

ITO/PEDOT:PSS/TPD/Alq₃/LiAl 구조의 유기 발광 소자에서 전도 메카니즘

Conduction mechanism in organic light-emitting diode in ITO/PEDOT:PSS/TPD/Alq₃/LiAl structure

정동회*, 김상길*, 정택균**, 오현석*, 이원재***, 홍진웅*, 이준웅****, 김태완*****
(Dong-Hoe Chung*, Sang-Keol Kim*, Taek-Gyun Chung**, Hyun-Seok Oh*, Won-Jae Lee***, Jin-Woong Hong*, Joon-Ung Lee****, Tae-Wan Kim*****)

Abstract

We have studied the temperature dependence of current-voltage and luminance-voltage characteristics of Organic Light Emitting Diodes(OLEDs). The OLEDs are based on the molecular compounds, N,N'-diphenyl-N,N'-bis(3-methylphenyl)-1,1'-biphenyl-4,4'-diamine (TPD) as a hole transport, tris(8-hydroxyquinolinolone) aluminum(III) (Alq₃) as an electron transport, and poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) as a buffer layer. The current-voltage and luminance-voltage characteristics were measured in the temperature range of 10[K] and 300[K]. A conduction mechanism in OLEDs has been interpreted in terms of space-charge-limited current(SCLC) and tunneling mechanism.

Key Words : organic light-emitting diodes, current-voltage characteristics, tunneling, space-charge-limited current, luminance

1. 서 론

1987년에 Tang과 VanSlyke가 유기 발광 소자를 구현한 이후, 유기 발광 소자는 디스플레이 장치의 응용 가능성 때문에 많은 흥미를 유발시키고 있다. 특히 Tang 이후 높은 효율과 견고한 내구성을 지닌 발광 소자를 얻고자 많은 분야에서 연구가 진행되어 왔다[1]. 유기 발광 소자는 위성 방송과 HDTV 그리고 3차원 영상 처리 기술의 발달로 디스플레이 소자로서 각광을 받을 것으로 예상되고 있다.

유기 발광 소자에서의 전기 전도 메카니즘의 해석은 고전계 영역에서의 전압-전류 특성이 전극에서 유기물 층으로 주입되는 정공과 전자의 터널링으로 해석하고, 저전계 영역에서는 공간 전하 영향

으로 해석하여 왔다. 본 논문에서는 유기 발광 소자의 전기 전도 메카니즘을 해석하고자 10K에서 300K까지의 온도 변화에 대하여 전압-전류 특성을 분석하였고 보왔고 온도 변화에 따른 전압-휘도를 측정하였다.

2. 실험

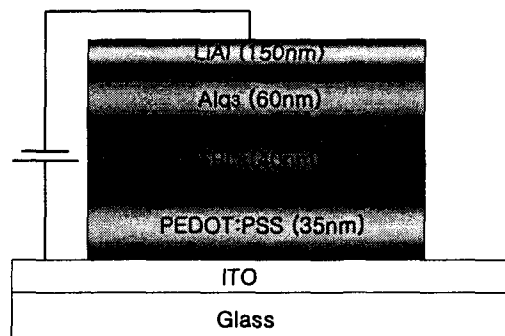


그림 1. 유기 발광 소자의 구조.

Fig. 1. Device structure of organic light-emitting diodes.

* : 광운대학교 전기공학과
서울특별시 노원구 월계동 447-1
E-mail : donghoe1004@hanmir.com
** : (주) Vistorm 연구원
*** : 경원전문대학 전자과
**** : 한국전기전자재료학회 명예회장
***** : 홍익대학교 물리학과

그림 1은 본 실험에 사용한 소자의 구조이다. 양극(Anode) 전극으로 사용한 인듐-주석-산화물 (Indium-Tin-Oxide : ITO) 기판은 삼성 코닝사의 제품으로, 표면 저항이 $15\Omega/\square$ 이고 두께가 170nm이다. ITO는 염산과 질산을 3:1의 부피 비로 혼합한 증기를 사용하여 약 10~20분 정도 patterning 하였다. 정공 주입 및 정공 전달 층으로 사용되는 PEDOT:PSS는 6000rpm에서 1분간 스핀 코팅하여 35nm로 하였고, 정공 수송층인 TPD와 전자 수송 및 발광층인 Alq₃는 10^{-6} torr 진공도에서 각각 40nm와 60nm로 열증착하였다. 또한 음극(Cathode)인 LiAl은 150nm의 두께로 열증착하였다. 발광 면적은 ITO와 LiAl의 폭을 조절하여 15 mm²의 크기로 만들었다.

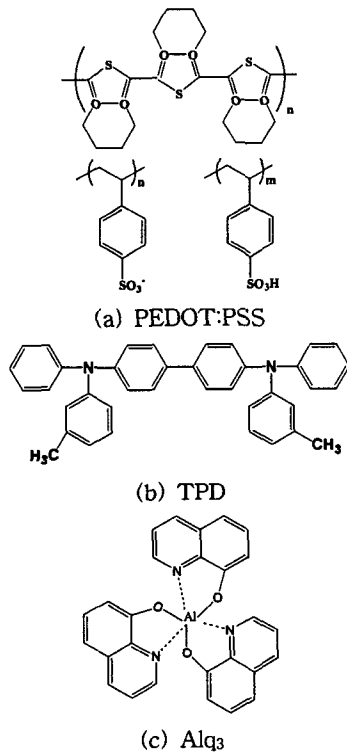


그림 2. 유기물의 분자 구조.
Fig. 2. Molecular structure of (a) PEDOT:PSS (b) TPD and (c) Alq₃.

본 논문에서는 정공의 주입과 수송을 쉽게 하기 위하여 정공 전달 물질로 알려진 PEDOT:PSS와 TPD를 이용하였고 전자 주입과 전자 전달 및 발광 물질로 Alq₃를 사용하였다. 그림2는 실험에서 사용한 유기물의 분자 구조를 나타내고 있다.

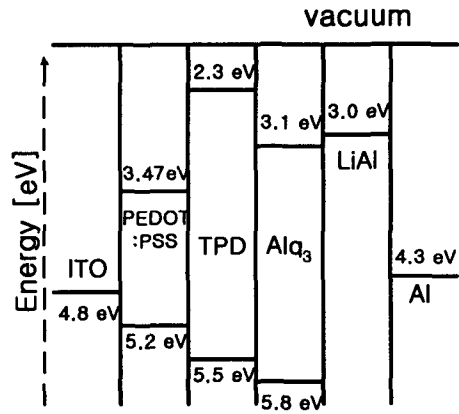


그림 3. 소자의 에너지 준위.
Fig. 3. Energy level diagram of device.

그림 3은 본 실험에 사용된 유기 발광 소자의 에너지 준위를 나타내고 있다. 진공 준위에서 HOMO(Highest Occupied Molecular Orbital)와 LUMO(Lowest Unoccupied Molecular Orbital)까지가 각각 이온화 준위, 전자 친화도이다. 이것을 측정함으로써 물질의 에너지 준위를 얻을 수 있다. 그림 3의 에너지 준위에서 ITO/TPD/Alq₃/Al 구조의 에너지 차이를 알아보면 ITO에서 TPD로 정공을 주입하기 위한 에너지 장벽은 0.7eV이고, 전자 주입을 위한 Al과 Alq₃의 에너지 장벽은 1.2eV이다. 반면에 그림 1에서처럼 ITO/PEDOT:PSS/TPD/Alq₃/LiAl을 사용한 구조에서는 ITO와 PEDOT:PSS 사이의 에너지 장벽은 0.4eV이고, LiAl과 Alq₃ 사이의 에너지 장벽은 0.1eV로써 낮출 수 있다. 그림 1과 같은 구조에서 양극(Anode)과 유기물층, 그리고 음극(Cathode)과 유기물층의 에너지 준위를 낮춤으로써 동작 전압을 낮출 수 있다. 결론에서 알 수 있듯이 300K에서 1[cd/m²] 이상의 휘도를 발산하기 시작하는 전압을 EL 전류가 흐르기 시작하는 동작 전압으로 기준을 삼으면 ITO/TPD/Alq₃/Al 구조에서는 7.6[V]인 반면에, 그림 1의 구조에서는 3.2[V]로 낮아짐을 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

유기물층 내의 전도 메커니즘은 옴(Ohm) 영역, 공간 전하 제한 전류(SCLC) 영역 그리고 터널링 영역으로 구분할 수 있다.

유기물층 내부에 전하 트랩이 없을 때, 공간 전

하 제한 전류(SCLC)의 전류 밀도는 식 (1)과 같고 트랩이 유기물 층 내부에 존재한다고 가정하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다[3,4,5].

$$j = \frac{9}{8} \epsilon \mu \frac{V^2}{d^3} \quad (1)$$

$$j = \frac{9}{8} \epsilon \theta \mu \frac{V^2}{d^3} \quad (2)$$

여기서, ϵ 은 유기물의 유전율, d 는 박막 두께, μ 는 전하 운반자의 이동도, V 는 인가 전압, θ 는

$$\theta = \frac{n}{n+n_t} \quad \text{또는} \quad \theta = \frac{p}{p+p_t} \quad (3)$$

이다.

비결정형 물질은 single discrete 에너지 준위로 설명되지 못한다. 이 경우, 트랩 밀도는 다음 식과 같이 금지대 폭 내의 에너지 E 에서 지수 함수 분포 형태로 나타난다.

$$h(E) = \frac{N_t}{E_c} \exp\left(-\frac{E}{E_c}\right) \quad (4)$$

여기서, N_t 는 트랩 중심 밀도이고 E_c 는 특성 에너지이다. 이 경우, 전류 밀도 $j(V)$ 는 다음과 같다.

$$j \propto \frac{V^{m+1}}{d^{2m+1}} \quad (5)$$

여기서, $m \equiv \frac{T_c}{T}$; $E_c \equiv kT_c$ (k 는 볼츠만 상수이고 T 는 절대온도)이다.

이와 같이 온도에 따라 $j(V)$ 를 측정하면, $m(T)$ 곡선을 그릴 수 있고 이로부터 E_c 값을 결정할 수 있다:

$$E_c = kT_c = k \frac{\partial m}{\partial T^{-1}} \quad (6)$$

유기 발광 소자에서의 전기 전도 기구를 이해하기 위하여 온도에 따른 전압-전류를 측정함으로써 알 수 있다. 그림 4는 ITO/PEDOT:PSS/TPD/Alq₃/LiAl 구조에서 10K~300K까지의 온도 변화에 따른 전압-전류 특성을 보여주고 있다.

그림 4에서 A 영역은 식 (1)과 (2)로 표현되는 공간 전하 제한 전류(SCLC)가 존재하는 영역으로 dark 전류가 지배적이다. 이 범위는 저전압에서 나타나게 된다. Kusano 등이 터널링을 연구하기 이전에는 주로, 공간 전하 제한 전류(SCLC)로 운반자에 대한 연구를 하였다[3].

그림 4에서 B 영역은 식 (5)에서 $m \geq 6$ 로 표현

되는 영역으로 발광 현상을 일으키는 EL 전류가 흐르게 되며 터널링 전도 현상이 일어난다.

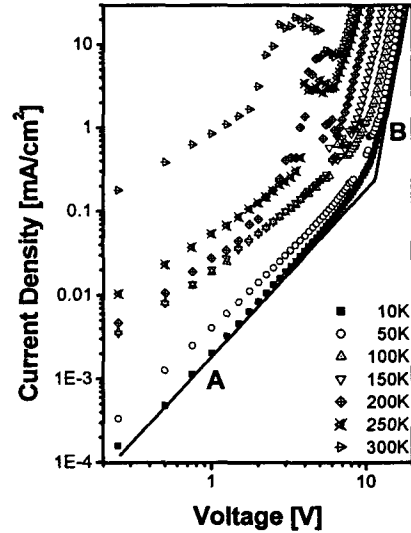


그림 4. ITO/PEDOT:PSS/TPD/Alq₃/LiAl 구조에서 온도 변화에 따른 전압-전류 특성.

Fig. 4. Temperature-dependent current-voltage characteristics in ITO / PEDOT : PSS / TPD / Alq₃ / LiAl structure

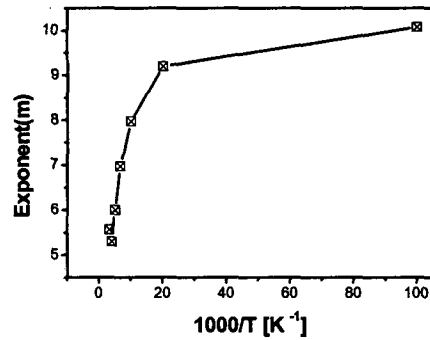


그림 5. 온도 변화에 따른 지수 m .

Fig. 5. Exponent m with temperature variation.

그림 5은 각각의 온도에서 지수 m 값을 구하여 보았다. 우리는 트랩 분포에 의한 공간 전하 제한 전류 모형이 예상되는 바와 같이 높은 온도에서 지수 m 은 절대온도 T 의 역함수에 비례함을 알 수 있었다.

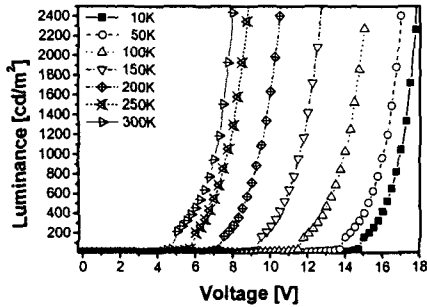


그림 6. ITO/PEDOT:PSS/TPD/Alq₃/LiAl 구조의 전압-휘도 특성.

Fig. 6. Voltage-luminance characteristics in ITO/PEDOT:PSS/TPD/Alq₃/LiAl structure

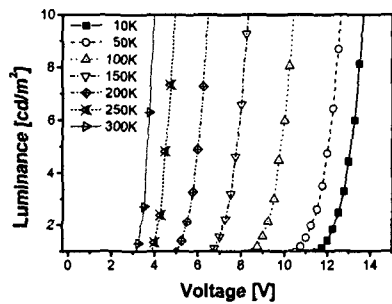


그림 7. 저휘도에서 ITO/PEDOT:PSS/TPD /Alq₃/LiAl 구조의 전압-휘도 특성.

Fig. 7. Voltage-luminance characteristics at low luminance in ITO/PEDOT : PSS / TPD / Alq₃ / LiAl structure.

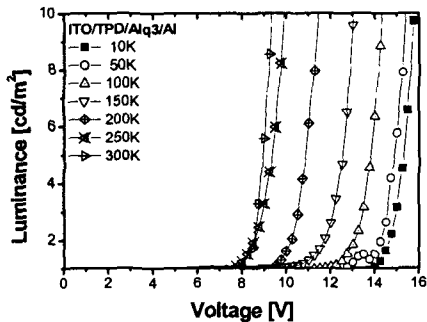


그림 8. 저휘도에서 ITO/TPD/Alq₃/Al 소자의 전압-휘도 특성.

Fig. 8. Voltage-luminance characteristics in ITO/TPD/Alq₃/Al at low luminance.

그림 6은 그림1에 나타낸 ITO/PEDOT:PSS/TPD/Alq₃/LiAl 구조 소자의 온도 변화에 따른 휘도를 측정된 결과이다. 온도가 증가함에 따라서 동작 전압이 감소하는 반도체의 전형적인 특성을 나타내고 있다. 또한 소자의 온도가 극저온 상태라고 할지라도 발광에 필요한 전류만 흐르면, 온도에 관계없이 발광 현상을 일으키는 실험을 통하여 알 수 있다.

그림 7은 본 실험에서 연구한 그림 1의 구조에서 저휘도에 대한 전압-휘도 특성이고, 그림 8은 ITO/TPD/Alq₃/Al 구조의 저휘도에 대한 휘도 특성이다. 1[cd/m²]을 기준으로 1[cd/m²] 이하에서 흐르는 전류를 dark 전류로 분류하고, 1[cd/m²] 이상에서 흐르는 전류를 EL 전류로 분류한다. 300K에서 그림 7과 그림 8을 비교하여 보았다. 그림 7에서 ITO/PEDOT:PSS/TPD/Alq₃/LiAl 구조의 EL 전류의 동작 전압은 3.2[V]이다. 반면에 ITO/TPD/Alq₃/Al 구조를 갖는 소자의 EL 전류의 동작 전압은 7.6[V]임을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 정공 주입층으로 PEDOT:PSS와 음극으로 LiAl을 사용한 구조에서 동작 전압이 대단히 감소함을 알 수 있다.

4. 결론

우리는 ITO/PEDOT:PSS/TPD/Alq₃/LiAl 소자 구조를 이용하여 온도에 따른 전압-전류 특성과 전압-휘도 특성을 알아보고, 유기 전기 발광 소자의 전기 전도 기구를 살펴보았다. dark 전류가 흐르는 저전계 영역에서는 Ohmic 영역과 SCLC 영역이 지배적이고, 발광 현상이 일어나는 고전계 영역에서는 터널링 전류가 지배적임을 알았다. 또한 HOMO와 LUMO의 각각의 에너지 준위를 낮춤으로써 동작 전압에 상당히 낮아짐을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] C. W. Tang, S.A. VanSlyke, Appl. Phys. Lett. 51, 913 (1987).
- [2] 베스 (BES) [<http://www.smenergy.co.kr>]
- [3] 정동희, 김상걸, 정택균, 김태완, 이준웅, "유기 발광 소자에서의 전기 전도 기구", 한국전기전자재료학회, 제15권, 1호, p.7~12, 2001.
- [4] M. A. Lampert, Phys. Rev. 103. 1648 (1956).
- [5] Ma Dongge and I.A. Hummelgen, J. Appl. Phys., Vol. 86, No. 6, 3181 (1999).