

도핑된 발광층을 갖는 다층 유기발광다이오드 소자의 전기적 특성 해석

오태식^{1*}, 이영구²

¹선문대학교 공과대학 정보디스플레이학과

²철원플라즈마 산업기술연구원 연구개발 진흥팀

Simulations of Electrical Characteristics of Multi-layer Organic Light Emitting Diode Devices with doped Emitting Layer

Tae-Sik Oh^{1*} and Young-Gu Lee²

¹Department of Information Display, Sun Moon University

²R&D Promotion Team, Cheorwon Plasma Research Institute

요 약 발광층에 도펀트가 도핑된 다층 유기발광다이오드 소자 구조에서의 발광 메커니즘을 검증하기 위해 전기적인 특성요인들을 수치해석 하였다. 본 논문에 적용한 유기발광다이오드 소자는 ITO/NPB/Alq₃:C545T(%)/Alq₃/LiF/Al로 이루어져 있으며 도펀트인 C545T의 도핑 농도를 변화시킨 4종류의 소자 구조에 대해 특성 변화를 검토하였다. 그 결과 도펀트의 도핑 농도 변화에 따라서 전압-전류 특성이 변화되어짐을 확인하였고, 이는 참고 문헌에 제시되어 있는 전압-전류밀도 실험 데이터와 매우 잘 일치되었다. 또한 도펀트를 도핑시킨 소자 구조들에서 전압-휘도 특성이 대폭 향상되어 발광효율이 3배정도 향상되었다. 이와 같은 guest-host system이 적용된 유기발광다이오드 소자의 동작 메커니즘을 분석하기 위하여 소자 내부에서의 전계분포, 전하분포, 재결합율 등의 전기적인 항목들에 대한 특성의 변화를 관찰하였다.

Abstract We have performed numerical simulations of the electrical characteristics for multi-layer organic light emitting diode devices with doped emitting layer using a commercial simulation program. In this paper, the basic structure consists of the ITO/NPB/Alq₃:C545T(%)/Alq₃/LiF/Al, four devices that were composed of Alq₃ as the host and C545T as the green dopant with different concentration, were studied. As the result, the variations of the doping concentration rate of C545T have a effect on the voltage-current density characteristics. The voltage-current characteristics are quite consistent with the results which were experimentally determined in a previous reference paper. In addition, the voltage-luminance characteristics were greatly improved, and the luminous efficiency was improved three times. In order to analyze these driving mechanism, we have investigated the distribution of electric field, charge density of the carriers, and recombination rates in the inner of the OLED devices.

Key Words : OLED, HOMO, LUMO, Guest-Host System, Dopant, Concentration Quenching

1. 서론

유기발광다이오드(organic light emitting diode, OLED) 소자는 그림 1에 나타낸 바와 같이 음극과 양극의 두 전

극사이에 수nm~수백nm 두께로 형성되어지는 다수개의 유기화합물 박막 층들이 적층되는 구조로 이루어진다. 일반적으로 다양한 기능을 하는 각각의 유기화합물 박막 층들은 전자 주입층(electron injection layer, EIL), 전자

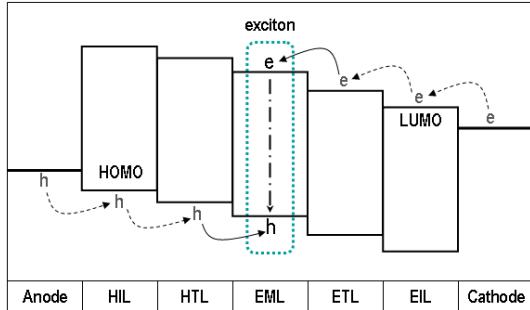
*교신저자 : 오태식(ots99@sunmoon.ac.kr)

접수일 09년 12월 20일

수정일 (1차 10년 02월 19일, 2차 10년 03월 16일)

게재확정일 10년 03월 18일

수송층(electron transport layer, ETL), 발광층(emitting layer, EML), 정공 수송층(hole transport layer, HTL), 그리고 정공 주입층(hole injection layer, HIL) 등으로 구성된다.



[그림 1] 다층 OLED 소자 구조의 개념도

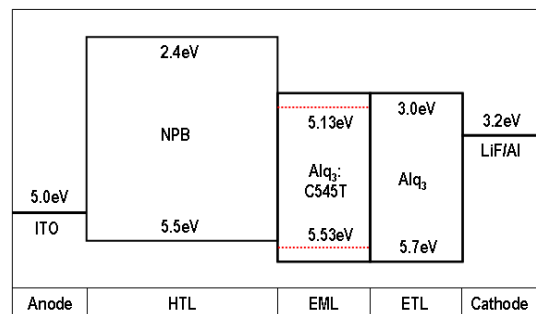
OLED 소자에서의 발광은 전하 주입형 전기 발광(charge injection type electroluminescence) 메커니즘에 의해 발생되어진다. 먼저 양극과 음극 사이에 순방향 전압을 인가하면 양극으로부터 인접한 유기물 층의 HOMO(highest occupied molecular orbital) 준위를 따라 정공이 주입되어지고, 음극으로부터는 LUMO(lowest unoccupied molecular orbital) 준위를 따라 전자가 주입되어진다. 주입된 전자와 정공은 인가되어지는 전기장 내에서 호핑(hopping)[1]에 의해 반대 극성의 전극을 향해서 발광층의 유기물 분자들 사이를 이동하게 된다. 이동하던 HOMO 준위의 정공과 LUMO 준위의 전자 사이에서의 쿨롱 상호작용(coulomb interaction)이 열적 에너지($K_B T$)보다 커지는 경우에 미결합 구속 상태의 전자-정공 쌍(electron-hole pair)으로 형성되어지는 분자 여기자인 엑시톤(exciton)이 만들어지게 된다. 이 엑시톤 중에서 불안정한 상태인 LUMO 준위에 있던 전자가 HOMO 준위로 전이하면서 그 사이의 에너지 밴드 갭(energy band gap, E_g)에 상당하는 에너지를 광으로 방출된다[1-2]. 여기서 에너지 밴드 갭이 약 3.0 eV 정도인 경우는 청색 발광을 방출하며 밴드 갭이 약 2.2 eV 정도이면 적색 발광을 방출하게 되고 그 중간 정도인 경우는 녹색 발광을 방출하게 되는 것이다.

OLED는 자발광형(emissive type) 소자이면서 넓은 시야각 특성을 갖고 있으며, 고속 응답특성과 친환경적인 저전력 소모 그리고 패널의 플렉시블(flexible)화가 가능하다는 매력적인 요인을 갖고 있기 때문에 차세대 디스플레이 소자로서 각광을 받아왔을 뿐만 아니라 최근에는 고효율의 실내용 조명(Lighting) 소자로서도 지대한 관심을 받고 있다. OLED 디스플레이 영역에서는 그동안

PM-OLED(passive matrix OLED) 소자가 주류를 이루어 왔지만 최근 수년전부터 풀-컬러(full-color)화된 AM-OLED(active matrix OLED)가 중소형 디스플레이 소자 영역 중의 일부인 모바일(mobile) 기기용으로 개발되어지면서 본격적인 상용화 시대가 전개되어지고 있다. 그러나 아직까지는 대형 디스플레이 기기나 조명 기기에서 요구되어지고 있는 OLED 소자의 발광효율(luminous efficiency) 특성과 수명(lifetime) 특성 그리고 대화면 제조기술 등이 확보되어 있지 않아 상용화가 지연되고 있는 실정이며, 구동전압의 변화와 시간의 경과에 따라서 안정된 구동특성을 나타내는 고효율, 고신뢰성의 OLED 소자 개발이 절실히 요구되어지고 있다.

고효율의 OLED 소자 개발을 위해서는 근본적으로 각 유기화합물 박막 층의 에너지 준위를 고려한 구조 개선과 새로운 유기 재료의 적용을 통해 구동전압을 낮춤으로서 발광효율을 높이고 수명을 증가시킬 수 있다. 그러나 현실적으로는 전자 주입을 촉진시키기 위해 발광층의 LUMO 준위와 음극 물질의 페르미 준위(fermi level) 사이의 전위 장벽을 낮출 수 있는 적절한 에너지 준위를 갖는 전자 주입층(EIL)을 적용하거나, 정공 주입을 촉진시키기 위하여 발광층의 HOMO 준위와 양극(ITO) 물질의 페르미 준위 사이의 전위 장벽을 낮출 수 있는 적절한 에너지 준위를 갖는 정공 주입층(HIL)을 추가적으로 적용하고 있다[3-5]. 또 다른 새로운 개선 방안으로는 OLED 소자의 저전압 구동화와 발광효율의 향상을 위해서 도펀트(dopant=guest)를 주재료(host)에 도핑하는 guest-host system이 가장 많이 검토되어지고 있는 방법 중의 하나이다[6-11].

본 논문에서는 상기의 guest-host system에서 도펀트 농도에 따른 전기광학적 특성을 수치 해석적으로 비교 분석해 보기 위해서 상용화되어 있는 녹색의 형광(green fluorescent) 물질인 C545T(10-(2-benzothiazolyl)-1,1,7,7-tetramethyl-2,3,6,7-tetrahydro-1H,5H,11H,[1]benzopyrano-[6,7,8-ij]quinolizin-11-one)를 적용 하였다.



[그림 2] 본 논문에 적용한 OLED 소자의 모델링 구조도

C545T는 에너지 밴드가 Alq₃(tris(8-hydroxy-quinolinolato)aluminium)의 에너지 밴드 내에서 트랩 준위를 형성하여 전자와 정공의 이동을 원활하게 할 수 있으므로 도펀트의 농도 변화에 의한 전기광학적인 특성을 규명하기에 적합한 도펀트이다.

그림 2는 ITO/NPB/Alq₃:C545T(%)/Alq₃/LiF/Al로 이루어지는 guest-host system 구조를 나타낸 것이다. 이 소자 구조의 발광층은 호스트(host) 물질로서 분자식이 C₂₇H₁₈AlN₃O₃이고 분자량이 459.43인 Alq₃를 10⁻⁶~10⁻⁷ torr 정도의 고진공 상태에서 열 증착(thermal evaporation) 시킨다. 이와 동시에 도펀트로서 분자식이 C₂₆H₂₆N₂O₂S이고 분자량이 430.56인 C545T를 열 증착시켜 형성시킨다. 이때 Alq₃와 C545T의 열 증착 속도를 각각 조정하여 발광 층의 박막 두께와 도펀트의 도핑 농도를 중량비(wt%)로 조절한다. 그러나 유기물은 그 재료 특성에 의하여 상기와 같은 증착 온도나 증착 속도 등의 제조 공정 조건에 따라서 전하 이동도와 같은 전기적인 특성요인이 쉽게 달라져 버린다[12-13]. 따라서 guest-host system의 소자 구조에서의 전기광학적인 특성은 매우 안정된 실험 공정이 아니면 재현성 있는 실험 결과를 얻기가 어렵다. 그래서 OLED 소자의 고효율화, 고신뢰성 확보를 위해서는 상기와 같은 제조 공정 조건에 영향을 받지 않는 수치 해석적인 방법에 의해서 OLED 소자 구조의 전기광학적인 특성을 확인하고 그 동작 메커니즘을 분석하여 정확히 이해하는 것이 매우 중요하다.

본 논문에서는 그림 2의 소자 구조를 적용시킨 다층 OLED 소자에서의 전기광학적인 특성 해석과 동작 메커니즘을 분석하고 검증하기 위하여 상용의 SimOLED Ver1.10.0.2를 사용하여 전산 시뮬레이션을 실시하였다. 특히 본 논문의 수치해석 결과의 정확성을 확인하기 위하여 C. C. Lee, et al.의 연구 결과[9]에 제시되어 있는 실험에 의한 전압-전류밀도 특성 데이터를 참고로 하여 시뮬레이션 인자들을 도출하였고, 동작 메커니즘을 검증하기 위해서 전압-휘도 특성과 소자 내부에서의 전계분포, 재결합율, 전자와 정공의 트랩 전하분포와 같은 전기광학적인 특성요인들을 분석하였다.

2. 전산 시뮬레이션 해석

전산 시뮬레이션을 이용하여 유기물 내에서의 전하 이동도(charge mobility)를 계산하기 위한 방법으로는 Poole-Frenkel 모델과 Gill 모델이 일반적으로 적용되어지고 있다.

Poole-Frenkel 모델은 전계효과만을 고려하는 것으로

전하의 이동도는 다음의 식 (1)과 같이 나타내어진다 [14-18].

$$\mu(F) = \mu_o \exp(\beta \sqrt{F}) \quad (1)$$

여기서 F 는 전계(electric field)이고 μ_o 는 무전계(zero electric field)에서의 전하 이동도(charge mobility)이며 β 는 재료 내에서 무질서와 관련된 특성 전계 상수이다. 한편 상기의 식 (1)은 전자와 정공의 이동도를 각각 구하기 위해서 다음과 같은 식(2)와 식(3)으로 표현되어져 수치 해석에 적용되어지고 있다.

$$\mu_e(F) = \mu_{eo} \exp\left(\sqrt{\frac{F}{F_{eo}}}\right) \quad (2)$$

$$\mu_h(F) = \mu_{ho} \exp\left(\sqrt{\frac{F}{F_{ho}}}\right) \quad (3)$$

W. G. Gill의 모델은 온도의 영향을 동시에 고려한 것으로 다음의 식 (4), (5)와 같이 나타내어진다[14].

$$\mu(T, F) = \mu_{o1} \exp\left[-\frac{E_o - \beta \sqrt{F}}{K_B T_{eff}}\right] \quad (4)$$

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

여기서 μ_{o1} , β , T_o 는 실험 데이터 곡선으로부터 구할 수 있는 상수들이고, E_o 는 무전계의 활성화 에너지(activation energy)이며 T 는 유기 박막 층의 온도이고 K_B 는 볼츠만 상수(Boltzmann's constant)를 나타낸다.

그러나 상기의 식 (4)와 같이 온도 인자를 고려하는 경우는 많은 실험을 통하여 각각의 유기물 재료에 대한 온도별 전하 이동도의 전계 의존성 그래프를 구하여 상기의 상수 인자들을 도출[14,18]해 내어야만 하는 어려움이 있다. 본 논문에서는 이미 선행의 참고문헌들에서 time of flight 방식[15, 19-23]이나 transient electroluminescence 방식[23-28]을 이용하여 측정한 NPB와 Alq₃의 유기물 박막 층에 대한 전하 이동도 특성 그래프로부터 상기의 Poole-Frenkel 관계식에서 필요로 하는 전자와 정공에 대한 μ_{eo} , μ_{ho} 와 F_{eo} , F_{ho} 를 각각 구하여 활용하였다. 이 상수들을 초기 데이터로 적용하여 참고문헌 [9]에 제시되어 있는 실험에 의한 전압-전류밀도 특성곡선과 일치하

도록 최적화 시뮬레이션하여 전자 및 정공의 이동도와 특성 전계 상수를 도출하였다. 본 논문의 전산 시뮬레이션 해석에 적용한 유기물 박막 층에서의 전하 이동도와 그 각각의 특성 전계 상수를 표 1에 나타내었다.

여기에서 이동도와 특성 전계 상수의 단위는 각각 cm^2/Vs 와 $[\text{V}/\text{cm}]$ 이다. 표 1에서 보는 바와 같이 Alq_3 의 경우는 C545T의 도핑 농도에 따라서 전하 이동도와 그 각각의 특성 전계 상수가 달라졌으며 도핑 농도가 증가할수록 전하의 이동도가 늦어지는 것을 알 수 있다.

[표 1] NPB와 Alq_3 의 전하 이동도와 특성 전계 상수

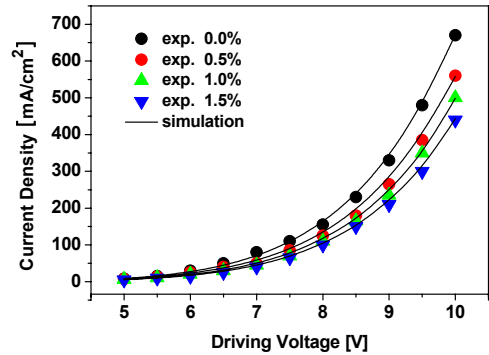
| 구분 | electron | | hole | | |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| | μ_{eo} | F_{eo} | μ_{ho} | F_{ho} | |
| NPB | 7.0×10^{-7} | 4.4×10^{-3} | 7.0×10^{-5} | 4.4×10^{-3} | |
| Alq_3 | 0% | 8.5×10^{-8} | 7.9×10^{-3} | 8.5×10^{-10} | 7.9×10^{-3} |
| | 0.5% | 7.5×10^{-8} | 7.5×10^{-3} | 7.5×10^{-10} | 7.5×10^{-3} |
| | 1.0% | 7.2×10^{-8} | 7.5×10^{-3} | 7.2×10^{-10} | 7.5×10^{-3} |
| | 1.5% | 6.6×10^{-8} | 7.4×10^{-3} | 6.6×10^{-10} | 7.4×10^{-3} |

3. 수치해석 결과 및 고찰

그림 2의 구조에서 도펀트인 C545T의 중량비를 호스트(host) 물질인 Alq_3 에 대비하여 0, 0.5, 1.0, 그리고 1.5%로 각각 도핑시킨 4종류의 소자 구조에 대해 전기적인 특성 변화를 조사하였다. 이 소자 구조들은 다음과 같이 구성되었으며 각각을 Device-A, B, C, D로 명명한다.

- (1) Device-A: ITO/NPB(65nm)/ Alq_3 (60nm)/LiF/Al,
- (2) Device-B: ITO/NPB(65nm)/ Alq_3 :C545T(0.5%)(30nm)/ Alq_3 (30nm)/LiF/Al,
- (3) Device-C: ITO/NPB(65nm)/ Alq_3 :C545T(1.0%)(30nm)/ Alq_3 (30nm)/LiF/Al,
- (4) Device-D: ITO/NPB(65nm)/ Alq_3 :C545T(1.5%)(30nm)/ Alq_3 (30nm)/LiF/Al.

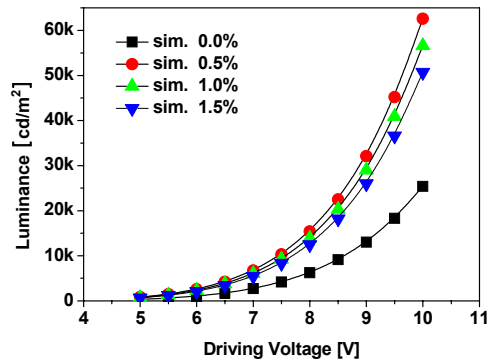
본 논문의 시뮬레이션 해석결과와 정확성을 검증하기 위하여 선행 논문[9]에 제시되어 있는 OLED 소자의 기본 특성인 전압-전류 실험 데이터와 비교해 본 결과 그림 3에 나타난 바와 같이 일치하였다.



[그림 3] 도핑 농도에 의한 전압-전류밀도 특성 비교

그림 3의 전압-전류밀도 특성곡선에서 보는 바와 같이 C545T의 도핑 농도가 높아질수록 동일 구동전압 조건에서 전류가 감소되어 완만하게 증가하는 특성곡선으로 나타났다. 기존의 OLED 소자 구조에서는 일반적으로 전압-전류 곡선의 경향과 유사하게 전압-휘도 특성이 결정되기 때문에 소자에서의 전류 감소는 휘도 특성의 저하를 야기 시키므로 바람직한 소자구조 설계 방법은 아니었다. 그러나 본 논문의 수치 해석에 적용한 도펀트가 도핑되어진 guest-host system에서는 동일한 구동전압에서 전류 특성은 감소하지만 휘도특성은 향상되어져 고효율의 OLED 소자 구현이 가능하게 된다.

이를 확인하기 위하여 전압-휘도특성의 시뮬레이션 수치 해석 결과를 그림 4에 나타내었다. 이는 도핑 유무에 따라 휘도 특성이 크게 변화되었다는 것과 도핑된 소자의 경우는 그림 3의 전압-전류밀도 특성과 동일한 경향성을 나타내며 도핑량이 증가할수록 휘도특성이 저하되어



[그림 4] 도핑 농도에 의한 전압-휘도 특성 비교

진다는 것을 알 수 있다. 따라서 C545T가 도핑된 소자의 경우가 도핑되지 않은 경우보다 동일한 구동전압에서 전류는 감소하지만 오히려 휘도가 증가하여 발광효율이 향상되어지게 된다.

다음의 표 2는 구동전압이 8V인 경우의 전류, 휘도 그리고 발광효율의 시뮬레이션 수치 해석 결과를 나타낸 것이다. 표 2에서 보는 바와 같이 Device-A의 경우는 발광효율이 3.88 cd/A 정도에 불과하지만 도핑된 Device-B, C, D의 경우는 11.8 cd/A 정도로 대폭 향상되어져 약 3배 정도로 증가되어짐을 알 수 있다.

[표 2] 구동전압 8V에서의 전류밀도-휘도 특성과 발광 효율

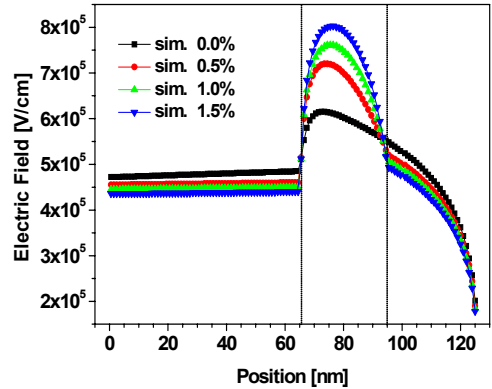
| 구분 | 전류 [mA/cm ²] | 휘도[cd/m ²] | | 발광효율 [cd/A] | |
|----------|--------------------------|------------------------|-------|-------------|-------|
| | | SH | SG | | |
| 8V | Device-A | 160.8 | 6235 | 0 | 3.88 |
| | | | 6235 | | |
| | Device-B | 132.1 | 1348 | 14027 | 11.64 |
| | | | 15376 | | |
| Device-C | 117.6 | 1160 | 12700 | 11.78 | |
| | | 13860 | | | |
| Device-D | 104.7 | 989 | 11462 | 11.89 | |
| | | 12451 | | | |

여기서 SH와 SG는 단일항 호스트(singlet host)와 단일항 게스트(singlet guest)에 의한 휘도를 각각 나타낸 것이고 발광효율을 나타내는 전류효율은 다음과 같은 식 (6)으로 구할 수 있다.

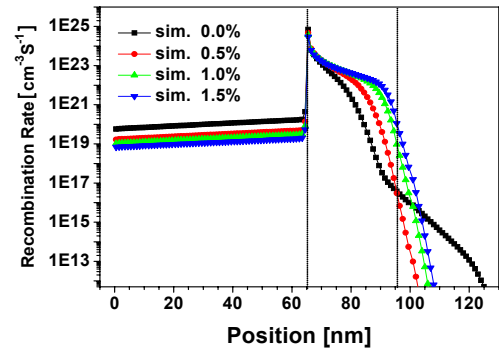
$$current\ efficiency\ [cd/A] = \frac{luminance\ [cd/m^2]}{current\ [A/m^2]} \quad (6)$$

다음으로 guest-host system이 적용된 소자 내부에서의 전계분포, 전하 분포, 재결합율과 같은 전기적인 요인들을 수치 해석하여 그 동작 메커니즘에 대해서 분석하였다.

먼저 그림 5는 소자 내에서의 전계분포를 나타낸 것으로 C545T 도핑 여부에 따라 분포곡선이 변화됨을 알 수 있다. 도핑하지 않은 Device -A의 경우는 각각 30nm 두께인 EML과 ETL의 경계면에 해당하는 95nm지점에서 전계분포곡선은 완만하게 연결되지만 도핑량이 많아질수록 그 경계면에서의 변화가 점차 크게 나타났다.



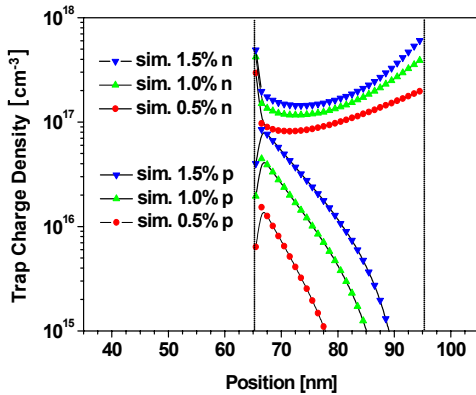
[그림 5] 구동전압 8V일 때 OLED 소자 내에서의 전계 분포



[그림 6] 구동전압 8V일 때 OLED 소자 내에서의 재결합율 분포

그림 6은 소자 내에서의 전하들의 재결합율 특성을 나타낸 것이다. 정공 수송층인 NPB층과 발광층 (Alq₃:C545T(%)층)의 경계면인 65nm지점에서 부터 발광층으로 형성되는 재결합 영역이 Device-A의 경우는 좁게 형성되고 도핑량이 많아질수록 점차 넓어짐을 알 수 있다. 기존의 일반적인 OLED 소자들의 경우에서는 이처럼 재결합 영역이 넓어질수록 휘도와 발광효율은 증가되어 지지만 본 논문의 guest-host system에서는 0.5% 까지는 증가하다가 1.0% 이상에서 거의 포화되어지는 현상을 나타냈다. 이러한 현상들이 발생하는 주요 원인은 농도 소광(concentration quenching) 현상으로 설명되어질 수 있다. 농도 소광 현상은 도핑 농도가 어느 정도 증가하면 에너지 전달은 잘 일어나지만 더 높은 농도에서는 발광효율이 감소하는 현상이다. 이 현상을 분석하기 위해서 그림 7에 도핑 농도에 따라서 트랩(trap)되는 전자와 정공

의 전하밀도 분포를 시뮬레이션 해석하여 나타내었다.



[그림 7] 구동전압 8V일 때 OLED 소자 내에서의 트랩 전하 밀도 분포

그림 7에서 보는 바와 같이 C545T의 도핑 농도가 0.1% 정도로 낮은 경우는 트랩 되는 전자와 정공의 밀도가 낮기 때문에 NPB의 HOMO 준위에서 Alq₃의 HOMO 준위를 통해 C545T로 전이되어지므로 에너지 전달이 잘 일어나게 되어 표 2에 나타난 바와 같이 일중항 게스트 (singlet guest)에 의해 휘도가 증가하여 발광효율이 대폭 향상되어진다. 그러나 도핑 농도가 0.5%에서 1.5%로 점차 높아질수록 그림 7에서 보는 바와 같이 트랩 되는 정공의 밀도가 급격히 증가되어진다. 이와 같이 트랩 되는 전자와 정공의 밀도가 증가되어지면 전하간의 농도 소광 현상에 의하여 표 2에 나타난 일중항 게스트에 의한 휘도가 점차 감소됨으로써 발광효율이 계속적으로 크게 증가되지 않고 포화되는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 Alq₃ 발광층에 녹색 형광 도펀트인 C545T를 도핑한 ITO/NPB/Alq₃:C545T(%)/Alq₃/LiF/Al 구조의 다층 OLED 소자에 있어서 C545T의 도핑 농도를 변화시킨 4종류의 소자 구조에 대해 전기광학적인 특성 변화를 검토하였다. 전산 시뮬레이션으로 수치 해석하여 guest-host system에서 나타나는 기본적인 전압(V)-전류 밀도(J)-휘도(L)특성을 구해본 결과, C545T 도펀트의 도핑 농도가 높아질수록 전압-전류밀도 특성은 감소하여 완만하게 증가하는 특성곡선을 나타내었고, 전압-휘도 특성은 도펀트를 도핑한 소자 구조에서 급격히 증가되어 발광효율이 약 3배 정도 향상되어졌다. 또한 C545T 도펀

트의 농도를 점차적으로 증가시켜도 휘도와 발광효율이 계속적으로 향상되지 않는 동작 메커니즘은 발광층 내에서 트랩 되는 전자와 정공의 전하밀도가 C545T 도펀트의 농도 증가에 따라 높아짐으로서 야기되어지는 농도 소광 현상에 의한 것임을 확인하였다. 본 논문의 검토 방법과 결과는 제조공정에서 발생할 수 있는 여러 가지 변화 요인들을 예측하거나 배제할 수 있을 뿐만 아니라 단시간에 다양한 설계 요인들에 대해서 해석이 가능한 과학적인 방법이므로 고효율의 OLED 소자구조를 설계하는 데에 있어서 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] M. Pope and C. E. Swenberg, "Single positive or negative carriers in organic crystals," *Electronic Processes in Organic Crystals and Polymers*. New York: Oxford Univ. Press, 1982 & 1999.
- [2] Y. Cao, I. D. Parker, G. Yu, C. Zhang, and A. J. Heeger, "Improved quantum efficiency for electroluminescence in semiconducting polymers," *Nature*, vol. 397, pp. 414, 1999.
- [3] Y. Ohmori, A. Fuji, M. Uchida, C. Morishima, and K. Yoshino, "Observation of spectral narrowing and emission energy shift in organic electroluminescent diode utilizing 8-hydroxy-quinoline aluminum/aromatic diamine multi-layer structure," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, pp. 1871, 1993.
- [4] S. A. Van Slyke, C. H. Chen, and C. W. Wang, "Organic electroluminescent devices with improved stability," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 69, pp. 2160, 1996.
- [5] 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, "Molecular-scale interface engineering for polymer light-emitting diodes," *Nature*, Vol. 404, No. 6777, pp. 481 2000.
- [6] C. W. Tang, et al., "Electroluminescence of doped organic thin films," *J. Appl. Phys.*, vol. 65 issue. 9, pp. 3610, 1989.
- [7] T. Mori, K. Obata, and T. Mizutani, "Electroluminescence of organic light emitting diodes with alternately deposited dye-doped aluminium quinoline and diamine derivative," *J. Phys. D—Appl. Phys.*, vol. 32(11), pp. 1198, 1999.
- [8] F. Guo, D. Ma, L. Wang, X. Jing and F. Wang, "High efficiency white organic light-emitting devices by effectively controlling exciton recombination

- region," *Semicond. Sci. Technol.* vol. 20 pp. 310, 2005.
- [9] C. C. Lee, Y.-D. Jong, P.-T. Huang, Y. C. Chen, P.-J. Hu and Y. Chang, "Numerical Simulation of Electrical Model for Organic Light-Emitting Devices with Fluorescent Dopant in the Emitting Layer," *Japanese J. Appl. Phys.*, Vol. 44, No. 11, pp. 8147, 2005.
- [10] Y. Luo, H. Aziz, Z. D. Popovic, and G. Xu, "Electric-field-induced fluorescence quenching in dye-doped tris(8-hydroxyquinoline)aluminum layers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 89, pp. 103505, 2006.
- [11] Z. Chen and D. Ma, "Effect of doped dye on the charge-carrier transport and electro-luminescent performance in molecularly doped polymer light-emitting diodes," *Journal of Luminescence*, vol. 122-123, pp. 633, 2007.
- [12] B. J. Chen, W. Y. Lai, Z. Q. Gao, C. S. Lee, W. A. Gambling and S. T. Lee, "Electron drift mobility and electroluminescent efficiency of tris(8-hydroxyquinolinolato)aluminum," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 75, pp. 4010, 1999.
- [13] C. B. Lee, A. Uddin, X. Hu, and T. G. Andersson, "Study of Alq₃ thermal evaporation rate effects on the OLED," *Materials science & engineering B*, vol. 112, pp. 14, 2004.
- [14] W. D. Gill, "Drift mobilities in amorphous charge transfer complexes of trinitrofluorenone and poly-n-vinylcarbazole," *J. Appl. Phys.*, vol. 43(12), 1972.
- [15] R. G. Kepler, P. M. Beeson, S. J. Jacobs, R. A. Anderson, M. B. Sinclair, V. S. Valencia and P. A. Cahill, "Electron and hole mobility in tris(8-hydroxyquinolinolato-N1,O8)aluminum," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 66(26), pp. 3618, 1995.
- [16] B. Chen and S. Liu, "Measurement of electron/hole mobility in organic/polymeric thin films using modified time-of-flight apparatus," *Synthetic Metals*, vol. 91, pp. 169, 1997
- [17] D. J. Pinner, R. H. Friend and N. Tessler, "Transient electroluminescence of polymer light emitting diodes using electrical pulses," *J. Appl. Phys.*, vol. 86(9), pp. 5116, 1999.
- [18] P. W. M. Blom and M. C. J. M. Vissenberg, "Charge transport in poly(p-phenylene vinylene) light emitting diode," *Materials Science and Engineering*, vol. 27(3-4), pp. 53, 2000.
- [19] G. Pfister, "Hopping transport in a molecularly doped organic polymer," *Phys. Rev. B*, vol. 16, Issue 8, pp. 3676, 1977.
- [20] R. L. Martin, J. D. Kress, I. H. Campbell and D. L. Smith, "Molecular and solid-state properties of tris(8-hydroxyquinolate)aluminum," *Phys. Rev. B*, vol. 61(23), pp. 15804, 2000.
- [21] S. Naka, H. Okada, H. Onnagawa, Y. Yamaguchi and T. Tsutsui, "Carrier transport properties of organic materials for EL device operation," *Synthetic Metals*, vol. 111-112 pp. 331, 2000.
- [22] G. G. Malliaras, Y. Shen, D. H. Dunlop, H. Murata and Z. H. Kafafi, "Nondispersive electron transport in Alq₃," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79(16), pp. 2582, 2001.
- [23] S. C. Tse, H. H. Fong, and S. K. So, "Electron transit time and reliable mobility measurements from thick film hydroxyquinoline-based organic light-emitting diode," *J. Appl. Phys.*, vol. 94(3), pp. 2033, 2003.
- [24] C. Hosokawa, H. Tokailin, H. Higashi, and T. Kusumoto, "Transient behavior of organic thin film electroluminescence," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 60(10), pp. 1220, 1992.
- [25] J. Kalinowski, N. Camaioni, P. D. Marco, V. Fattori, and A. Martelli, "Kinetics of charge carrier recombination in organic light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 72(5), pp. 513, 1998.
- [26] S. Barth, P. Muller, H. Riel, P. F. Seidler, W. Rie β , H. Vestweber and H. Bassler, "Electron mobility in tris(8-hydroxy-quinoline) aluminum thin films determined via transient electro-luminescence from single and multilayer organic light emitting diodes," *J. Appl. Phys.*, vol. 89 (7), pp. 3711, 2001.
- [27] D. Ma, G. Wang, Y. Hu, Y. Zhang, L. Wang, X. Jing, F. Wang, C. S. Lee, and S. T. Lee, "A dinuclear aluminum 8-hydroxyquinoline complex with high electron mobility for organic light emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 82(8), pp. 1296, 2003.
- [28] J. Chen and D. Ma, "Effect of dye concentration on the charge carrier transport in molecularly doped organic light emitting diodes," *J. Appl. Phys.*, vol. 95(10), pp. 5778, 2004.

오 태 식(Tae-Sik Oh)

[정회원]



- 1985년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 (공학사)
- 1990년 8월 : 경희대학교 산업정보대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 성균관대학교 나노과학공학과 (공학박사)
- 1984년 12월 ~ 2003년 7월 : 삼성 SDI 중앙연구소 수석연구원
- 2003년 7월 ~ 2006년 2월 : 삼성종합기술원 디스플레이 Lab 전문연구원
- 2006년 3월 ~ 2009년 2월 : 선문대학교 공과대학 전자공학부 부교수
- 2009년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 공과대학 정보디스플레이학과 부교수

<관심분야>

디스플레이 소자 구조 해석 및 설계 기술, 디스플레이 특성 평가 기술, 전자렌즈 설계 및 전자빔 응용기술

이 영 구(Young-Gu Lee)

[정회원]



- 1996년 2월 : 아주대학교 물리학과 (이학사)
- 1998년 2월 : 아주대학교 일반대학원 물리학과 (이학석사)
- 2009년 2월 : 아주대학교 영상표시학과 (공학박사)
- 2001년 12월 ~ 2003년 11월 : 기초과학연구소 연구원
- 2003년 11월 ~ 2005년 6월 : 네스디스플레이 전임연구원
- 2005년 6월 ~ 2009년 9월 : 삼성종합기술원 디스플레이 Lab 전문연구원
- 2009년 10월 ~ 현재 : 철원플라즈마 산업기술연구원 책임연구원

<관심분야>

유기발광소자 공정 및 특성평가, 플라즈마 나노소재 공정 기술, 광 설계 및 분석 기술