

유기발광소자(OLED)의 전압-전류 특성에 대한 연구

이정호*, 채규수*, 김민년*

*천안대학교 정보통신학부

E-mail : *phile@cheonan.ac.kr*

A Study on the I-V characteristics of a Organic Light-Emitting Diode

Jung-Ho Lee*, Kyu-Su Chae*, Min-Nyun Kim*

*Division of Information & Communication University,
Cheonan, Korea

요 약

전자빔을 이용하던 CRT(Cathode Ray Tube) 모니터에서 픽셀단위의 LCD(Liquid Crystal Display) 디스플레이 사용으로 휴대용 정보처리 장치들은 급속한 발전을 이루게 되었다. 기존의 CRT 모니터에서 전자 빔을 사용하던 방식에서 픽셀(Pixel) 단위의 후면발광 디스플레이를 만들면서 CRT 모니터보다 빠른 응답특성을 나타내며 저 전력일 뿐만 아니라 디스플레이의 두께도 줄일 수 있게 되었다. 휴대가 가능한 디스플레이의 발전으로 노트북이나 PDA와 같은 실시간 정보를 활용 및 처리 할 수 있는 방법들을 제시할 수 있었지만 원활한 활용을 위해 더 적은 전력을 사용하는 방법들이 제시되어야 했다. 이에 따라 저 전력 소모, 빠른 응답특성, 넓은 시야각 그리고 경량화가 가능한 디스플레이가 되기 위한 새로운 디스플레이가 선을 보이게 되었다. 현재 차세대 디스플레이로 각광을 받고 있는 디스플레이 소자로는 OLED(Organic Light Emitting Diode)가 있다. 이는 LCD 디스플레이가 가지고 있는 단점을 보완하여 우선적으로 높은 색도가 가능하며 후면발광을 사용하지 않고 자체 발광을 하기 때문에 저 전력 소모가 현실화 되었다. 또한 디스플레이의 유연성이 가능하여 휘어질 수 있는 특성을 가지고 있다. 그러나 이러한 유기발광 소자의 경우 높은 발광 효율을 위한 구조적 개선이 필요하며 소자의 수명도 개선해야 한다. 이에 따라 유기발광 소자의 메카니즘에 대한 파악이 필요하게 되며 물리적 구조에 대한 이해가 필요하다. 이를 위해 물리적, 수치적 해석으로 소자의 특성을 파악해 줌으로써 개선된 유기발광 소자 제작이 가능 할 것이다.

1. 서론

다이오드의 기본 원리인 정류특성과 스위치 특성을 가지는 유기발광 소자의 경우 양극과 음극에 전류를 흘려주면 빛을 발생하게 된다. 이러한 발광 현상을 유기물에 적용한 유기발광소자의 기본적인 동작 메카니즘은 전극으로부터 전자(electron)와 정공(hole)으로 불리는 수송자가 주입되고 이들 수송자들이 쌍을 이루고, 여기상태(Excitation state)를 거쳐 다시 재결합하는 과정에서 계면으로부터 빛이 발광된다.[6,7] 발광층을 중심으로 수송자들-전자와 홀-

의 주입이 원활히 수송되도록 하기 위해 다층박막을 삽입하여 일함수(Work Function)를 완만한 계단형으로 만들어 준다. 유기발광 소자의 정공 이동속도가 전자의 이동속도보다 빠르기 때문에 주로 정공 주입층이나 정공 수송층의 박막 두께를 늘여 수송자들의 이동도에 대한 벨런스를 조절하거나 다중 양자우물(Multi-Quantum Well) 구조로 만들어 발광층으로 주입된 전자-정공 쌍(Electron-Hole Pair)이 많이 이루어지도록 만든다. 또한 캐소드쪽의 금속-유기물(Metal-Organic) 간의 계면에서의 주입되는 전자의

확산(Diffusion)을 방지하여야만 전자 주입효율(Electron Injection Efficiency)을 높일 수 있게 되고 발광효율(Electron luminescence)도 높아지게 된다. 이러한 원리로 유기발광 소자는 다층 박막 구조를 가지게 되며 다층박막 형성으로 인해 발생하는 물리적 현상들에 대한 충분한 이해를 바탕으로 개선된 소자 제작이 가능하다. 본 논문에서는 이를 뒷받침해 줄 이론적 근거를 제시하고 실제 소자로 활용될 경우 발생할 여러 문제점들에 대해 연구하였다.

2. 수치해석

그림 1에 본 논문에서 유기발광 소자를 수치해석하기 위해 제시한 박막구조와 각 박막에서 사용된 유기물질 그리고 각 유기물질에 대한 에너지 레벨을 도시 하였다. 기본 구조를 살펴보면 빛의 발광을 확인하기 위해 투명전극인 ITO를 양극 전극으로 증착한 유리를 기판으로 사용하였다. 앞서 밝힌 바와 같이 유기발광소자는 전자의 이동도보다 정공의 이동속도가 더 빠르기 때문에 상대적으로 전자의 이동속도를 정공의 이동속도가 빠르게 발광층으로 유입시키기 위해 정공 주입층(Hole Injection Layer ; HIL)과 정공 수송층(Hole Transport Layer ; HTL)의 두 겹을 두겹게 증착 시켜야 한다. HIL로 사용된 유기물질은 CuPc이고 HTL로 사용된 유기물질은 NPB를 사용하였다. 각 유기물질 구조는 그림 2에 도시하였다. 또한 발광층으로 사용한 유기물질은 C. W. Tang[1]이 제시한 안트라센 계열의 Alq3를 사용하였다.

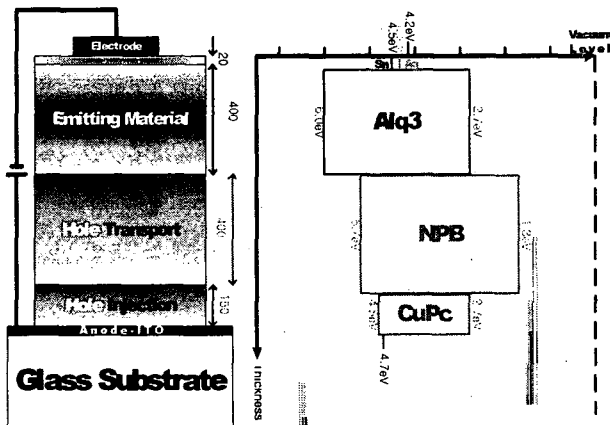


그림 1. 본 논문에서 수치해석을 위해 제시한 유기발광 소자의 기본구조

수송자들의 이동이 원활하게 해 주기 위해 다층 박막 구조로 소자를 제작하게 되는데 수송자의 이동에 에너지 장벽이 높게 되면 수송자는 원활한 이동을 할 수 없게 된다. 따라서 에너지 장벽이 높은 유기물 층 사이에 계단형 에너지 레벨을 구성해 주기 위해 적절한 에너지 장벽을 가지는 물질을 삽입하여 제작 하게 된다.[9] 이러한 에너지 장벽까지 모두 고려하여 수치해석을 해야 한다. 음극쪽에는 에너지 레벨이 조금씩 차이 나는 주석(Sn)과 은(Ag)를 캐소드로 사용하였다. 이는 주입되는 전자들이 순간적으로 전자우물(Quantum Well)에 쌓여지게 되어 전자들의 밀도가 높아지는 현상을 보고자 한 것이다. 수송자의 이동속도는 수송자의 밀도(전자나 정공)에 깊은 연관이 있다. 따라서 전자우물에 전자들이 쌓이게 되어 전자 밀도를 높이면 전자의 이동속도는 빨라지게 될 것이고 그로 인해 전자의 유입이 원활하게 되어 전자와 정공의 주입 밸런스가 원활하게 될 것이다. 이로 인해 발광층에서 전자와 정공쌍(Electron-Hole Pair)가 많이 형성되어 발광 효율이 높아지게 될 것이다.[9,10]

기본적으로 수치해석의 원활한 해석을 위해서는 전자 수송자와 정공 수송자들이 모두 재결합 한다고 가정한다. 모두 재결합 할 경우 양자 효율이 최대가 될 것이므로 이러한 재결합하는 수송자들의 비율을 알기 위해서는 전류 연속 방정식을 풀어야 한다. 정류 상태에서의 재결합 전류 J_r 은 연속 방정식을 공간적으로 적분하여 얻을 수 있다.

$$J_r = \int_0^L qRdx \quad (1)$$

여기서 L 은 소자의 채널을 따르는 길이이며 q는 전하량, R은 재결합 비를 나타내며 $R = \gamma np$ 가 된다. $\gamma = 4\pi q\mu_R/\epsilon$ 으로 Langevin 상수 이다.[14]

포아송 방정식(Poisson's Equation)과 전류 연속 방정식(Current Continuity Equation)을 이용하여 전자밀도와 정공 밀도를 구할 수 있다.

$$\frac{dJ_n}{dx} = -q(G - R) \quad (2)$$

$$\frac{dJ_p}{dx} = q(G - R) \quad (3)$$

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon}(p-n) \quad (4)$$

여기서 J_n 와 J_p 는 각각 전자와 정공 전류 밀도이다. 또한 ψ 는 정전 포텐셜(Electronic Potential)이다. 열적 평형 상태에서의 전자와 정공밀도를 각각 n_e, p_e 로 표시하면 아래 수식으로 쓸 수 있다.

$$n_e = n_0 \exp\left(\frac{q\psi - q\phi_F + \chi_C}{kT}\right) \quad (5)$$

$$p_e = p_0 \exp\left(-\frac{q\psi - q\phi_F + \chi_C + E_g}{kT}\right) \quad (6)$$

여기서 ϕ_F 는 열평형 상태에서의 페르미(Fermi)레벨이고, χ_C 는 전자 친화도이다. T 는 켈빈 온도를 나타내며 k 는 볼츠만 상수(Boltzmann's constant)이다. 또한 n_0 는 분자들의 상태 밀도이며 E_g 는 에너지 갭(Energy gap)을 나타낸다. 표동-확산 방정식(drift-diffusion equation)은 아래와 같다.

$$J_n = q \mu_n \left(n E + \frac{kT}{q} \frac{dn}{dx} \right) \quad (7)$$

$$J_p = q \mu_p \left(p E - \frac{kT}{q} \frac{dp}{dx} \right) \quad (8)$$

여기서 전계는 E 로 표시 되었으며 전계는 $E = -\frac{d\psi}{dx}$ 가 되고 전자와 정공은 아래 두 식으로 이동도(mobility)가 각각 주어진다.

$$\mu_n = \mu_{n0} \exp(E/E_0) \quad (9)$$

$$\mu_p = \mu_{p0} \exp(E/E_0) \quad (10)$$

여기서 μ_{p0} 와 μ_{n0} 는 전계가 걸리지 않았을 경우의 전자와 정공 이동속도이다. 쇼트키(Schottky) 정공과 전자의 전기적 포텐셜 장벽(Potential barrier) ϕ_{bp} 와 ϕ_{bn} 가 장벽급침현상(barrier lowering)이 접합 부분에

서 생긴다면 아래와 같은 수식을 얻을 수 있다.

$$\Delta\phi_{bp} = \sqrt{qE(0)/4\pi\epsilon} \quad (11)$$

$$\Delta\phi_{bn} = \sqrt{qE(L)/4\pi\epsilon} \quad (12)$$

계면에서의 함정 전류(trap current)를 고려하기 위해 아래 두 식을 사용하였다.

$$J_p|_{x=0} = C_p E(0)^2 \exp\left(-\frac{\kappa_p}{E(0)}\right) \quad (13)$$

$$J_n|_{x=L} = C_n E(L)^2 \exp\left(-\frac{\kappa_n}{E(L)}\right) \quad (14)$$

아래 수식은 수치해석에 사용된 상수들이다.

$$C_p = 3q^2/8\pi h(\phi_{bp} - \Delta\phi_{bp}) \quad (15)$$

$$\kappa_p = 8\pi\sqrt{2qm}(\phi_{bp} - \Delta\phi_{bp})^{3/2}/3h \quad (16)$$

$$C_n = 3q^2/8\pi h(\phi_{bn} - \Delta\phi_{bn}) \quad (17)$$

$$\kappa_n = 8\pi\sqrt{2qm}(\phi_{bn} - \Delta\phi_{bn})^{3/2}/3h \quad (18)$$

전체 전류는 전자전류와 정공 전류를 합친 것이므로 $J = J_p + J_n$ 이 된다.

3. 결론

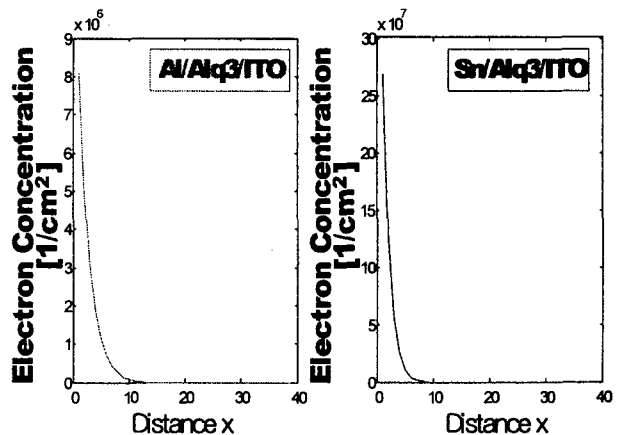


그림 2. 전자농도 특성

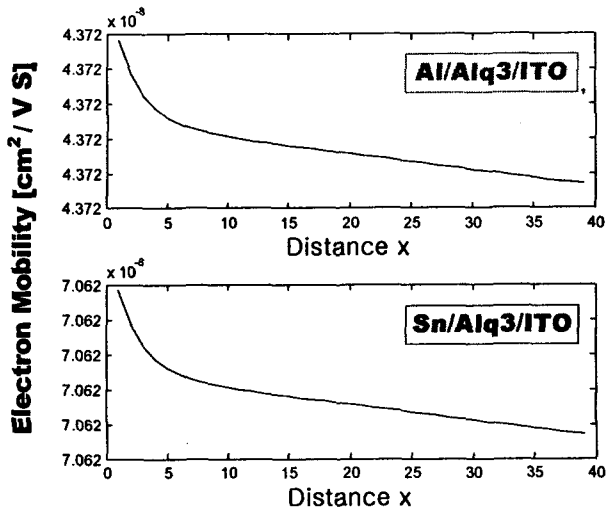


그림 3. 전자 이동도 특성

그림 2는 전자농도를 모의실험으로 도출 하였다. 모의실험 결과 발광층에 주입되는 전자의 농도가 높아 졌음을 알 수 있었다. 이는 Sn 층이 캐소드 전극의 Al 과 발광층의 Alq₃에서 양자 우물이 형성됨을 알 수 있다. 이러한 양자 우물에 전자들이 적체되어 전자 밀도가 높아짐을 알 수 있다. 그림 3에서는 Sn 층을 삽입한 구조가 기본구조보다 국부적으로 강한 전계에 의해 전자들이 3~4배 높은 이동도를 나타낸다는 것을 확인시켜 주고 있다. 시뮬레이션에 적용된 소자의 경우에 캐소드 전극으로부터 들어온 수송자-전자들이 얇은 금속층에서 양자우물에 갇히게 되고, 양자우물에 갇힌 수송자들로 인해 높은 수송자 밀도를 얻게 되어 국부적으로 강한 전계를 형성하게 된다. 강한 전계에 의한 캐리어들로 인해 캐리어 이동도가 높아지게 될 것이 발광층으로 빠르게 주입 될 수 있게 되어 상대적으로 낮은 전자 이동도를 가지는 구조보다 전자 이동도가 커짐으로 전자 주입효율을 높이고 발광층에서 전자와 정공의 이동도 밸런스를 맞추게 된다. 이러한 원리로 인해 발광 효율이 높아지게 된다. 즉 전자의 농도 상승을 위한 소자를 제작하거나 소자의 박막 두께를 최적화 해 줌으로 인해 발광효율을 높일 수 있다는 것을 모의 실험을 통해 증명 할 수 있다.

참고문헌

- [1] C. W. Tang, S. A. Vanslyke, Appl. Phys. Lett. 51, 913 (1987)
- [2] C. D. J. Blades and Alison B Walker, Synthetic Metals 111-112(2002) 335 - 34
- [3] Alison B Walker A. Kambili and S. J. Martin, J. Phys R1. (2002)
- [4] G. G. Malliaras and J. C. Scott, J. Appl. Phys. Vol 83, NUM 10(1998)
- [5] B. K. Crone, P. S. Davids, I. H. Cambell, and D. L. Smith, J. Appl. Phys. Vol 87, NUM4, 1974(2000).
- [6] C. W. Tang, S. A. Vanslyke, C. H. Chen J. Appl. Phys. 65, 3610 (1989)
- [7] P. S. Davids, Sh. M. Kogan. I. D. Parker, & D. L. Smith, Appl. Phys. Lett. 69, 2270 (1996)
- [8] D. Braun & A. J. Heeger, Appl. Phys. Lett. 58, 1982 (1991)
- [9] D. Parker, J. Appl. Phys. 75, 1656 (1994)
- [10] C. W. Tang, S. A. Vanslyke, C. H. Chen J. Appl. Phys. 65, 3610 (1989)
- [11] I. H. Campbell, T. W. Hagler & D. L. Smith, Phys. Rev. Lett. 76, 1990 (1996)
- [12] G. G. Kepler, P. M. Besson, S. J. Jacobs, R. A. Anderson, M. B. Sinclair V. S. Valencia & P. A. Cahill, Appl. Phys. Lett. 66, 3618 (1995)
- [13] Eckehard Scholl, Technical University Berlin, Nonlinear Spatio-Temporal Dynamics and Chaos in Semiconductors. (2001)
- [14] S. M. Sze, Bell Laboratories, Incorporated Murray Hill, New Jersey. Physics of Semiconductor Devices 2th. (1984)