에서 청색 발광층 위치에 따라 발광 효율이 많은 변화를 보이고 있다. 청색 발광층이 음극 쪽에 위치한 Device 2의 경우 가장 낮은 발광 효율을 나타내었고, 청색 발광층이 중간에 있는 Device 3, 청색 발광층이 양극 쪽에 위치한 Device 4로 청색 발광층이 양극 쪽으로 이동할수록 발광 효율은 점차적으로 향상되었다. Device 4의 경우에는 청색 발광층으로 삽입한 1 nm의 UGH3 : 12 vol.% FIrpic이 전류의 흐름에 거의 영향을 주지 않아 발광효율이 청색 발광층을 삽입하지 않은 Device 1과 거의 유사하게 나타나 그래프가 겹쳐지고 있음을 알 수 있다.

그림 4는 Device 1~4의 전계 발광 스펙트럼을 나타낸 것으로 청색과 적색 인광 활성제를 co-doping한 발광층만으로 구성된 Device 1과 비교하여 청색 발광층을 1 nm 삽입한 Device 2~4의 경우에 청색 영역의 발광이 조금 향상되었으나 co-doping 발광층의 발광이 상대적으로 강하여 청색 발광의 증가에도 전체적인 발광에는 크기 기여하지 못하고 있는 것으로 판단된다.

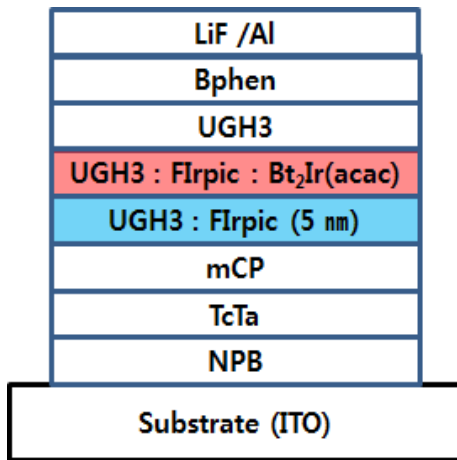


Fig. 6. Device structure of OLED with UGH3 : FIrpc of 5 nm thickness.

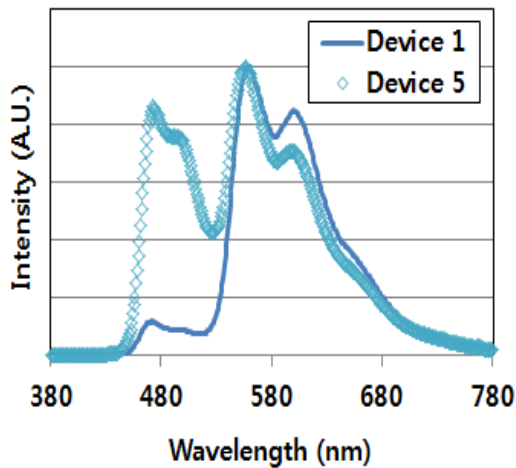


Fig. 7. The electroluminescence spectra of OLED with co-doping and OLED inserted with UGH3 : FIrpc of 5 nm thickness.

그림 5는 제작한 백색 인광 OLED의 에너지 준위를 나타낸 것이다. 전자의 이동은 UGH3에서 FIrpc이나 Bt₂Ir(acac)로 전이되고, UGH3에서 FIrpc로 전이된 전자가 다시 Bt₂Ir(acac)로 전이될 수 있다. UGH3에 FIrpc만을 첨가한 청색 발광층을 음극 쪽인 UGH3와 인접한 곳에 삽입한 경우 전자의 이동은 UGH3에서 Bt₂Ir(acac)로의 이동은 제한되고 FIrpc를 경유하여 Bt₂Ir(acac)로 이동하게 될 것이다. 이 경우 전

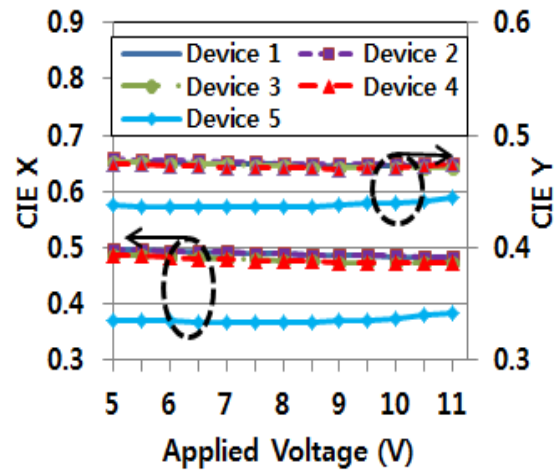


Fig. 8. Commission internationale de l'Eclairage (CIE) coordinates of OLED with position change of co-doping white emitting layer and blue emitting layer.

류밀도는 증가하나 발광 효율은 감소된 결과를 나타내었다. 정공의 이동은 mCP에서 FIrpc이나 Bt₂Ir(acac)로 전이되고, mCP에서 FIrpc으로 전이된 정공이 다시 Bt₂Ir(acac)로 전이될 수 있다. UGH3에 FIrpc만을 첨가한 청색 발광층을 양극 쪽인 mCP와 인접한 곳에 삽입한 경우 양극에서 주입된 정공은 mCP에서 Bt₂Ir(acac)로의 이동은 제한되고 FIrpc를 경유하여 Bt₂Ir(acac)로 이동하게 될 것이다. 이 경우 전류밀도는 감소하나 발광 효율은 영향이 없는 결과를 나타내었다.

청색 발광층의 위치에 따른 실험에서 발광 효율의 감소 현상이 가장 적게 나타나고 발광 스펙트럼에서 청색 영역의 발광이 향상된 Device 4의 구조에서 발광층의 두께는 25 nm로 동일하게 유지하고 UGH3 : 12 vol.% FIrpc 청색 발광층을 5 nm로 증가시키고 UGH3 : 12 vol.% FIrpc : 1 vol.% Bt₂Ir(acac) co-doping 층을 20 nm 적층하여 제작한 OLED (Device 5)의 구조를 그림 6에 나타내었다.

그림 7은 Device 5의 구조로 제작한 OLED의 전계 발광 스펙트럼을 나타낸 것이다. 그림 4에서 나타낸 Device 1~4의 전계 발광 스펙트럼과 비교할 때 적색 영역의 발광 세기는 약간 감소하고 청색 영역의 발광 세기가 크게 증가한 결과를 얻을 수 있었다.

그림 8은 인가전압에 따른 Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) 색좌표를 나타낸 것이다.

Table 1. Properties by varying the blue and the co-doping light-emitting layer position change of White OLEDs.

Device	J(mA/cm ²) @ 1,000 cd/m ²	Max. current efficiency (cd/A)	Max. power efficiency (lm/W)	Max. quantum efficiency (%)	CIE @ 1,000 cd/m ²
1	24.2	40.5	25.3	17	(0.49, 0.47)
2	36.7	21.9	12.2	9.6	(0.49, 0.47)
3	29.8	28.1	15.7	14.4	(0.48, 0.47)
4	19.5	40.3	25.1	17	(0.48, 0.47)
5	34.5	34.8	21.6	15.6	(0.37, 0.44)

Device 1과 비교하여 Device 2~4의 경우 CIE x 값과 CIE y 값이 미세하게 감소하였으나 큰 변화를 나타내지는 않았다. 그러나 Device 5의 경우에는 CIE x 값과 CIE y 값이 크게 감소하여 (0.37, 0.44)의 백색 발광을 얻을 수 있었다. 또한 Device 1~5의 모든 소자는 거의 비슷한 정도로 인가전압이 증가하여도 색의 이동은 적어 안정된 색을 구현할 수 있음을 알 수 있다.

표 1은 각 소자들의 최대 발광 효율 및 1,000 cd/m²의 휘도에서 전류밀도 및 CIE 좌표를 나타낸 것이다. 청색 발광층을 삽입한 소자 구조에서 Device 4에서 가장 좋은 효율을 나타내고 있으며, 이 소자의 최대 발광휘도는 57.95 mA/cm²에서 11,340 cd/m², 최대 전류효율은 40.3 cd/A, 최대 전력효율은 25.1 lm/W, 최대 양자효율은 16.98%이고, 휘도 1,000 cd/m² 기준에서 색좌표는 (0.48, 0.47)이다. 효율이 잘 나오는 청색/co-doping 구조에서 백색에 가깝게 하기 위해 청색층 두께를 5 nm로 증가시켜 제작한 Device 5의 특성은 인가전압 11 V에서 전류밀도는 34.5 mA/cm², 휘도는 5,731 cd/m², 최대 전류효율은 34.8 cd/A, 최대 전력효율은 21.6 lm/W, 양자효율은 15.6%이고, 휘도 1,000 cd/m² 기준에서 색좌표는 (0.367, 0.436)을 나타내었다.

4. 결론

백색 발광 OLED 소자의 구조에 따른 발광 특성을 연구하기 위하여 co-doping 구조, co-doping / 청색 구조, co-doping / 청색 / co-doping 구조, 청색/co-doping 구조의 OLED를 제작하였다. 백색 발광 OLED 구조에서 청색 발광층의 위치에 따라 효율과 색좌표의 특성이 많은 변화를 나타내었다. 청색 발광

층이 음극 쪽에 위치하는 경우보다 양극 쪽에 위치하는 경우에 높은 발광효율을 나타내었다. 또한 1 nm 두께의 청색 발광층을 삽입하여 청색의 발광 스펙트럼이 다소 향상되었으나 co-doping 발광층에서의 적색 발광이 상대적으로 강해 CIE 색좌표에서의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 효율이 잘 나오는 청색/co-doping 구조에서 청색 발광층의 두께를 5 nm로 증가시켜 청색 발광이 증가된 백색 특성을 얻을 수 있었다. 이 소자의 특성은 인가전압 11 V에서 전류밀도는 34.5 mA/cm², 휘도는 5,731 cd/m², 최대 전류효율은 34.8 cd/A, 최대 전력효율은 21.6 lm/W, 최대 양자효율은 15.6%이고, 휘도 1,000 cd/m² 기준에서 색좌표는 (0.367, 0.436)이었다.

REFERENCES

- [1] C. W. Tang and S. V. Vanslyke, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 913 (1987).
- [2] Y. Zou, Z. Deng, D. Xu, Z. Lu, Y. Yin, H. Du, Z. Chen, and Y. Wang, *J. of Luminescence*, **132**, 414 (2012).
- [3] D. Y. Yoon and D. G. Moon, *Curr. Appl. Phys.*, **12**, e29 (2012).
- [4] M. K. Park and S. H. Ju, *J. KIEEME*, **25**, 381 (2012).
- [5] K. S. Yook et al., *Organic Electronics*, **10**, 170 (2009).
- [6] T. Tsuboi, H. Murayama, S. J. Yeh, and C. T. Chen, *Opt. Mater.*, **29**, 1299 (2007).
- [7] V. Sivasubramaniam, F. Brodkorb, S. Hanning, H. P. Loeb, V. V. Elsbergen, H. Boerner, U. Scherf, and M. Kreyenschmidt, *J. Fluor. Chem.*, **130**, 640 (2009).
- [8] J. H. Seo, Y. K. Kim, and Y. Ha, *Thin Solid Films*, **517**, 1807 (2009).
- [9] H. D. Chun, H. S. Na, D. C. Choo, E. S. Kang, J. W. Yang, and S. H. Ju, *J. KIEEME*, **25**, 910 (2012).