

## 도판트 농도가 단일 발광층 인광 백색 OLED의 전기 및 광학적 특성에 미치는 영향

도재면<sup>1</sup>, 문대규<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 순천향대학교 신소재공학과

### Effects of Dopant Concentration on the Electrical and Optical Properties of Phosphorescent White Organic Light-emitting Diodes with Single Emission Layer

Jae-Myoun Do<sup>1</sup> and Dae-Gyu Moon<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Materials Engineering, Soonchunhyang University, Asan 336-745, Korea

(Received February 4, 2014; Accepted March 19, 2014)

**Abstract:** We have fabricated white organic light-emitting diodes (OLEDs) by co-doping of red and blue phosphorescent guest emitters into the single host layer. Tris(2-phenyl-1-quinoline) iridium(III) [Ir(phq)<sub>3</sub>] and iridium(III)bis[(4,6-di-fluorophenyl)-pyridinato-N,C<sup>2'</sup>]picolate (FIrpic) were used as red and blue dopants, respectively. The effects of dopant concentration on the emission, carrier conduction and external quantum efficiency characteristics of the devices were investigated. The emissions on the guest emitters were attributed to the energy transfer to the guest emitters and direct excitation by trapping of the carriers on the guest molecules. The white OLED with 5% FIrpic and 2% Ir(phq)<sub>3</sub> exhibited a maximum external quantum efficiency of 19.9% and a maximum current efficiency of 45.2 cd/A.

**Keywords:** OLED, White light emission, Single emission layer, Dopant concentration

#### 1. 서론

백색 OLED (organic light-emitting diode)는 화소 패턴 형성을 위한 섀도우 마스크 (shadow mask)가 필요 없어 대면적 고해상도 디스플레이 제작이 용이하고, 휘도와 효율이 높고 연색지수 (color rendering index)가 우수한 면광원의 제작이 가능한 장점이 있어 많은 연구가 진행되고 있다 [1,2]. 백색 OLED는

1994년 야마가타 (Yamagata) 대학의 Kido 교수팀이 poly (N-vinylcarbazole)에 적색, 녹색, 청색의 형광 발광 재료를 도핑하여 백색 발광 특성을 보고한 이래로 고효율, 장수명 및 우수한 색특성을 구현하기 위한 재료 및 소자구조 개발이 진행되어 오고 있다 [3]. D'Andrade 등은 단일항 (singlet)과 삼중항 (triplet) 여기자 (exciton)를 모두 발광에 이용할 수 있는 인광 발광 재료를 이용하여 5.2%의 외부양자효율을 나타내는 백색 OLED를 보고하였다 [4].

백색 OLED를 구현하는 방법으로 단일 발광층을 이용하는 방법, 다층 발광층을 이용하는 방법, OLED를 수직으로 적층하는 방법, 청색 OLED와 색변환 재료를 이용하는 down conversion 방법 등이 보고되고

a. Corresponding author; dgmoon@sch.ac.kr

있다 [5-14]. 단일 발광층을 이용하는 방법은 적색, 녹색, 청색 등의 발광 재료를 고분자 또는 저분자 (small molecule) 호스트에 도핑하는 방법, 호스트와 도판트를 모두 발광에 이용하는 방법, 단일 백색 발광 재료를 이용하는 방법 등이 주로 연구되고 있으며 [5-9], 이들 방식은 소자 구조와 공정이 간단한 장점이 있으나 백색 발광 스펙트럼 조절이 쉽지 않고, 고효율의 백색 OLED를 구현하기 어려운 단점이 있다. 단일 호스트 또는 여러 종류의 호스트를 이용하여 다른 층에서 다른 색이 형성되도록 하는 다층 발광층 구조를 형성하는 방법은 백색 발광 스펙트럼 조절이 쉽고 높은 효율이 가능하나, 발광 영역의 정교한 조절이 필요하며 소자 구조가 복잡한 단점이 있다 [8-12]. 적색, 녹색, 청색 발광 OLED를 수직으로 적층하는 방법은 백색 스펙트럼 조절이 용이하고 고효율의 백색 소자 구현이 가능하나 구조가 매우 복잡한 단점이 있다 [13,14]. Down conversion 방법은 소자 구조와 공정이 비교적 간단하지만 적절한 백색 발광 스펙트럼으로 얻기가 어렵고 색변환 효율이 낮아 고효율의 백색 OLED를 얻기 어려운 단점이 있다 [15].

본 논문에서는 저분자 호스트에 청색과 적색 인광 도판트를 동시에 도핑함에 의해 단일 발광층 백색 OLED를 제작하였다. 호스트 재료로 N,N'-di-carbazolyl-3,5- benzene (mCP)를 사용하고, 청색 인광 발광 재료로 iridium(III) bis[4,6-di-fluorophenyl]-pyridinato-N,C<sup>2'</sup>]picolinate (FIrpic), 적색 인광 재료로 tris(2-phenyl-1-quinoline)iridium(III) [Ir(phq)<sub>3</sub>]를 사용하였다. 청색 및 적색 발광 재료의 농도를 변화시키기에 의해, 도판트 농도가 발광 스펙트럼, 효율 및 구동 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 실험 방법

150 nm 두께의 ITO (indium-tin-oxide)가 코팅된 유리 기판을 이용하여 단일 발광층 백색 인광 OLED를 제작하였다. ITO의 면저항 (sheet resistance)은 약 10 ohm/sq.이었다. 사진 식각 (photo-lithography) 공정을 이용하여 OLED의 양극 ITO 패턴을 형성하였다. ITO 패턴을 acetone, methanol, deionized water를 이용하여 세정한 후 10 W에서 3분 동안 산소 플라즈마 처리를 하여 ITO 표면을 세정하였다. ITO 패턴을 세정한 후 진공 증착을 이용하여 유기 박막 및 음극을 증착하였다. 정공수송층으로 30 nm 두께의

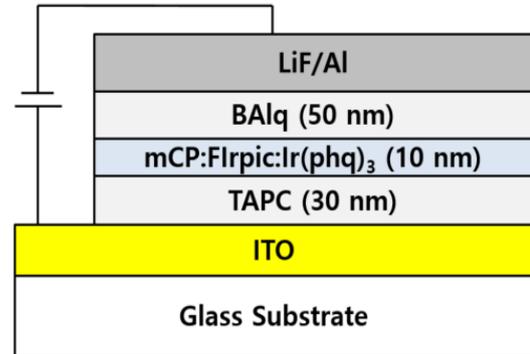
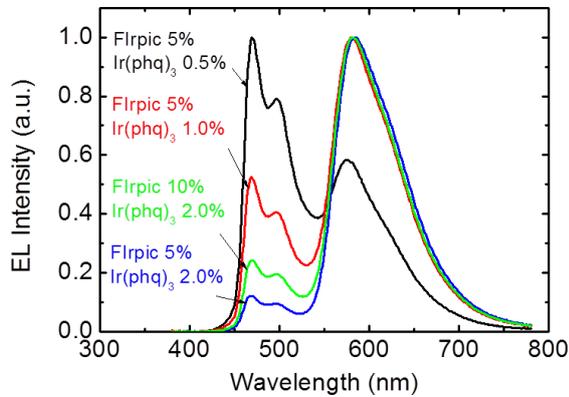


Fig. 1. Device structure of fabricated single emission layer white OLED.

1,1-bis[4-bis(4-methylphenyl)-aminophenyl]cyclohexane (TAPC)을 증착한 후, 호스트 재료인 mCP에 청색 인광 발광 재료인 FIrpic과 적색 인광 발광 재료인 Ir(phq)<sub>3</sub>를 동시에 도핑하여 단일 발광층을 형성하였다. FIrpic의 농도를 5 wt.%와 10 wt.%로 변화시켰으며 Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 0.5, 1, 2 wt.%로 변화시켰다. 발광층의 두께는 10 nm였다. 전자수송층 재료로 두께 50 nm의 aluminum(III) bis(2-methyl-8-quinolinato)-4-phenylphenolate (BALq)를 증착하였다. 유기 박막을 증착한 후 0.5 nm의 LiF 및 100 nm의 Al을 순차적으로 진공 증착하여 백색 인광 OLED를 완성하였다. 완성된 백색 OLED의 구조를 그림 1에 나타내었다. 유기물과 금속 음극을 증착하기 위한 진공도는 약 10<sup>-6</sup> Torr이었으며, 유기물 층과 금속 음극의 증착 속도는 각각 0.1 및 1 nm/s로 유지시켰다. 제작된 OLED는 전류밀도-전압-휘도, 효율 특성 측정을 위해 Keithley 2400 소스/미터와 포토 다이오드를 이용하였으며, electroluminescence (EL) 스펙트럼 및 색좌표 측정을 위해 CS1000 spectroradiometer를 이용하였다.

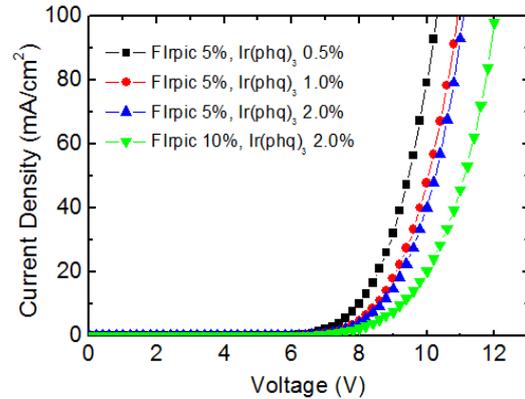
## 3. 결과 및 고찰

그림 2에 청색 인광 도판트인 FIrpic과 적색 인광 도판트인 Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 달리하여 제작한 단일 발광층 백색 인광 OLED의 EL 스펙트럼을 나타내었다. 소자 구조는 ITO/TAPC (30 nm)/mCP:FIrpic:Ir(phq)<sub>3</sub> (10 nm)/BALq (50 nm)/LiF (0.5 nm)/Al (100 nm)이



**Fig. 2.** Electroluminescence spectra for the single emission layer white OLEDs with various FIrpic and Ir(phq)<sub>3</sub> concentrations.

다. mCP 호스트 내에서 FIrpic의 농도는 5%와 10%로 변화시켰으며, Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도는 0.5, 1, 2%로 변화시켰다. EL 스펙트럼은 1,000 cd/m<sup>2</sup>의 휘도에서 측정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 470, 500 nm와 580 nm에서의 EL 피크를 볼 수 있다. 470 nm의 피크는 FIrpic 분자의 삼중항 (triplet) MLCT (metal to ligand charge transfer)에 의한 것이며, 500 nm에서의 피크는 FIrpic 분자의  $\pi-\pi^*$  전이에 의한 것이다 [16]. 580 nm에서의 EL 피크는 적색 인광 발광 재료인 Ir(phq)<sub>3</sub>에서의 삼중항 MLCT에 의한 것이다 [17]. FIrpic 농도가 5%, Ir(phq)<sub>3</sub> 농도가 0.5%인 소자는 FIrpic으로부터의 발광 피크가 상대적으로 강하게 나타나 (0.32, 0.39)의 CIE (The Commission Internationale d'Éclairage) 색좌표를 나타내었다. Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도가 1%로 증가하면 청색 발광 피크가 감소하여 (0.45, 0.41)의 CIE 색좌표를 나타내었으며, Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도가 2%일 경우 청색 발광 피크의 상대 강도는 더욱 감소하여 0.12를 나타내었으며, 이때의 CIE 색좌표는 (0.53, 0.43)이었다. 또한 Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 2%로 고정시키고 FIrpic의 농도를 5%에서 10%로 증가시키면 청색 발광 피크의 상대 강도가 0.24로 증가하여 CIE 색좌표는 (0.50, 0.43)으로 변화하였다. 호스트인 mCP의 삼중항 에너지 준위는 2.9 eV로 알려져 있으며 [18], FIrpic과 Ir(phq)<sub>3</sub>의 삼중항 에너지는 각각 2.62 eV와 2.13 eV이다 [19,20]. 호스트인 mCP의 삼중항 에너지 준위가 도판트인 FIrpic과 Ir(phq)<sub>3</sub>보다 높기 때문에 mCP에서 생성된 삼중항 여기자의 에너지가



**Fig. 3.** Current density curves as a function of voltage for the single emission layer white OLEDs with various FIrpic and Ir(phq)<sub>3</sub> concentrations.

FIrpic과 Ir(phq)<sub>3</sub>로 전달되어 각각의 도판트에서 발광이 일어날 수 있다. 또한 FIrpic의 삼중항 에너지 준위가 Ir(phq)<sub>3</sub>보다 높기 때문에 mCP에서 생성된 삼중항 여기자의 에너지는 FIrpic을 거쳐 Ir(phq)<sub>3</sub>로 순차적으로 전달이 일어날 수 있다. 에너지 전달과 더불어, FIrpic과 Ir(phq)<sub>3</sub>에서 전자와 정공의 직접 재결합에 의해 발광이 일어날 수도 있으므로 [21], 이를 확인하기 위하여 도판트 농도에 따른 전류-전압 특성을 조사하였다.

그림 3은 도판트의 농도를 변화시키며 제작한 백색 인광 OLED의 전압에 따른 전류밀도 특성을 나타낸 것이다. FIrpic의 농도를 5%로 고정시키고 Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 0.5에서 2%로 증가시키면 따라 같은 전류밀도를 얻기 위한 전압이 증가한다. Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 2%로 고정시키고 FIrpic의 농도를 5%에서 10%로 증가시키면 같은 전류밀도를 얻기 위한 전압 또한 증가한다. 예를 들어, Ir(phq)<sub>3</sub> 0.5% 소자의 경우 10 mA/cm<sup>2</sup>의 전류밀도를 얻기 위한 전압은 8.0 V였으며, Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도가 2%로 증가함에 따라 같은 전류밀도를 얻기 위한 전압은 8.8 V로 증가한다. 또한, Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 2%로 고정시키고 FIrpic의 농도를 10%로 증가시키면 같은 전류밀도를 얻기 위한 전압은 9.2 V로 증가한다. 이로부터, mCP에 도핑된 FIrpic과 Ir(phq)<sub>3</sub> 분자는 전하를 트랩하여 전하의 이동을 방해하는 것을 알 수 있다. mCP 내에 도핑된 FIrpic과 Ir(phq)<sub>3</sub>에 의한 전하의 트랩은 그림 4의 에너지 준위로부터 추정할 수 있다. 호스트인 mCP의 HOMO (highest occupied molecular orbital)와

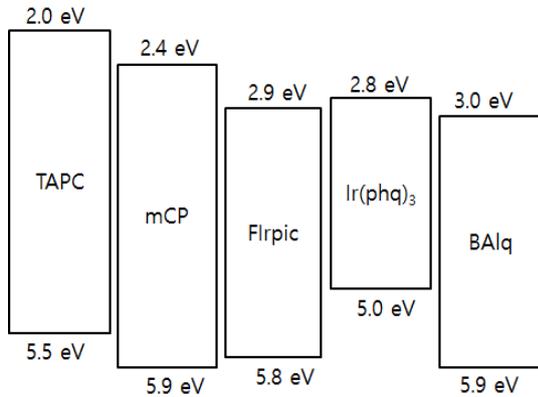


Fig. 4. Energy level diagram of the phosphorescent WOLED with single emission layer.

LUMO (lowest unoccupied molecular orbital) 에너지 준위는 각각 5.9 eV와 2.0 eV로 알려져 있다 [14]. 도판트인 Ir(phq)<sub>3</sub>의 HOMO와 LUMO 에너지 준위는 각각 5.0 eV와 2.8 eV로 [22], mCP의 밴드갭 내에 Ir(phq)<sub>3</sub>의 에너지 준위가 위치하여 있어 Ir(phq)<sub>3</sub>에서 전자와 정공이 트랩될 수 있다. 특히, mCP와 Ir(phq)<sub>3</sub>의 HOMO 에너지 준위 차가 크기 때문에 Ir(phq)<sub>3</sub>은 정공에 대해 강한 트랩으로 작용하는 것으로 추정된다. 청색 인광 도판트인 FIrpic의 HOMO와 LUMO 에너지 준위 또한 호스트 mCP의 밴드갭 내에 위치하고 있어 FIrpic 분자가 전하의 트랩으로 작용하는 것으로 판단된다. 특히 LUMO 에너지 준위 차가 크기 때문에 전자에 대해 강한 트랩으로 작용하는 것으로 추정된다. 따라서 그림 2의 발광 스펙트럼에서 FIrpic과 Ir(phq)<sub>3</sub>에서의 발광은 에너지 전달 이외에 청색 인광 도판트인 FIrpic과 적색 인광 도판트인 Ir(phq)<sub>3</sub>에서 전자와 정공이 직접 재결합함에 의해서도 일어나는 것으로 판단된다.

그림 5에 FIrpic과 Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 달리하여 제작한 단일 발광층 백색 인광 OLED의 전압에 따른 휘도 곡선을 나타내었다. FIrpic의 농도를 5%로 고정시키고 Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 0.5%에서 2%로 증가시키면 구동전압이 약간 증가한다. 또한, Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 2%로 고정시키고 FIrpic의 농도를 5%에서 10%로 증가시키면 구동전압이 약간 증가한다. 예를 들어, FIrpic의 농도가 5%, Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도가 0.5%일 경우 1 cd/m<sup>2</sup>의 휘도를 얻기 위한 발광개시전압 (turn on voltage)는 4.2 V였으며, Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 2%로 증가시키면 발광개시 전

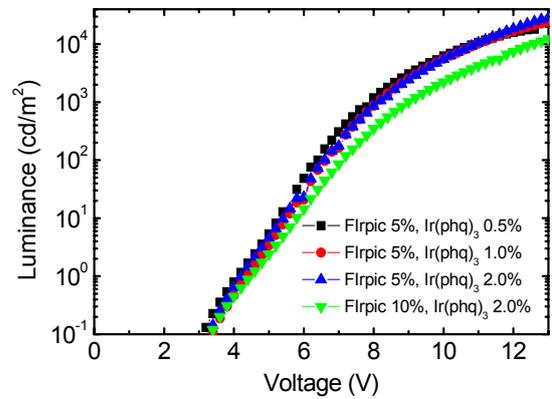
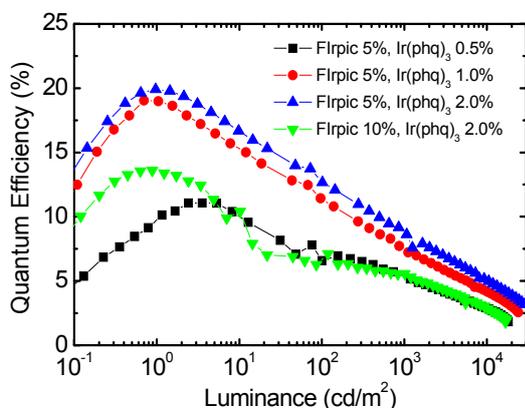


Fig. 5. Luminance curves as a function of voltage for the single emission layer white OLEDs with various FIrpic and Ir(phq)<sub>3</sub> concentrations.

압은 4.4 V로 증가한다. 또한 Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 2%로 고정시키고 FIrpic의 농도를 5%에서 10%로 증가시키면 발광 개시전압은 4.4 V에서 4.6 V로 증가한다. 휘도 1,000 cd/m<sup>2</sup>을 얻기 위한 구동전압 또한 FIrpic의 농도를 5%로 고정시키고 Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 0.5%에서 2%로 증가시키면 8.0 V에서 8.2 V로 약간 증가하며, Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 2%로 고정시키고 FIrpic의 농도를 5%에서 10%로 증가시키면 8.2 V에서 9.0 V로 다소 증가한다. Ir(phq)<sub>3</sub>와 FIrpic의 농도 증가에 따른 구동전압 증가는 그림 3에서 보는 것처럼 같은 전류 밀도를 얻기 위한 전압의 증가와 더불어 양자효율 변화에 의한 것이다. 도판트 농도 변화에 따른 외부양자효율 변화로 인하여 같은 전류 밀도를 얻기 위한 전압과 같은 휘도를 얻기 위한 전압의 차이가 있다.

그림 6은 FIrpic과 Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 달리하여 제작한 단일 발광층 백색 인광 OLED의 휘도에 따른 외부양자효율 곡선을 나타내었다. 외부양자효율은 1-5 cd/m<sup>2</sup>의 낮은 휘도에서 최대가 되며 휘도가 증가하면 감소하는데, 이는 휘도가 증가함에 따라 삼중항 여기자간의 거리가 감소하고, 이로 인해 삼중항 여기자 간의 상호작용이 증가하여 삼중항-삼중항 소멸이 증가하기 때문인 것으로 판단된다 [23]. FIrpic의 농도를 5%로 고정시키고 Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 증가시키면 외부양자효율이 증가한다. 반면, Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 2%로 고정시키고 FIrpic의 농도를 5%에서 10%로 증가시키면 외부양자효율은 감소한다. 예를 들어, FIrpic의 농도가 5%, Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도가 0.5%인 소자



**Fig. 6.** External quantum efficiency curves as a function of luminance for the single emission layer white OLEDs with various FIrpic and Ir(phq)<sub>3</sub> concentrations.

의 경우 최대 외부양자효율은 13.6%였으며, Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 2%로 증가시키면 최대 외부양자효율은 19.9%로 이론적으로 얻을 수 있는 최대 외부양자효율 값에 나타낸다. 소자의 최대 전류효율은 45.2 cd/A를 나타내었다 [4]. 반면, Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 2%로 고정시키고 FIrpic의 농도를 5%에서 10%로 증가시키면 최대 외부양자효율은 19.9%에서 11.1%로 감소한다. Ir(phq)<sub>3</sub>의 삼중항 에너지 준위는 2.13 eV로 [20], 정공 수송층인 TAPC와 전자 수송층인 BALq의 삼중항 에너지 준위인 2.87 eV와 2.42 eV보다 작으며 [24, 25], 호스트 mCP의 삼중항 에너지 2.9 eV보다 작으므로 [18], Ir(phq)<sub>3</sub>에서 생성된 삼중항 여기자는 TAPC와 BALq로 손실되지 않으며 호스트 mCP로 역 에너지 전달 또한 일어나지 않는다. 따라서 FIrpic의 농도를 5%로 고정시키고 Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 0.5%에서 2%로 증가시키면 따라 호스트에서 Ir(phq)<sub>3</sub>로 에너지 전달이 효율적으로 일어나는 것으로 판단된다. FIrpic의 삼중항 에너지는 2.62 eV로 [19], TAPC와 호스트 mCP의 삼중항 에너지 준위보다 보다 작지만 전자수송층인 BALq의 삼중항 에너지 준위보다 커서 FIrpic에서 BALq로 에너지 손실이 일어날 수 있다. 따라서 FIrpic의 농도를 5%에서 10%로 증가시키면 따른 외부양자효율 감소는 FIrpic에서 BALq로 에너지 손실에 의한 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 mCP 호스트에 적색과 청색 인광 발광 재료인 Ir(phq)<sub>3</sub>와 FIrpic을 동시에 도핑함에 의해 단일 발광층 구조의 인광 백색 OLED를 제작하고, Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도를 0.5%, 1%, 2%, FIrpic의 농도를 5%, 10%로 변화시키며 백색 OLED의 발광 특성, 구동 및 효율 특성을 조사하였다. Ir(phq)<sub>3</sub>와 FIrpic으로의 에너지 전달 및 각각의 도판트에서 전하의 직접 재결합에 의해 발광이 일어났으며, Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도가 0.5%인 소자의 경우 청색 발광이 상대적으로 강하게 나타났으나 Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도가 2%로 증가함에 따라 적색에 대한 청색 발광의 상대 강도는 0.12 이하로 감소하였다. Ir(phq)<sub>3</sub>와 FIrpic은 전하의 이동에 대한 트랩으로 작용하여 도판트의 농도가 증가함에 따라 구동전압이 증가하였다. Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도가 2%, FIrpic의 농도가 5%인 소자에서 최대 외부양자효율 19.9%, 최대전류효율 45.2 cd/A를 나타내었다. Ir(phq)<sub>3</sub>의 농도가 0.5%인 경우와 FIrpic의 농도가 10%인 경우 에너지 손실에 의해 외부양자효율이 감소하였다.

#### REFERENCES

- [1] M. Arai, K. Nakaya, O. Onitsuka, T. Inoue, M. Codama, M. Tanaka, and H. Tanabe, *Synth. Met.*, **91**, 21 (1997).
- [2] B. W. D'Andrade and S. R. Forrest, *Adv. Mater.*, **16**, 1585 (2004).
- [3] J. Kido, K. Hongawa, K. Okuyama, and K. Nagai, *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 815 (1994).
- [4] B. W. D'Andrade, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, *Adv. Mater.*, **14**, 147 (2002).
- [5] J. Kido, H. Shinoya, and K. Nagai, *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 2281 (1995).
- [6] I. Tanaka, M. Suzuki, and S. Tokito, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42**, 2737 (2003).
- [7] B. W. D'Andrade, R. J. Holmes, and S. R. Forrest, *Adv. Mater.*, **16**, 624 (2004).
- [8] T. Peng, Y. Yang, H. Bi, Y. Liu, Z. Hou, and Y. Wang, *J. Mater. Chem.*, **21**, 3551 (2011).
- [9] J. Liu, Z. Xie, Y. Cheng, Y. Geng, L. Wang, X. Jing, and F. Wang, *Adv. Mater.*, **19**, 531 (2007).
- [10] J. Kido, M. Kimura, and K. Nagai, *Science*, **267**, 1332 (1995).
- [11] C. H. Hsiao, Y. H. Lin, T. L. Chiu, and J. H. Lee,

- Organic Electronics*, **12**, 547 (2011).
- [12] Y. Sun and S. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 263503 (2007).
- [13] C. C. Chang, J. F. Chen, S. W. Hwang, and C. H. Chen, *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 253501 (2005).
- [14] H. Kanno, R. J. Holmes, Y. Sun, S. K. Cohen, and S. R. Forrest, *Adv. Mater.*, **18**, 339 (2006).
- [15] B. C. Krummacher, V. Choong, M. K. Mathai, S. A. Choulis, and F. So, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 113506 (2001).
- [16] V. Maiorano, E. Perrone, S. Carallo, A. Biasco, P. P. Pompa, R. Cingolani, A. Croce, R. I. R. Blyth, and J. Thompson, *Synth. Met.*, **151**, 147 (2005).
- [17] K. Saito, N. Matsusue, H. Kanno, Y. Hamada, H. Takahashi, and T. Matsumura, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**, 2733 (2004).
- [18] R. J. Holmes, S. R. Forrest, Y. J. Tung, R. C. Kwong, J. J. Brown, S. Garon, and M. E. Thompson, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 2422 (2003).
- [19] C. Adachi, R. C. Kwong, P. Djurovich, V. Adamovich, M. A. Baldo, M. E. Thompson, and S. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 2082 (2001).
- [20] A. Endo and C. Adachi, *Chem. Phys. Lett.*, **483**, 224 (2009).
- [21] Y. S. Seo and D. G. Moon, *J. Phys. D:Appl. Phys.*, **43**, 305101 (2010).
- [22] J. H. Jou, S. M. Shen, S. H. Chen, M. H. Wu, W. B. Wang, H. C. Wang, C. R. Lin, Y. C. Chou, P. H. Wu, and J. J. Shyue, *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 143306 (2010).
- [23] M. A. Baldo, C. Adachi, and S. R. Forrest, *Phys. Rev. B*, **62**, 10967 (2000).
- [24] K. Goushi, R. Kwong, J. J. Brwon, H. Sasabe, and C. Adachi, *J. Appl. Phys.*, **95**, 7798 (2004).
- [25] T. Y. Chu, Y. S. Wu, J. F. Chen, and C. H. Chen, *Chem. Phys. Lett.*, **404**, 121 (2005).