

버퍼층과 음전극에 따른 유기 발광 소자의 전기적 특성과 발광 효율

Electrical Properties and Luminous Efficiency in Organic Light-Emitting Diodes Depending on Buffer Layer and Cathodes

정동회*, 김상걸**, 홍진웅*, 이준웅**, 김태완***

(Dong-Hoe Chung*, Sang-Keol Kim**, Jin-Woong Hong*, Joon-Ung Lee**, and Tae-Wan Kim***)

Abstract

We have studied electrical properties and luminous efficiency of organic light-emitting diodes(OLEDs) with different buffer layer and cathodes in a temperature range of 10 K and 300 K. Four different device structures were made. 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-hydroxyquinolato) aluminum(III) (Alq₃) as an electron transport and emissive layer, and poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) as a buffer layer. And LiAl was used as a cathode. Among the devices, the ITO/PEDOT:PSS/TPD/Alq₃/LiAl structure has a low energy-barrier height for charge injection and show a good luminous efficiency. We have got a highly efficient and low-voltage operating device using the conductive PEDOT:PSS and low work-function LiAl. From current-voltage characteristics with temperature variation, conduction mechanisms are explained SCLC (space charge limited current) and tunneling one. We have also studied energy barrier height and luminous efficiency at various temperature.

Key Words : organic light-emitting diodes, Current-voltage-luminance characteristics, Tunneling, Space-charge-limited current, luminance, Energy barrier height

1. 서론

유기 발광 소자는 1987년에 Tang과 VanSlyke가 발광 소자를 구현한 이후, 디스플레이 등의 응용 가능성 때문에 많은 흥미를 유발시키고 있다 [1]. Tang 이후 높은 효율과 견고한 내구성을 지

닌 발광 소자를 얻고자 많은 분야에서 연구가 진행되고 있다. 효율적인 유기 발광 소자를 개발하기 위하여 전기적으로 중요한 요소인 전하 주입, 수송 및 발광 메커니즘을 통하여 발광 제어를 위한 전도 기구 이해의 중요성이 증대되고 있다. 유기 발광 소자는 다섯 단계인 정공 주입층, 정공 수송층, 전자 주입층, 전자 수송층, 그리고 발광층으로 구분할 수 있다[2,3]. 정공 주입층에는 양극(anode)으로부터 정공이 주입되고 정공 수송층은 주입된 정공을 발광층까지 효율적으로 운반한다. 전자 주입층은 음극으로부터 전자가 주입되고 전자 수송층은 주입된 전자를 발광층까지 운반한다. 발광층에서는 정공과 전자의 재결합이 일어나면서 빛을 발

* : 광운대학교 전기공학과
(서울특별시 노원구 월계동 447-1)
Fax: 02-978-4327

Corresponding Author : donghoe3go@hanmail.net)

** : 한국전기전자재료학회

*** : 홍익대학교 물리학과

2002년 12월 30일 접수, 2003년 2월 6일 1차 심사완료,
2003년 2월 25일 최종 심사완료

산하게 된다. 대표적인 정공 수송 역할을 하는 물질로는 TPD, HTM₂, TTB, NPB 등이 있으며, 전자 수송 물질로는 Alq₃, PBD, BeBq₂ 등이 있다[4,5].

I. D. Parker 등은 ITO와 유기물 계면에서의 정공 주입 에너지 장벽과, 유기물과 음전극 계면에서의 전자 주입 에너지 장벽을 알아보았다. 정공 주입 에너지 장벽과 전자 주입 에너지 장벽의 크기에 따라서 다수 운반자와 소수 운반자가 결정되고, 이에 따라서 소자의 전압-전류 특성과 효율에 미치는 영향을 보고하였다[6,7]. 유기 발광 소자에서의 주된 전기 전도 메커니즘에 대한 해석은 전계에 따라서 두 종류로 분류할 수 있다. 저전계 영역에서는 공간 전하 제한 전류 영향으로 해석할 수 있고, 고전계 영역에서는 전극에서 유기물 층으로 주입되는 정공과 전자의 터널링 모형과 유기물 내부의 호핑 모형으로 해석할 수 있다[8,9].

본 연구에서는 정공 주입층의 에너지 장벽을 변화시키기 위하여 PEDOT:PSS를 이용하였고, 전자 주입층의 에너지 장벽을 변화시키기 위하여 음전극으로 Al과 LiAl을 사용하여 각각 4 종류의 소자를 제작하였다. 각각의 소자에 대하여 10 K에서 300 K까지의 온도 변화에 따른 전압-전류 특성과 전압-휘도 특성을 측정하여 유기 발광 소자의 전기 전도 메커니즘과 발광 효율을 분석하였다.

2. 실험

본 연구에서는 소자를 이중 구조와 다층 구조로 제작하여 상호 비교 분석하였다. 일반적으로 다층 구조는 quenching 현상을 감소시키고, 전하 운반자 수의 평형을 증가시켜 정공과 전자의 재결합 가능성을 증가시킨다[10,11]. 또한 다층 구조에서는 발광층, 수송층, 그리고 주입층을 각각 분리하여 효율을 증가시킬 수 있다. 본 실험에서는 정공의 주입과 수송을 쉽게 하기 위하여 PEDOT:PSS와 TPD를 이용하였고 전자의 주입 에너지 준위가 서로 다른 Al과 LiAl을 사용하여 음전극의 영향을 알아보았다. 그림 1은 실험에서 사용한 PEDOT:PSS, TPD 그리고 Alq₃의 분자 구조이다.

그림 2는 본 실험에서 사용한 소자의 구조를 나타내고 있다. 소자의 종류는 다음과 같은 4 종류로 제작하였으며, 각각의 소자 구조에서 온도 변화에 따른 전도 메커니즘과 발광 효율을 비교 분석하였다.

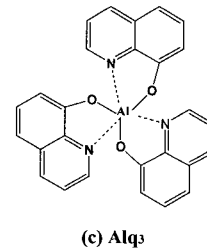
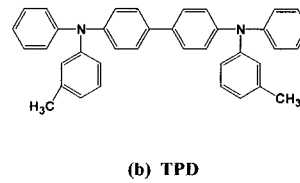
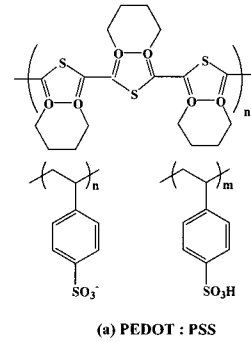


그림 1. 본 연구에서 사용한 유기물의 분자 구조.
Fig. 1. Molecular structures of organic materials.

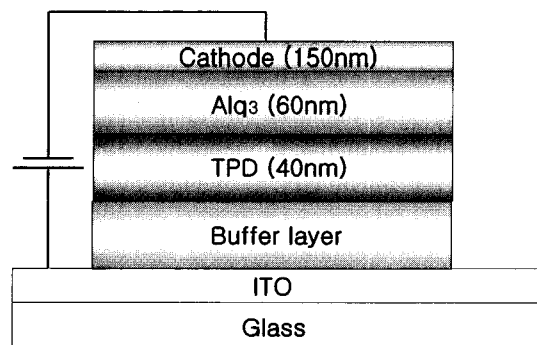


그림 2. 실험에 사용한 유기 발광 소자의 구조.
Fig. 2. Typical device structure of OLEDs.

- ① A-type: ITO/TPD/Alq₃/Al
- ② B-type: ITO/PEDOT:PSS/TPD/Alq₃/Al
- ③ C-type: ITO/TPD/Alq₃/LiAl
- ④ D-type: ITO/PEDOT:PSS/TPD/Alq₃/LiAl

양극의 인듐-주석-산화물(Indium-Tin-Oxide : ITO) 기판은 삼성 코닝사에서 제조하였으며, 표면 저항이 $15\Omega/\square$ 이고 두께가 170 nm이다. ITO 기판의 patterning은 염산과 질산을 각각 3:1의 부피 비로 혼합한 증기를 이용하였다. PEDOT:PSS는 headway research 사의 photo-resist spinner를 이용하여 6000 rpm에서 1분간 스핀 코팅하였으며, 이때, 두께가 약 35 nm이다. TPD와 Alq₃는 5×10^{-6} torr의 진공에서 ITO 위에 열 증착시켰으며, 두께는 각각 40 nm와 60 nm이다. 음전극으로 사용한 Al과 LiAl도 5×10^{-6} torr의 진공에서 각각 150 nm의 두께로 열 증착하였다. 발광 면적은 ITO와 음전극의 너비를 조절하여 15 mm²의 크기로 제작하였다.

유기 발광 소자의 온도 변화는 CTI-CRYOGENICS를 이용하였고, 전압-전류-휘도 특성은 Keithley 236 source-measure unit, 617 electrometer 그리고 Si-photodiode를 이용하여 진공하에서 측정하였다. 그리고 자외선/가시광선 흡광도(UV/visible absorption)와 전기 발광(EL) 특성은 HP 8452A와 Spectrophotometer와 Perkin Elmer LS 50B(Xenon flash tube)를 이용하여 측정하였다.

이온화 에너지와 전자 친화도를 이용하여 효율적인 유기 발광 소자를 제작할 수 있다. 그림 3은 본 연구에서 사용한 물질의 에너지 준위를 나타내고 있다. 진공 준위에서 HOMO(Highest Occupied Molecular Orbital)와 LUMO(Lowest Unoccupied Molecular Orbital)까지의 에너지가 이온화 에너지와 전자 친화도이다. 이온화 에너지와 전자 친화도의 측정 방법은 분광학적인 방법과 전기 화학적인 방법이 있으나 여기서는 전기 화학적인 방법을 사용하여 측정한 값이다. A-type의 기본 소자 구조를 그림 3의 에너지 준위로 파악해 보면 전자를 주입하기 위한 음전극 Al과 발광층 Alq₃ 사이의 전자 에너지 장벽(ϕ_e)이 1.2 eV이고, 정공을 주입하기 위한 양극 ITO와 TPD 사이의 정공 에너지 장벽(ϕ_h)이 0.7 eV임을 알 수 있다. 그러나, 음전극을 Al 대신에 LiAl을 사용함으로써 전자 주입을 위한 에너지 장벽을 1.2 eV에서 -0.1 eV로 낮출

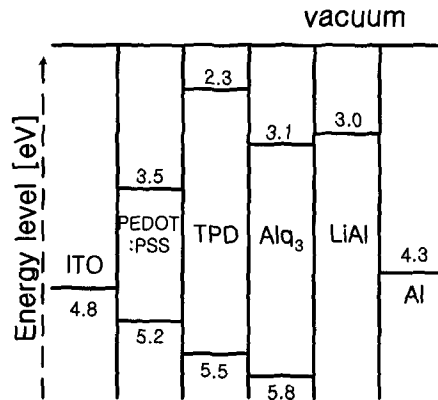


그림 3. 본 연구에 사용한 물질들의 에너지 준위.
Fig. 3. Energy-level diagram of materials used in this work.

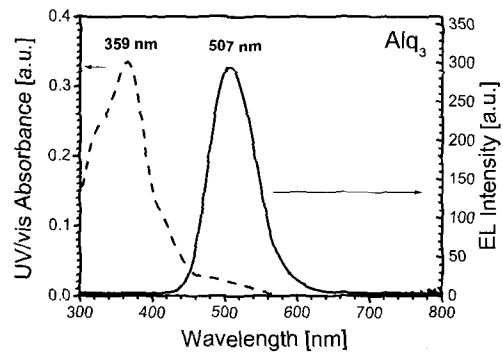


그림 4. Alq₃의 UV/visible 흡광도와 전기 발광(EL) 스펙트럼.
Fig. 4. UV/visible absorption and Electroluminescence(EL) spectrum of Alq₃.

수 있고, 양극 ITO와 TPD 사이에 버퍼층으로 PEDOT:PSS를 삽입함으로써 정공 주입을 위한 에너지 준위를 0.7 eV에서 0.4 eV로 낮추어 전자와 정공의 주입을 원활히 할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 Alq₃의 UV/visible 흡광도와 전기 발광(EL) 스펙트럼이다. Alq₃의 UV/visible 흡광 스펙트럼의 λ_{peak} 는 359 nm이며, EL 스펙트럼의

λ_{peak} 는 507 nm이다.

유기 발광 소자에 사용되는 유기물 층 내부에 전하 트랩이 없을 때, 공간 전하 제한 전류(SCLC)에 의한 전류 밀도는 다음과 같다[12-14].

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

여기서, ϵ 은 유기물의 유전율, d 는 박막 두께, μ 는 전하 운반자의 이동도, 그리고 V 는 인가 전압이다.

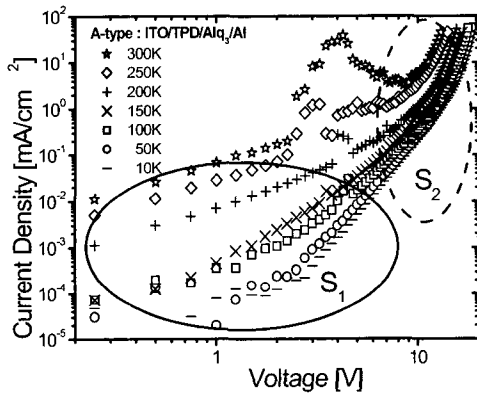
만일 유기물 층에 불연속 트랩이 존재하면 식 (1)을 다음과 같이 변형할 수 있다.

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

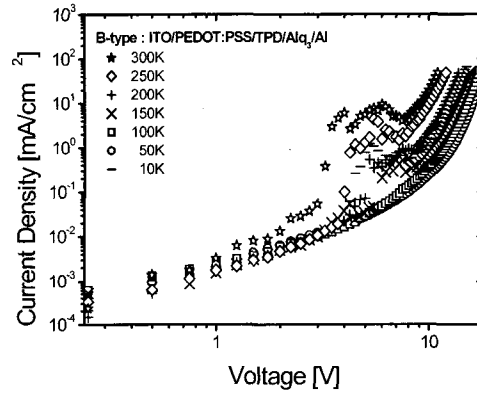
여기서

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

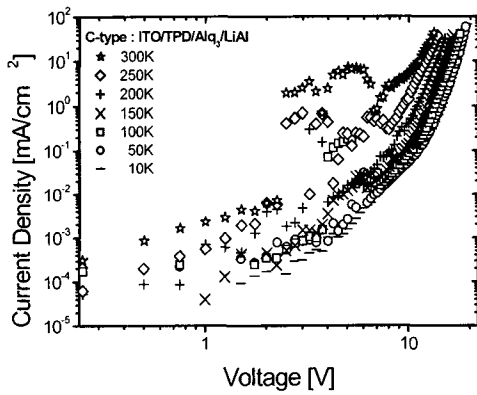
으로 나타내며, n 은 자유 전자의 밀도, n_t 는 트랩 전자의 밀도, p 는 자유 정공의 밀도, 그리고 p_t 는 트랩 정공의 밀도이다[14]. Kusano 등이 터널링을 연구하기 이전에는 주로 공간 전하 제한 전류



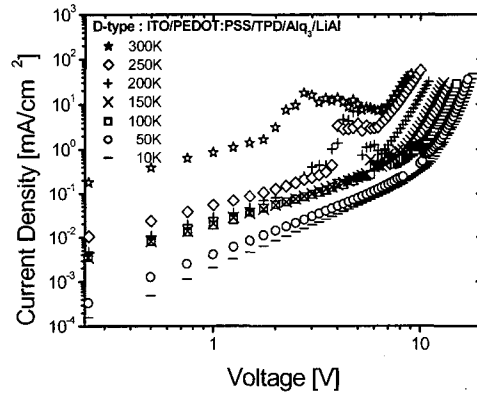
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 5. 4 종류의 서로 다른 소자 구조에서 온도 변화에 따른 전압-전류 특성.

Fig. 5. Temperature-dependent current-voltage characteristics for 4 different device structures.

(SCLC)로 운반자에 대한 연구를 하였다[12].

비결정형 물질은 불연속 에너지 준위로 설명되지 못한다. 트랩의 에너지가 분포되어 있으면 전계가 증가함에 따라 트랩이 점진적으로 채워지게 된다. 즉 θ 가 전계에 의존하게 되어, 트랩이 모두 채워질 때까지 전류밀도 J 는 V^2 보다 더 빠르게 증가한다. 일반적인 트랩 에너지 분포에 의한 $J(V)$ 관계는 매우 복잡하지만 다음과 같이 지수 함수 분포 형태의 경우는 $J(V)$ 관계를 이론적으로 구할 수 있다.

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

여기서, N_t 는 트랩 중심 밀도, E_t 는 특성화 에너지, E_c 는 전도대 에너지이다. 이 경우, 인가 전압에 따른 전류 밀도 $J(V)$ 는 다음과 같다[12].

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

여기서, $m = \frac{T_t}{T}$ 이고 $E_t = kT_t$ (k 는 볼츠만 상수이고 T 는 절대온도)이다.

식 (1), (2) 및 (5)를 이용하면 전하 운반자의 거동을 설명할 수 있다. Ma Dongge 등은 식 (1), (2) 그리고 (5)에 기초한 에너지 띠 모형을 이용하여 운반자의 전압-전류 특성을 설명하였다[12].

유기 발광 소자에서의 전기 전도 메커니즘을 이해하기 위하여 온도 변화에 따른 전압-전류 특성을 분석하였다. 그림 5는 4 종류의 소자에 대하여 10 K에서 300 K까지 온도를 변화시켜가면서 측정 한 전압-전류 특성 곡선이다. 반도체는 온도가 증가하면 저항이 감소하여 전류가 증가한다. 그림 5에서 보는 바와 같이 각각의 소자에 대하여 온도가 증가함에 따라서 전류가 증가함을 알 수 있다. 이로부터 유기 발광 소자에 사용된 유기물이 반도체의 일반적인 저항 특성을 나타냄을 알 수 있다.

그림 5의 4 종류의 소자에 대하여 전압-전류 특성을 분석하면 크게 저전계 영역과 고전계 영역으로 분류할 수 있다. 그림 5(a)의 A-type 소자 구조에서 전압-전류 특성 곡선을 저전계 영역인 S_1 영역과 고전계 영역인 S_2 영역으로 분류하였다. 그림 5(b)~(d)의 소자에서도 저전계 영역과 고전계 영역으로 분류할 수 있음을 그래프의 기울기를 통해

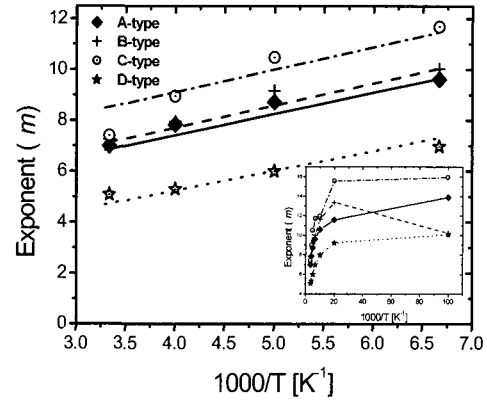


그림 6. 온도 변화에 따른 지수 m .

Fig. 6. Exponent m with temperature variation.

여 알 수 있다. 각 소자의 S_1 에 해당하는 저전계 영역에서 전압-전류 특성 곡선은 식 (1) 또는 (2)로 표현되는 공간 전하 제한 전류(SCLC) 영역을 나타내고 있다. 이 영역은 실제로 발광 현상을 일으키지는 않으며 dark 전류가 흐르는 영역이다 [13].

그림 5(a)의 S_2 영역에서처럼 나머지 소자에 대하여도 고전계 영역은 발광 현상을 일으키며 EL 전류가 흐르는 영역이다. 고전계 영역은 식 (5)에서 $m \geq 5$ 인 영역이며, 양극과 유기물 또는 음극과 유기물 사이의 터널링 전도 메커니즘과 유기물 내의 호핑 전도 메커니즘으로 설명할 수 있다.

온도 변화에 따른 전압-전류 특성으로부터 식 (5)에 주어진 지수 m 과 T 와의 관계를 얻을 수 있고 이로부터 E_t 값을 결정할 수 있다.

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

그림 6은 150 K에서 300 K까지의 범위에서 식 (5)와 (6)에서의 지수 m 값을 나타낸 것이다. 트랩 분포에 의한 공간 전하 모형에서 예상할 수 있는 것처럼, 지수 m 은 절대 온도 T 에 반비례함을 알 수 있다. 그림 6의 내부에 있는 삽입도는 10 K에서 300 K까지의 넓은 온도 범위에서 지수 m 값을 나타내고 있으며, 150 K 부근에서부터 300 K 부근까지 지수 m 이 온도의 역함수에 비례함으로 호핑 모델로 설명이 가능하고 150 K 이하의 온도에서는 정비례 관계가 성립하지 않고, 온도에 거의 무관함

으로 호핑 모델보다는 터널링 모델로 설명이 가능하다. 식 (6)을 이용하여 각각의 소자 구조에서 얻은 특성화 온도와 특성화 에너지를 분석하여 표 1에 나타내었다. 표 1에서 보는 바와 같이 특성화 에너지는 대략 0.1 eV 임을 알 수 있다.

표 1. 4 종류의 서로 다른 소자에 대한 특성화 온도와 특성화 에너지.

Table 1. Characteristic temperature and characteristic energy for 4 different device structures.

구분	A-type	B-type	C-type	D-type
특성화 온도 T_t [K]	1397 ± 124	1155 ± 34	1239 ± 230	1044 ± 130
특성화 에너지 E_t [eV]	0.12	0.10	0.11	0.09

고전계 영역에서 정공 또는 전자의 터널링에 관하여 Fowler-Nordheim 터널링 이론을 정리하면 다음과 같다[3].

$$J = AE^2 \exp\left(\frac{-K}{E}\right) \quad (7)$$

$$\ln\left(\frac{J}{E^2}\right) = \ln A + \left(\frac{-K}{E}\right) \quad (8)$$

여기서 J 는 전류 밀도, E 는 전계의 세기, K 는 장벽의 모양에 의존하는 변수이다. 식 (8)에서 $\ln(J/E^2)$ vs $1/E$ 의 그래프가 음(-)의 기울기를 가지면 터널링 영역으로 분류한다.

그림 7은 A-type의 기본 구조 소자에 대하여 10 K에서 300 K까지의 온도 범위에서 유기 발광 소자의 전압-전류 관계를 Fowler-Nordheim 플롯으로 나타낸 것이다.

만약 전자나 정공이 유기물 계면에서 삼각형 장벽을 통과하여 터널링한다고 가정하면, 식 (7)과 (8)에서의 상수 K 는 다음과 같이 주어진다.

$$K = C(\varphi_0 - D\sqrt{E}) \quad (9)$$

$$C = \frac{8\pi\sqrt{2m^*}}{3qh} \quad (10)$$

$$D = q\sqrt{\frac{a}{4\pi\epsilon}} \quad (11)$$

여기서, φ_0 는 전계가 0일 때 에너지 장벽의 높이,

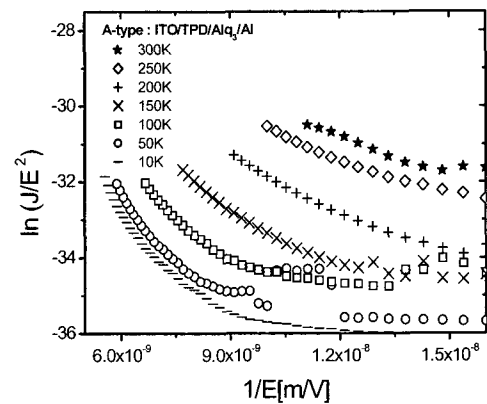


그림 7. ITO/TPD/Alq₃/Al 구조에서 얻은 전압-전류 특성의 Fowler-Nordheim 플롯.

Fig. 7. Fowler-Nordheim plot of current-voltage characteristics for ITO/TPD/Alq₃/Al structure

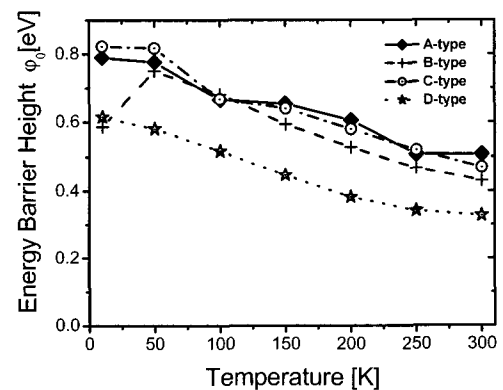


그림 8. 온도의 변화에 따른 에너지 장벽.

Fig. 8. Energy barrier height with temperature variation.

q 는 전하량, h 는 플랑크 상수, 그리고 m^* 는 유기물 층에서의 정공 또는 전자의 유효 질량, ϵ 은 유기물의 유전율이다. 이러한 관계식으로부터 정공 또는 전자의 터널링에 대한 유효 에너지 장벽의 높이를 얻는다.

고전계 영역에서 터널링에 의한 급격한 전류가 있음을 알 수 있다. 각 소자의 고전계 영역에서 에너지 장벽 ϕ_0 를 계산하여 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 A-type의 경우 10 K에서 에너지 장벽의 높이가 0.79 eV로 측정되었고 300 K에서 0.51 eV로 측정되었다. A-type의 경우와 비교하여 B-type과 C-type도 거의 같은 결과가 측정되었다. 그러나 정공 주입 비퍼층으로 PEDOT:PSS를 삽입하고 전자 주입을 위한 에너지 장벽을 낮추기 위

하여 Al 대신 LiAl을 사용한 D-type의 에너지 장벽 높이는 10 K에서 0.62 eV이고 300 K에서 0.32 eV로 측정되었다. 따라서 D-type의 경우가 전자와 정공의 주입이 쉽게되어 동작 전압이 낮아지고 발광 효율이 높아지게 된다. 한편 그림 3의 에너지 준위 다이어그램에서 A-type의 정공 에너지 장벽이 가장 높고 D-type의 경우가 가장 작음을 예측할 수 있다.

그림 9는 4 종류의 소자에 대하여 10 K에서 300 K까지 온도 변화에 따른 전압-휘도 특성을 나타내고 있다. 저온에서보다 상온에서 동작 전압이 대단히 낮음을 알 수 있는데 이는 실험에 사용한 유기물이 반도체의 일반적인 특성을 갖고 있으며, 온도가 상승함에 따라서 저항이 감소하여 전류

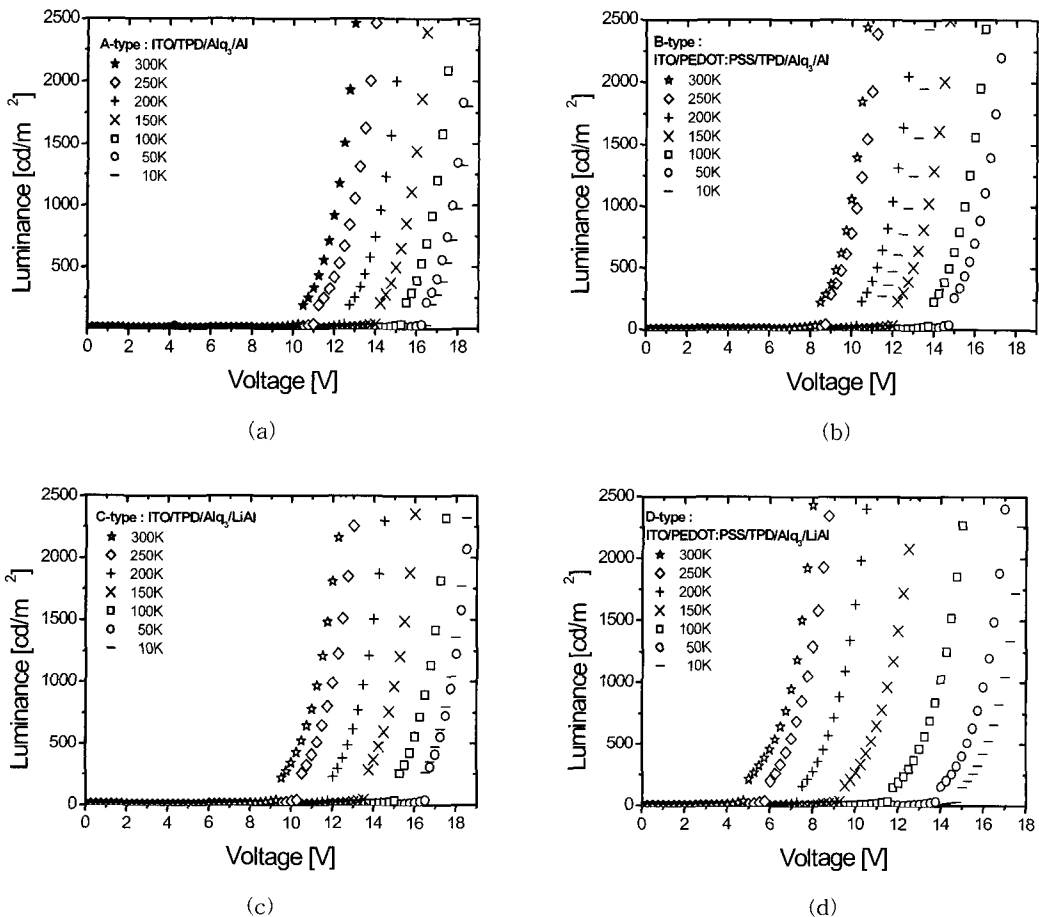


그림 9. 서로 다른 소자 구조의 온도 변화에 따른 전압-휘도 특성 곡선.

Fig. 9. Temperature-dependent voltage-luminance characteristics for several device structures.

가 증가하기 때문이다. 따라서 저온보다 상온에서 동작 전압이 낮아지게 된다. 또한 발광에 필요한 충분한 전류가 흐르도록 전압을 인가하면 모든 온도에서 고휘도 발광을 한다는 것을 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 또한 A-type의 경우보다 다른 형태의 구조에서 동작 전압이 매우 낮아짐을 알 수 있다. 이는 정공과 전자 주입을 위한 에너지 장벽 높이가 A-type보다 다른 형태의 구조에서 낮아졌기 때문이다.

그림 10은 300 cd/m²에서 온도 변화에 따른 발광 효율을 나타내고 있다. 발광 효율은 $\eta = \pi L / JV$ [lm/W] 로 주어지며, 여기서 L 은 발광면에서 수직하게 나오는 빛의 휘도 [cd/m²], J 는 전류 밀도 [A/m²], 그리고 V 는 전압 [V]을 각각 의미한다.

A-type 소자에서의 경우, 그림 3의 에너지 띠 모형을 이용하여 전도 메카니즘을 살펴보면, ITO에서 TPD의 HOMO 준위로 정공을 주입하기 위한 에너지 장벽 높이는 0.7 eV이고 Al에서 Alq₃의 LUMO 준위로 전자를 주입하기 위한 에너지 장벽은 1.2 eV이다. A-type과 비교하여, B-type의 소자는 정공 주입을 위한 에너지 장벽 높이는 버퍼층을 사용하여 0.4 eV로 낮아지고 전자 주입을 위한 에너지 장벽 높이는 1.2 eV로 같다. C-type의 소자는 정공 주입을 위한 에너지 장벽은 같으나, 전자 주입을 위한 에너지 장벽이 -0.1 eV로 낮아지게 된다. 버퍼층과 LiAl 음전극을 사용한 D-type 소자는 정공과 전자 주입을 위한 에너지 장벽 높이를 각각 0.4 eV와 -0.1 eV로 낮춤으로써 발광 효율이 높고 동작 전압이 낮다. 그 동안 주로 연구한 A-type 소자는 상대적으로 발광 효율이 낮고 동작 전압은 높은 편이다.

300 cd/m²를 기준으로 발광 효율을 분석하여 본 결과 모든 소자가 250 K에서 최대 발광 효율을 나타낸다는 것을 알 수 있었다. 최대 발광 효율이 250 K에서 나타나는 것은 다층 구조에서 유기물들 간에 온도 변화에 따른 저항률의 변화가 서로 다르기 때문이다. 한편 300 K에서 A-type 소자와 비교하여 버퍼층인 PEDOT:PSS를 삽입한 B-type 소자는 약 25 %, Al 대신에 LiAl의 음전극을 사용한 C-type 소자는 96 %, 그리고 버퍼층을 삽입하고 LiAl을 사용한 구조인 D-type (ITO/PEDOT:PSS/TPD/Alq₃/LiAl)소자에서는 114 %의 발광 효율이 향상됨을 알 수 있었다. 정공 주입과 전자 주

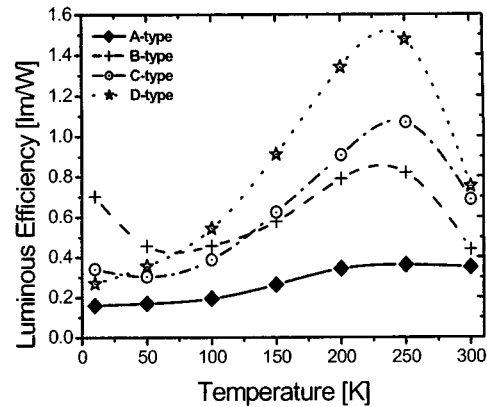


그림 10. 300 cd/m²에서 온도 변화에 따른 발광 효율.

Fig. 10. Luminous efficiency with temperature variation at 300 cd/m².

입을 원활히 하기 위하여 각각 PEDOT:PSS와 LiAl을 사용함으로써 동작 전압을 낮추고 발광 효율을 향상시키는 결과를 알 수 있었다.

4. 결 론

ITO/TPD/Alq₃/Al 소자를 기본 구조로 하였으며, 정공과 전자 주입을 위한 에너지 장벽을 낮추기 위하여 정공 주입 버퍼층으로써 PEDOT:PSS를 사용하고 음전극 물질로 Al 대신에 LiAl을 사용하였다. 이러한 서로 다른 4 종류의 소자 구조에 대하여 전압-전류와 전압-휘도를 온도 변화에 따라서 측정하여 보았다. 고전계 영역에서 트랩 분포에 의한 터널링 모형과 호핑 모형에서 예상되는 바와 같이 지수 m 이 150 K에서부터 300 K까지 온도 T 의 역함수에 비례함을 알았고, 150 K에서 10 K까지는 온도 T 의 역함수에 비례관계가 성립하지 않음을 알 수 있었다[13]. 이로부터 전기 전도 메카니즘을 호핑 모형과 터널링 모형으로 설명하였다. 또한 4 종류의 서로 다른 구조에서 정공과 전자의 주입 에너지 장벽과 발광 효율을 구할 수 있었다. 본 연구에서 에너지 장벽 높이가 가장 낮고 발광 효율이 가장 좋은 소자의 구조는 ITO/PEDOT:PSS/TPD/Alq₃/LiAl 구조임을 알 수 있었다. 따라서 음전극으로 LiAl를 사용하고 PEDOT:PSS를 버퍼층으로 사용함으로써 발광 효율은 높이고 동작

전압은 낮추는 결과를 얻을 수 있었다. 한편 발광 효율이 250 K에서 최대가 되는 이유에 대하여는 각 유기물의 온도에 따른 저항 변화를 통하여 계속 연구 중에 있다.

감사의 글

이 논문은 2002년 산업자원부 지원 과제(고효율 고분자 EL 재료의 개발)에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

[1] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, "Organic electroluminescent diodes", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 51, p. 913, 1987.

[2] Ananth Dodabalapur, "Organic light emitting diodes", *Solid State Communications* Vol. 102, p. 259, 1997.

[3] 정동희, 김상걸, 정택균, 김태완, 이준웅, "유기 발광 소자에서의 전기 전도 기구", *전기전자재료학회지*, Vol. 15, No. 1, p. 7, 2001.

[4] 하창식, 임현택, 정혜인, 조원제, "유기 전기발광 소자의 구조 및 특성", *전기전자재료학회지*, Vol. 12, No. 6, p. 18, 1999.

[5] 신재혁, 신성호, 박정일, "투명전도성 ITO 박막의 현황과 과제", *전기전자재료학회지*, Vol. 12, No. 7, p. 40, 1999.

[6] I. D. Parker, "Carrier tunneling and device characteristics in polymer light-emitting diodes", *J. Appl. Phys.*, Vol. 75, No. 3, p. 1658, 1994.

[7] Wolfgang Brütting, Stefan Berleb, and Anton G. Muckl, "Device physics of organic light-emitting diodes based on molecular materials", *Organic Electronics*, Vol. 2, p. 1, 2001.

[8] D. H. Chung, S. K. Kim, T. G. Chung, H. S. Oh, W. J. Lee, J. W. Hong, J. U. Lee, and T. W. Kim, "Conduction mechanism in organic light-emitting diodes in ITO/PEDOT:PSS /TPD/Alq₃/LiAl structure" *Proceeding of the KIEEME Annual Summer Conference 2002*, Vol. 3, No. 1, p. 198, 2002.

[9] S. K. Kim, D. H. Chung, T. G. Chung, H.

S. Lee, K. U. Jang, M. G. Choi, J. W. Hong, J. U. Lee, and T. W. Kim, "Efficiency improvement of OLEDs with a variation of cathodes", *Proc. 2002 Summer Conf. KIEEME*, Vol. 3, No. 2, p. 1038, 2002.

[10] 김상걸, 홍진웅, 김태완, "버퍼층으로 사용한 PVK의 농도 변화에 따른 유기 발광 소자의 전압-전류-휘도 특성", *J. of Korean Oil Chemists' Soc.*, Vol. 19, No. 1, p. 68, 2002.

[11] Yakovlev, Yu. O, and Zolin, V.F, "Principles of material selection for thin-film organic light-emitting diodes", *Synth. Met.*, Vol. 91, p. 205, 1997.

[12] Ma Dongge and I. A. Hummelgen, "Charge carrier mobility in electroluminescent alternating block copolymers", *J. Appl. Phys.*, Vol. 86, No. 6, p. 3181, 1999.

[13] Shinji Kawakami, Masahiko Kitagawa, and Hiroyuki Kusano, "Dependence of electroluminescent properties on cathode metals in PVCz double-layered organic EL devices", *Thin Solid Films*, Vol. 363, p. 17, 2000.

[14] J. Laubender, L. Chkoda, M. Sokolowski, and E. Umbach, "The influence of oxygen and air on the characteristics of organic light-emitting devices studied by in vacuo measurements", *Synthetic Metals* 111-112, p. 373, 2000.

[15] Sang-Keol Kim, "Efficiency Improvement and Electrical Properties of Organic Light-Emitting Diodes", *Ph. D. Thesis*, p. 128, 2002.