

경사 도핑된 발광층을 갖는 유기발광다이오드의 전기광학적 특성 해석

이영구¹, 오태식^{2,a}

¹ 철원플라즈마 산업기술연구원 연구개발진흥팀

² 선문대학교 정보디스플레이학과

Numerical Simulations of Electric-Optical Characteristics for Organic Light Emitting Diode with Gradient-Doped Emitting Layer

Young-Gu Lee¹ and Tae-Sik Oh^{2,a}

¹ R&D Promotion Team, Cheorwon Plasma Research Institute, Cheorwon 269-802, Korea

² Department of Information Display, Sun Moon University, Asan 336-708, Korea

(Received May 13, 2010; Revised June 9, 2010; Accepted June 14, 2010)

Abstract: We have carry out numerical simulation of the electric-optical characteristics of organic light emitting diodes with gradient-doped emitting layer which were reported to be effective in improving luminous efficiency and lifetime. In this paper, the basic structure is comprised of ITO/NPB/Alq₃:C545T[%]/Alq₃/LiF/Al, six devices by separating the emitting layer of Alq₃:C545T[%] were studied. As the result, the uniformly-doped devices exhibited superior luminous efficiency-current density characteristics over conventional undoped device. In the case of gradient-doped devices, electric-optical characteristics were improved similar to uniformed-doped devices, unusually the distribution of trapped-charge density in the OLED devices was shown as the staircase.

Keywords: OLED, Host-guest system, Gradient-doped emitting layer

1. 서 론

유기발광다이오드 (organic light emitting diode, OLED)는 자발광형 (emissive) 소자이면서 고속 응답 (high response time) 특성과 넓은 시야각 (wide viewing angle) 특성을 갖고 있기 때문에 실외에서도 선명한 동영상을 구현할 수 있다. 뿐만 아니라 저전력 (low power consumption)으로 구동되므로 친환경적이며 플렉시블 (flexible) 디스플레이 소자가 가능하다는 매력적인 요소들을 갖고 있기 때문에 차세대 디스플레이 소자로서 활발히 연구개발 되어 지고 있고

최근에는 조명용 소자 (lighting devices)로서의 가능성에 대해서도 큰 관심을 모으고 있다. 그 동안 디스플레이 소자로는 passive matrix OLED (PMOLED)가 주류를 이루어 왔지만 2007년부터 active matrix OLED (AMOLED)가 본격적으로 양산되어지면서 유비쿼터스 (ubiquitos) 시대를 선도하고 있는 다양한 모바일 (mobile) 기기들에 적용되어지고 있다. 그러나 대화면 디스플레이용이나 조명 기기용으로는 요구되어지는 발광 효율 (luminous efficiency) 특성과 수명 (lifetime) 특성 그리고 대량 생산을 위한 제조기술들이 아직까지 확보되지 않아 상용화가 지연되고 있는 실정이다. 이처럼 OLED 소자가 여러가지 응용 분야에 활용되기 위해서는 장시간 동안의 작동에서도 구

a. Corresponding author; ots99@sunmoon.ac.kr

동전압의 변화가 적고 안정된 동작특성을 나타낼 수 있는 고효율, 고신뢰성의 OLED 소자의 개발이 절실한 상황이다.

고효율, 장수명의 OLED 소자 개발을 위해서는 각 유기물 박막층의 에너지 준위를 고려한 획기적인 구조 개선과 새로운 고성능의 유기물 재료를 적용하여 구동전압을 낮추고 발광효율을 높이고 수명을 증가시켜야 한다. 그러나 현실적으로는 전자의 주입과 수송을 원활히 하기 위해서 음극과 발광층 (emitting layer, EML) 사이에 전자 주입층 (electron injection layer, EIL)과 전자 수송층 (electron transport layer, ETL)을 설치하거나, 정공의 주입과 수송을 원활히 하기 위해 양극과 발광층 사이에 정공 주입층 (hole injection layer, HIL)과 정공 수송층 (hole transport layer, HTL)을 추가적으로 도입하고 있다 [1-3]. 또 다른 개선 방안으로는 OLED 소자의 저전압 구동과 발광 효율의 향상을 위해서 도펀트 (dopant)를 주재료 (host)에 도핑 (doping)하는 방법이 가장 많이 검토되어지고 있는 방법 중의 하나이다 [4-9]. 이중에서도 발광층의 주재료와 도펀트를 소정의 비율로 동시에 진공 열 증착시켜 발광층 전체를 균일하게 도핑하거나 발광층을 분할하여 경사 도핑하는 경우 발광 효율과 수명의 개선에 큰 효과가 있는 것으로 보고되어져 있다 [10,11]. 본 논문에서는 경사 도핑된 발광층을 갖는 OLED 소자의 동작 메카니즘을 검증하기 위하여 다음과 같이 소자를 구성하였다.

본 논문에서의 경사 도핑된 OLED 소자는 ITO/NPB/Alq₃:C545T[%]/Alq₃/LiF/Al로 이루어지는 host-guest system 소자 구조이며 이를 그림 1에 나타내었다. 이 소자 구조는 호스트 (host) 물질로서 분자식이 C₂₇H₁₈AlN₃O₃이고 459.43 g/mol의 분자량을 갖는 Alq₃(tris(8-hydroxyquinolino) aluminium)를 10⁻⁶~10⁻⁷ torr 정도의 고진공 상태에서 열 증착 (thermal evaporation)시킬 때에 분자식이 C₂₆H₂₆N₂O₂S이고 430.56 g/mol의 분자량을 갖는 C545T(10-(2-benzothiazolyl)-1,1,7,7-tetramethyl-2,3,6,7-tetrahydro-1H,5H,11H,[1]benzo-pyranol[6,7,8-ij]quinolizin-11-one)의 녹색 형광 (green fluorescent) 도펀트를 게스트 (guest) 물질로서 동시에 열 증착시켜 발광층을 형성시킨다. 이때 목표로 하는 발광층의 박막 두께와 도펀트의 중량비 [wt%]를 고려하여 Alq₃와 C545T의 열 증착 속도를 각각 설정한다. 그러나 유기물은 그 재료 특성에 의하여 상기와 같은 증착 온도나 증착 속도 등의 제조 공정 조건에 따라서 전하 이동도와 같은 전기적인 특성요인이 쉽게 달라져 버리는 문제점이 있다 [12,13].

따라서 host-guest system 구조가 적용된 소자의 실험에서 재현성 있는 전기광학적인 실험결과를 획득하는 것은 현실적으로 어렵다. 그래서 OLED 소자의 고효율화와 고신뢰성을 확보하기 위해서는 상기와 같은 제조공정 조건에 영향을 받지 않는 전산 시뮬레이션에 의한 수치 해석을 통해서 OLED 소자 구조의 전기광학적인 특성을 확인하고 그 동작 메카니즘을 분석하여 정확히 이해하는 것은 매우 중요한 과정이라고 할 수 있다.

본 논문에서는 발광층인 Alq₃:C545T[%]의 도핑량과 경사 도핑 구조에 따라 분류한 6가지 종류의 OLED 소자에 대한 전기광학적인 특성 해석과 동작 메카니즘을 분석하고 검증하기 위하여 소자의 전압-전류밀도-휘도 특성과 전류 효율 특성, 그리고 소자 내부에서의 전계 분포 특성, 재결합율 (recombination rate) 분포, 트랩 전하 (traped charge) 분포 등과 같은 전기광학적인 특성 요인들을 상용의 SimOLED v2.0.3 electric version으로 전산 시뮬레이션하여 분석하였다.

2. 실험 방법

유기 화합물 박막층에서의 전하 이동도 (charge mobility)를 전산 시뮬레이션 해석하기 위한 방법으로 Poole-Frenkel 모델이나 W. G. Gill 모델이 일반적으로 적용되어지고 있다.

Poole-Frenkel 모델은 전계 효과만이 고려되어지는 것으로 전하의 이동도는 다음의 식 (1)과 같이 나타내어진다 [14-19].

$$\mu(E) = \mu_0 \exp(\beta \sqrt{E}) \quad (1)$$

여기에서 E 는 전계 (electric field)이고 μ_0 는 무전계 (zero electric field)에서의 전하 이동도이며 β 는 재료 내에서 무질서 (disorder)와 관련되는 특성 전계 상수 (characteristic electric field constant)이다. 한편 상기의 식 (1)은 전자와 정공의 이동도를 각각 구하기 위해서 다음과 같은 식들로 표현되어져 수치해석에 적용되어지고 있다.

$$\mu_e(E) = \mu_{0e} \exp\left(\sqrt{\frac{E}{E_{0e}}}\right) \quad (2)$$

$$\mu_h(E) = \mu_{0h} \exp\left(\sqrt{\frac{E}{E_{0h}}}\right) \quad (3)$$

여기에서 E_0 는 무전계이고 μ_{0e} 와 μ_{0h} 는 무전계에서의 전자와 정공의 이동도이다.

W. G. Gill 모델은 전계 효과와 온도의 영향을 동시에 고려한 것으로 다음의 식 (4)와 같이 나타내어진다 [14,19].

$$\mu(T, E) = \mu_{01} \exp\left[-\frac{\Delta E - \beta_{PF}\sqrt{E}}{K_B T_{eff}}\right] \quad (4)$$

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \quad (5)$$

여기에서 μ_{01} , β_{PF} , T_0 는 실험 데이터 곡선으로부터 구할 수 있는 상수들이고, ΔE 는 무전계시의 활성화 에너지 (activation energy)이며 T는 유기 박막층의 온도이고 K_B 는 볼츠만 상수 (Boltzmann's constant)를 각각 나타낸다.

그러나 상기 식 (4)와 같이 온도 인자를 고려하는 경우는 많은 실험을 통하여 각각의 유기물 재료에 대한 온도별로 전하 이동도의 전계 의존성 그래프를 구하여 상기의 상수 인자들을 도출 [14,18]해 내어야만 하는 어려움이 있다. 그래서 본 논문에서는 이미 선행의 참고문헌들에서 time of flight 방식 [15,20-24]이나 transient electroluminescence 방식 [24-29]을 이용하여 측정된 유기 박막층의 전하의 이동도 특성 그래프로부터 상기의 Poole-Frenkel 관계식에서 필요로 하는 전자와 정공에 대한 μ_{0e} , μ_{0h} 와 E_{0e} , E_{0h} 를 각각 구하여 활용하였다. 이 상수들을 기초 데이터로 적용하여 참고문헌 [9]에 제시되어 있는 실험에 의한 전압-전류밀도 특성곡선에 맞도록 최적화하여 전하 이동도와 특성 전계 상수를 도출하였다. 본 논문의 전산 시뮬레이션 해석에 적용한 유기물 박막층에서의 전하 이동도와 그 각각의 특성 전계를 표 1에 나타내었다 [30].

Table 1. Charge mobility and characteristic electric field of NPB and Alq₃.

Material	Electron		Hole	
	μ_{0e}	E_{0e}	μ_{0h}	E_{0h}
NPB	7.0×10^{-7}	4.4×10^{-3}	7.0×10^{-5}	4.4×10^{-3}
	0.0%	8.5×10^{-8}	7.9×10^{-3}	8.5×10^{-10}
	0.5%	7.5×10^{-8}	7.5×10^{-3}	7.5×10^{-10}
Alq ₃	1.0%	7.2×10^{-8}	7.5×10^{-3}	7.2×10^{-10}
	1.5%	6.6×10^{-8}	7.4×10^{-3}	6.6×10^{-10}

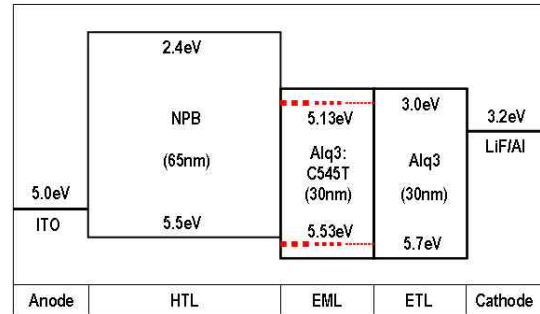


Fig. 1. Schematic modeling structure of OLED device with the gradient-doped emitting layer.

여기서 이동도와 특성 전계 상수의 단위는 각각 [cm^2/Vs]와 [V/cm]이다. 표 1에서 보는 바와 같이 Alq₃의 경우는 C545T의 도핑 농도에 따라 전하 이동도와 그 각각의 특성 전계 상수가 달라졌으며 도핑 농도가 증가할수록 전하의 이동도가 늦어지는 것을 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

그림 1의 구조에서 발광층인 Alq₃:C545T[%]의 두께 30 nm를 10 nm씩 3영역으로 분할하고 정공 수송층 (NPB)층에서부터 EML1, EML2, EML3로 표기하기로 한다. 그리고 각각의 발광층에 도펀트인 C545T의 중량비를 호스트 물질인 Alq₃ 대비 0, 0.5, 1.0, 그리고 1.5 wt%로 각각 도핑시킨 하기와 같은 6종류의 소자 구조에 대해 전기광학적인 특성 변화를 검토하였다. 이 소자 구조들은 다음과 같이 구성되었으며 그 각각을 Device-A, B, C, D, E, F로 명명한다.

Device-A: ITO/NPB(65 nm)/Alq₃(60 nm)/LiF/Al

Device-B: ITO/NPB(65 nm)/Alq₃:C545T-0.5 wt%(30 nm)/Alq₃(30 nm)/LiF/Al

Device-C: ITO/NPB(65 nm)/Alq₃:C545T-1.5 wt%(10 nm)/Alq₃:C545T-1.0 wt%(10 nm)/Alq₃:C545T-0.5 wt%(10 nm)/Alq₃(30 nm)/LiF/Al

Device-D: ITO/NPB(65 nm)/Alq₃:C545T-1.0 wt%(30 nm)/Alq₃(30 nm)/LiF/Al

Device-E: ITO/NPB(65 nm)/Alq₃:C545T-0.5 wt%(10 nm)/Alq₃:C545T-1.0 wt%(10 nm)/Alq₃:C545T-1.5 wt%(10 nm)/Alq₃(30 nm)/LiF/Al

Device-F: ITO/NPB(65 nm)/Alq₃:C545T-1.5 wt%(30 nm)/Alq₃(30 nm)/LiF/Al

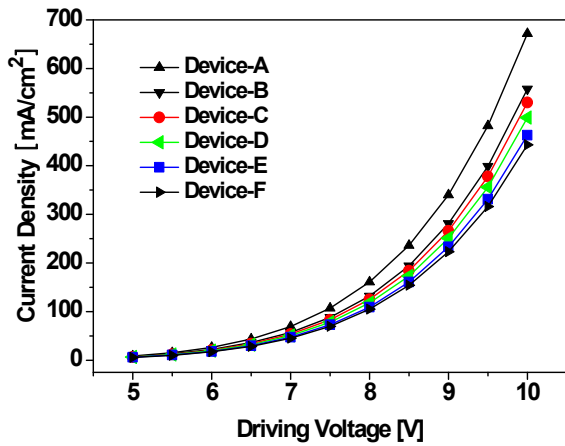


Fig. 2. Driving voltage vs current characteristics of the OLED Devices A-F.

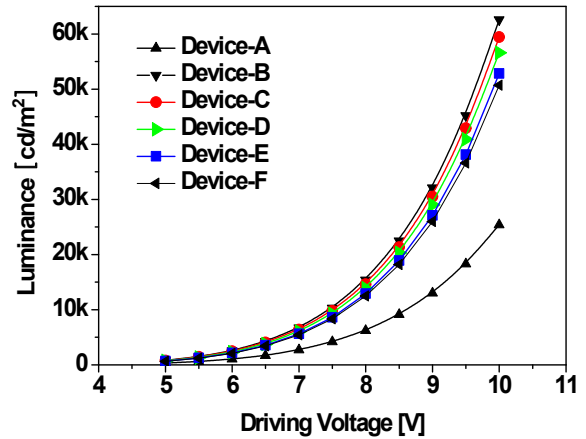


Fig. 3. Driving voltage vs luminance characteristics of the OLED Devices A-F.

선행의 연구 논문 [29]에서 검토한 바와 같이 host-guest system 모델인 Device-A, B, D, F의 경우는 OLED 소자의 기본 특성인 전압-전류밀도 실험 데이터와 시뮬레이션 데이터가 일치하였다. 본 논문에서도 시뮬레이션 해석결과의 정확성을 위하여 상기 소자들의 수치해석에 적용한 표 1의 파라미터들을 경사 도핑 모델인 Device-C, E에 적용하여 전압-전류밀도 특성곡선을 구하였다.

그림 2의 전압-전류밀도 특성곡선에서 보는 바와 같이 동일 구동전압 조건에서 도펀트인 C545T가 도핑된 소자들이 기존의 도핑되지 않은 Device-A에 비하여 전류밀도가 감소되며 또한 도핑한 농도가 높을수록 전류밀도가 감소되는 특성곡선을 나타내었다. 경사 도핑된 소자인 Device-C의 경우는 발광층의 호스트 물질인 Alq₃를 정공 수송층 (NPB)층에서 전자 수송층 (Alq₃) 방향으로 진공 증착할 때에 이와 동시에 도펀트 물질인 C545T를 1.5 wt%, 1.0 wt%, 0.5 wt%의 순서로, Device-E는 0.5 wt%, 1.0 wt%, 1.5 wt%의 순서로 10 nm씩 순차적으로 도핑하여 EML1, EML2, EML3를 각각 형성한 것이다. 여기서 1 wt%가 연속적으로 동일하게 도핑된 Device-D를 기준으로 살펴보면 전자 수송층과 인접한 EML3에 0.5 wt%가 도핑된 Device-C는 0.5 wt%가 연속적으로 동일하게 도핑된 Device-B와 유사한 특성을 나타내고, EML3에 1.5 wt%가 도핑된 Device-E는 1.5 wt%가 연속적으로 동일하게 도핑된 Device-F와 유사한 특성을 나타내고 있다. 앞의 결과로부터 EML3의 도핑 농도가 높을수록 전압-전류밀도 특성은 저하되어지는 것을 알 수 있다.

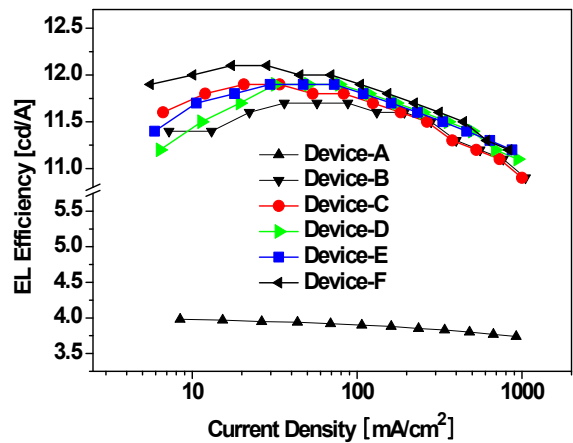


Fig. 4. Current density vs EL efficiency characteristics of the OLED Devices A-F.

그림 3은 전압-휘도 특성곡선을 수치 해석하여 나타낸 것으로 C545T를 도핑하지 않은 Device-A에 대비하여 도핑한 소자들의 경우에서 휘도가 대폭 증가하였고, 이는 host-guest system의 휘도 특성을 잘 나타내고 있다. 도핑한 소자들의 휘도 특성들을 살펴보면 전압-전류밀도 특성곡선과 같은 경향을 나타내고 있으며, 0.5 wt%로 연속 도핑된 Device-B의 휘도가 가장 높게 나타났다. 경사 도핑한 Device-C, E의 경우도 전압-전류밀도 특성곡선의 순서와 일치되는 휘도특성이 나타나고 있다. 결국 동일한 구동전압에서 C545T를 도핑한 소자들의 경우가 도핑하지 않은 소자보다 전류는 감소하지만 오히려 휘도가 증가하여 발광 효율이 크게 향상되어지게 된다.

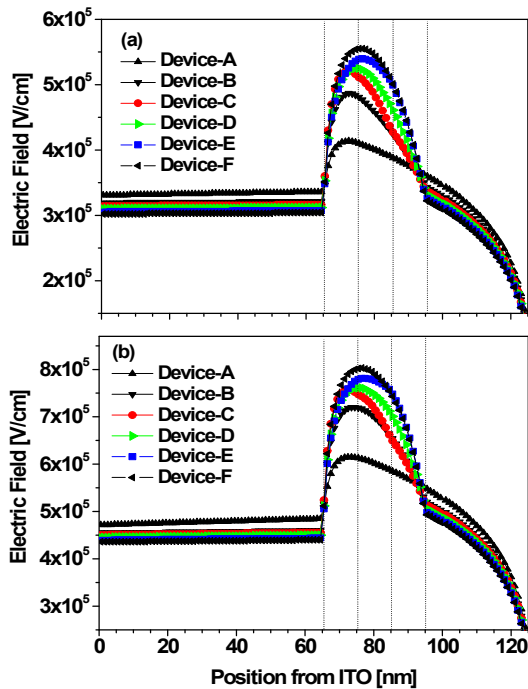


Fig. 5. Distribution of electric field in the OLED devices A-F at the driving voltage of (a) 6 V, (b) 8 V.

그림 4에서 보는 바와 같이 Device-A의 경우는 전류 밀도 100 mA/cm^2 에서 발광효율이 3.9 cd/A 정도에 불과하지만 경사 도핑을 포함한 모든 도핑된 소자들의 경우 $11.7 \sim 11.9 \text{ cd/A}$ 정도로 증가되어져 약 3배 정도로 향상되었다. 경사 도핑된 Device-C, E의 경우는 $6.0 \sim 6.5 \text{ V}$ 정도의 구동전압에 해당하는 전류밀도 30 mA/cm^2 를 전후로 발광효율 특성이 바뀌어졌다. 이러한 host-guest system이 적용된 소자 내부에서의 전계 분포, 전하 이동도 분포, 재결합률 그리고 트랩 전자 분포와 같은 전기적인 요인들을 수치 해석하여 그 동작 메커니즘에 대해서 분석해 보았다.

그림 5에서는 구동전압이 6 V와 8 V인 경우에 소자 내에서의 전계 분포를 나타낸 것으로 C545T 도핑 여부에 따라 분포곡선이 변화되어짐을 알 수 있다. 도핑하지 않은 Device-A의 경우는 EML1~EML2 영역에서 전기장의 세기가 약하고 EML3와 전자 수송층 경계면에서 분포 곡선이 완만하게 연결되어지지만 도핑된 소자의 경우 도핑 농도가 증가할수록 그 경계면에서의 변화가 점점 크게 나타났다. 정공 수송층과 EML1의 경계면 부근에서는 경사 도핑된 Device-C가 전기장의 세기가 가장 급격히 변하는 것처럼 나타났지만 그 이후는 EML3의

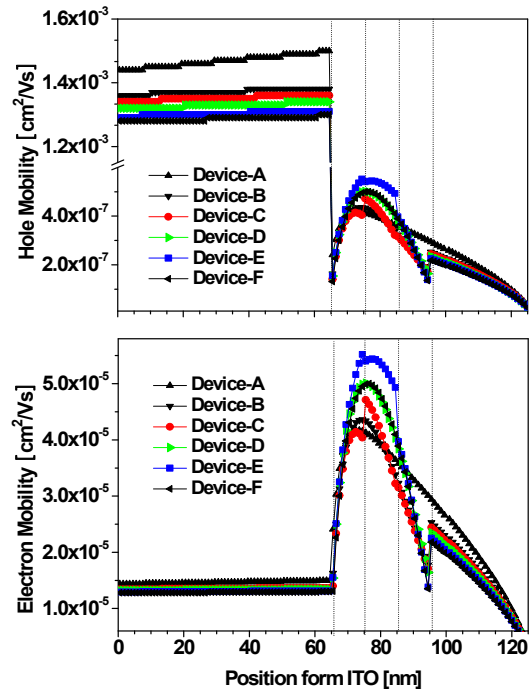


Fig. 6. Comparison of the hole and electron mobility characteristics in the OLED devices A-F at the same driving voltage of 8 V.

도핑 농도가 높은 것일수록 강한 전기장 분포를 나타내었다. 구동전압의 차이에 의해서 전기장의 세기는 변화되었지만 분포특성에는 큰 변화가 나타나지 않았다.

그림 6은 구동전압이 8 V일 때 소자 내에서의 정공과 전자의 이동도를 수치 해석하여 그 특성 분포를 각각 나타낸 것이다. 정공 수송층에서의 정공의 이동도와 전자 수송층에서의 전자의 이동도는 발광층의 도핑 농도가 낮은 소자의 경우가 빠른 경향을 보이고 있어 Device-A>Device-B>Device-C>Device-D>Device-E>Device-F의 순서로 나타났다. 그러나 이러한 전하의 이동도는 도핑된 발광층 내에서 그 순서가 바뀌어져 EML3가 1.5 wt%로 경사 도핑된 Device-E가 가장 빠르고 다음으로 Device-D와 Device-F의 순서이다. EML3가 0.5 wt%로 경사 도핑된 Device-C는 EML1과 EML2의 경계면에서 급격히 변화되어져 EML1에서 가장 느린 전하 이동도 특성을 나타내고 있다.

그림 7은 구동전압 8 V일 때 소자내에서의 전하들의 재결합률을 나타낸 것이다. 정공 수송층과 EML1의 경계면인 65 nm영역에서의 재결합률은 Device-A>Device-B>Device-C> Device-D>Device-E>Device-F

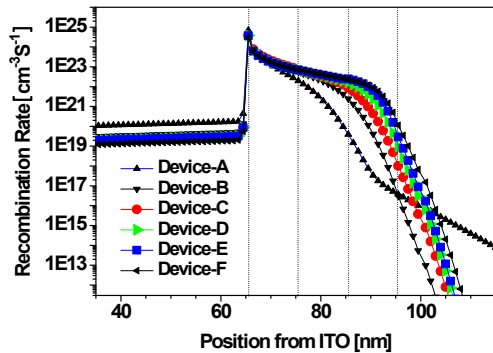


Fig. 7. Distribution of recombination rate in the OLED devices A-F at the same driving voltage of 8 V.

의 순서로 나타나지만, EML3쪽으로 형성되어지는 재결합율은 도핑 농도에 따라서 Device-F>Device-E>Device-D>Device-C>Device-B>Device-A의 순서로 나타남을 알 수 있고, 경사 도핑된 소자의 경우는 EML3의 도핑량이 많을수록 발광층내에서 재결합율이 높아지는 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

또한 이러한 재결합율 분포 특성으로부터 그림 2와 그림 3과 같이 나타나는 전압-전류밀도와 전압-휘도 특성도 이해할 수 있다. 도핑하지 않은 Device-A의 경우 65 nm영역에서의 재결합율은 가장 높지만 발광층 내에서의 재결합율이 급격히 떨어지기 때문에 전류는 많이 흐르지만 휘도가 낮게 나오는 것을 알 수 있다. 반면에 도핑된 소자들의 경우는 65 nm영역에서의 재결합율은 Device-A 보다 낮지만 발광층 내에서의 재결합율이 완만히 변화되어져 어느 정도의 재결합율을 유지하기 때문에 전류밀도는 낮지만 휘도는 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 Device-E와 Device-F의 경우는 가장 낮은 전압-전류밀도와 전압-휘도 특성을 나타내지만 발광층 전체 영역에서 높은 재결합율을 유지하기 때문에 그림 4에서와 같이 전류 밀도-발광효율 특성이 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

그림 8은 도핑 농도에 따라서 트랩 (trap)되어지는 게스트 전자와 게스트 정공의 전하밀도 분포를 시뮬레이션 수치 해석하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 발광층의 경사 도핑 농도에 따라서 트랩되는 정공과 전자의 전하밀도가 달라진다. 도핑 농도가 높을수록 트랩되어지는 전하도가 높아진다. 특히 경사 도핑된 소자의 경우는 각 영역의 도핑 농도가 순차적으로 달라짐에 따라서 트랩되는 정공과 전자의 전하밀도가 계단 형상으로 증가되거나 감소되어지는

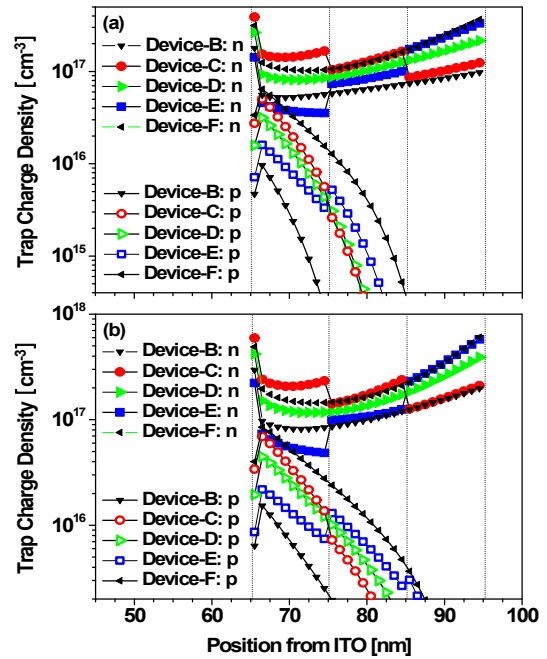


Fig. 8. Distribution of trapped-charge density in the OLED devices A-F at the driving voltage of (a) 6 V (b) 8 V.

것으로 나타나고 있다.

Device-C의 경우는 발광층 1.5 wt%로 동일하게 도핑된 Device-F에 대비하여 같은 도핑 농도인 EML1 영역에서 정공의 경우는 낮은 트랩 전하밀도를 나타내고 전자의 경우는 높은 트랩 전하밀도를 나타낸다. 반면에 Device-E의 경우는 발광층이 0.5 wt%로 동일하게 도핑된 Device-B에 대비하여 전자의 경우는 낮은 트랩 전하밀도를 나타내고 정공의 경우는 높은 트랩 전하밀도를 나타내고 있다.

경사 도핑한 Device-C와 Device-E의 경우를 비교해보면 트랩 전자 밀도의 경우 Device-C는 EML1에서 EML3로 단계적으로 낮아지는 반면 Device-E는 단계적으로 높아지고, 트랩 정공 밀도의 경우 Device-C는 EML1에서 EML3로 단계적인 변화가 크게 나타나지 않고 낮아지는 반면 Device-E는 단계적인 변화를 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 구동전압이 높아질수록 단계적인 변화의 폭이 커짐을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 발광층을 구성을 하는 Alq₃에 녹색 형

광 도펀트인 C545T를 도핑한 ITO/NPB/Alq₃:C545T[%]/Alq₃/LiF/Al 구조의 OLED 소자에 있어서 도펀트의 도핑 구조 변화에 따른 특성 변화를 검토하기 위하여 C545T의 도핑율과 도핑 구조를 변화시킨 6가지 종류의 OLED 소자 구조에 대해 전산 시뮬레이션으로 전기광학적인 특성의 변화를 수치 해석하였다.

그 결과 host-guest system이 적용된 OLED 소자들의 전압-전류 특성곡선은 발광층에 C545T 도펀트의 도핑 농도가 높아질수록 구동전압에 따라 완만하게 변화되어지는 특성을 나타내지만 전압-휘도 특성곡선은 급격히 증가되어 도핑하지 않은 소자보다 발광효율이 약 3배 정도 향상되는 것을 알 수 있었다. 또한 발광층에 C545T 도펀트를 순차적으로 경사 도핑한 소자들을 비교 해석한 결과, 발광층 내에서 도핑 농도가 순차적으로 달라짐에 따라서 트랩되는 정공과 전자의 전하밀도가 계단 형상으로 증가되거나 감소되어지며 전자 수송층에 인접한 발광층의 도핑 농도에 따라서 전압-전류밀도 및 전압-휘도 특성이 변화되어지는 것을 확인할 수 있다. 특히, 전자 수송층에 인접한 발광층의 도핑 농도가 증가할수록 재결합율이 발광층 전체적으로 완만하게 확대되어져 소자의 발광효율이 증가되는 것을 확인할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] Y. Ohmori, A. Fuji, M. Uchida, C. Morishima, and K. Yoshino, *Appl. Phys. Lett.* **63**, 1871 (1993).
- [2] S. A. Van Slyke, C. H. Chen, and C. W. Wang, *Appl. Phys. Lett.* **69**, 2160 (1996).
- [3] Peter K. H. Ho, J.-S. Kim, J. H. Burroughes, H. Becker, Sam F. Y. Li, T. M. Brown, F. Cacialli, and R. H. Friend, *Nature* **404**, 481 (2000).
- [4] C. W. Tang, S. A. VanSlyke, and C. H. Chen, *J. Appl. Phys.* **65**, 3610 (1989).
- [5] T. Mori, K. Obata, and T. Mizutani, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **32**, (1198) 1999.
- [6] F. Guo, D. Ma, L. Wang, X. Jing, and F. Wang, *Semicond. Sci. Technol.* **20**, 310 (2005).
- [7] C. C. Lee, Y.-D. Jong, P.-T. Huang, Y. C. Chen, P.-J. Hu, and Y. Chang, *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, 8147 (2005).
- [8] Y. Luo, H. Aziz, Z. D. Popovic, and G. Xu, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 103505 (2006).
- [9] Z. Chen and D. Ma, *J. Lumin.* **122-123**, 633 (2007).
- [10] A. B. Chwang, R. C. Kwong, and J. J. Brown, *Appl. Phys. Lett.* **80**, 725 (2002).
- [11] D. Ma, C. S. Lee, S. T. Lee, and L. S. Hung, *Appl. Phys. Lett.* **80**, 3641 (2002).
- [12] B. J. Chen, W. Y. Lai, Z. Q. Gao, C. S. Lee, W. A. Gambling, and S. T. Lee, *Appl. Phys. Lett.* **75**, 4010 (1999).
- [13] C. B. Lee, A. Uddin, X. Hu, and T. G. Andersson, *Mater. Sci. Eng., B* **112**, 14 (2004).
- [14] W. D. Gill, *J. Appl. Phys.* **43**, 5033 (1972).
- [15] R. G. Kepler, P. M. Beeson, S. J. Jacobs, R. A. Anderson, M. B. Sinclair, V. S. Valencia, and P. A. Cahill, *Appl. Phys. Lett.* **66**, 3618 (1995).
- [16] B. Chen and S. Liu, *Synth. Met.* **91**, 169 (1997).
- [17] D. J. Pinner, R. H. Friend, and N. Tessler, *J. Appl. Phys.* **86**, 5116 (1999).
- [18] P. W. M. Blom and M. C. J. M. Vissenberg, *Mater. Sci. Eng. R* **27**, 53 (2000).
- [19] W. Brutting, S. Berleb, and A. G. Muckl, *Org. Electron.* **2**, 1 (2001).
- [20] G. Pfister, *Phys. Rev. B* **16**, 3676 (1977).
- [21] R. L. Martin, J. D. Kress, I. H. Campbell, and D. L. Smith, *Phys. Rev. B* **61**, 15804 (2000).
- [22] S. Naka, H. Okada, H. Onnagawa, Y. Yamaguchi, and T. Tsutsui, *Synth. Met.* **111-112**, 331 (2000).
- [23] G. G. Malliaras, Y. Shen, D. H. Dunlop, H. Murata, and Z. H. Kafafi, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 2582 (2001).
- [24] S. C. Tse, H. H. Fong, and S. K. So, *J. Appl. Phys.* **94**, 2033 (2003).
- [25] C. Hosokawa, H. Tokailin, H. Higashi, and T. Kusumoto, *Appl. Phys. Lett.* **60**, 1220 (1992).
- [26] J. Kalinowski, N. Camaioni, P. D. Marco, V. Fattori, and A. Martelli, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 513 (1998).
- [27] S. Barth, P. Müller, H. Riel, P. F. Seidler, W. Riess, H. Vestweber, and H. Bässler, *J. Appl. Phys.* **89**, 3711 (2001).
- [28] D. Ma, G. Wang, Y. Hu, Y. Zhang, L. Wang, X. Jing, F. Wang, C. S. Lee, and S. T. Lee, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 1296 (2003).
- [29] J. Chen and D. Ma, *J. Appl. Phys.* **95**, 5778 (2004).
- [30] T. S. Oh and Y. G. Lee, *J. Kor. Acad. Ind. Coop. Soc.* **11**, 827 (2010).