

유기발광소자(Organic Light Emitting Diode)의 다층박막에 대한 전기적 특성 연구

(A Study on Electric Characteristics of Multi-layer by Light Organic Emitting Diode)

이 정 호*

(Jung-Ho Lee)

요약 본 연구에서는 차세대 디스플레이 소자로 각광을 받고 있는 유기발광 소자의 전기적인 특성을 해석적으로 접근하였다. 기본적인 OLED의 동작 메카니즘은 일함수(work function)가 낮은 음극(cathode) 전극으로부터 주입된 전자(electron)와 양극(anode) 전극으로 주입된 정공(hole)이 수송층을 지나 발광층으로 유입되어 여기상태(exciton state)를 거치며 재결합함으로써 발광되는 것으로 알려져 있다. 따라서 음극과 양극을 통해 들어오는 수송자(carrier)들이 원활한 전자-정공 쌍(electron - hole pair)을 이루기 위해 다층 박막 구조로 소자를 제작하여 높은 에너지 장벽을 완만하게 만들고 또한 박막의 두께를 조절하여 정공과 전자의 이동도 밸런스(balance)를 맞추어 수송자-전자와 정공-들이 수송층(CTL : carrier transport layer)을 통해 발광층(EML : emitting material layer)으로 주입을 용이하게 만든다. 따라서 본 논문에서는 유기발광소자의 최적의 발광특성을 얻기 위해서는 수치 해석을 통한 가장 높은 발광 효율을 가지게 되는 박막의 두께를 예측하고 예측된 유기발광소자의 수치해석 값이 실제 제작된 소자의 특성 값과 일치하여 타당성이 있음을 증명하고자 한다.

핵심주제어 : 유기발광소자, 다층박막

Abstract This research approached electrical characteristics of organic light emitting diodes getting into the spotlight by next generation display device. Basic mechanism of OLED's emitting is known as that electron by cathode of lower work function and hole by anode of higher work function are driven and recombine exciton-state being flowed in emitting material layer passing carrier transport layer. In order to make many electron-hole pairs, we must manufacture device in multi-layer structure. There are Carrier Injection Layer(CIL), Carrier Transport Layer(CTL) and Emitting Material Layer(EML) in multi-layer structure. It is important that regulate thickness of layer for high luminescence efficiency and set mobility of hole and electron.

Key Words : Organic Light Emitting Diode(OLED), Multi-Layer structure

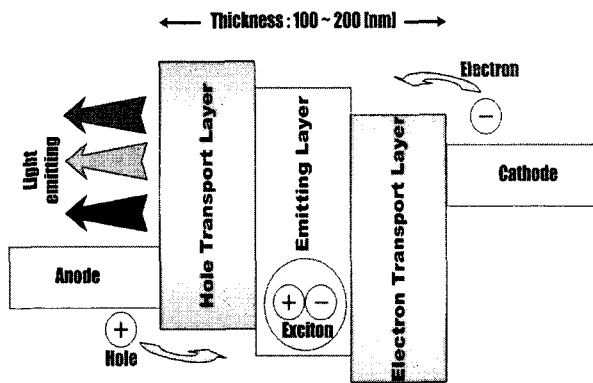
1. 서론

과거 CRT(Cathode Ray Tube) 모니터의 사용

은 전자 빔(Electron Gun)을 이용해 화면 뒤에서 전자를 쏘아주는 형태의 디스플레이이다.[2] 이는 주파수를 이용하기 때문에 사용자의 눈을 쉽게 피로하게 만든다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 LCD(Liquid Crystal Display) 모니터의 사용이 도

* 천안대학교 정보통신학부

입되었다. 기존의 CRT 모니터에서 전자 빔을 사용하던 방식에서 픽셀(Pixel) 단위의 후면발광 디스플레이를 만들면서 CRT 모니터보다 빠른 응답 특성을 나타내며 저전력일 뿐만 아니라 디스플레이의 두께도 줄일 수 있게 되었다. 휴대가 가능한 디스플레이의 발전은 노트북이나 PDA와 같은 실시간 정보를 활용할 수 있는 방법들을 제시할 수 있었고 이에 따라 좀 더 적은 전력을 사용하는 방법들이 제시되어야 했으며 휴대가 가능한 디스플레이가 되기 위한 새로운 디스플레이를 개발하게 되었다. 현재 차세대 디스플레이로 각광을 받고 있는 디스플레이 소자는 OLED(Organic Light Emitting Diode)이다. 이는 LCD 디스플레이가 가지고 있는 단점을 보완하여 보다 빠른 응답특성을 가지며 넓은 시야각과 낮은 전력소모 그리고 디스플레이의 유동성이 가능하도록 제작되어 진다. 일반적인 유기 발광 다이오드는 그림 1에서와 같이 유리기판에 ITO(Indium Thin Oxide)를 양극(Anode)로 사용하고 그 위에 유기물(Organic)으로 된 홀 주입층(Hole Injection Layer ; HIL)과 홀 수송층(Hole Transport Layer : HTL)을 진공 증착 시킨 후 발광층(Emitting Layer)을 박막 삽입 시키고 그 위에 전자 수송층(Electron Transport Layer : ETL)과 전자 주입층(Electron Injection Layer : EIL)을 삽입 시킨 후 알루미늄(Al)이나 금(Au) 혹은 은(Ag)등과 같은 일함수(Work-function)이 낮은 금속을 음극(Cathode)으로 사용하는 기본 구조로 구성되어 있다.[3,4,5]



<그림 1> 유기발광 소자의 기본구조

이러한 유기발광 소자의 기본 원리에 대해 물리적 구조에 대한 이해가 필요하며 물리적, 수치적 해석은 좀 더 개선된 유기발광 소자 제작을 가능하게 할 것이다.

2. 이론적 고찰

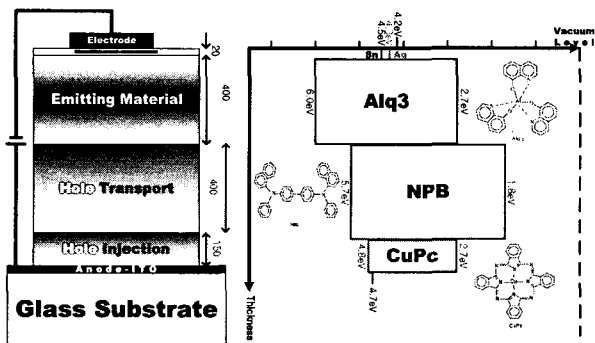
2.1 유기발광소자의 동작메카니즘

다이오드(Diode)는 2단자 소자로 정류성을 가지며 스위치 소자로 활용을 하고 있다. 이들 다이오드의 정류 메커니즘을 설명하기 위해 여러 1923년에는 Y.I. 프렌젤·H.A. 윌슨 L.W. 노르드하임, 39년에는 W. 쇼트키, 40년에는 N.F. 모트 등)의 이론이 제안되었다. 그러나 당시에 다루어진 반도체 다이오드는 다결정(多結晶)이었고 순도도 낮았기 때문에 이론적 검증은 불가능했다. 다이오드는 제2 차 세계대전 후 트랜지스터의 개발과 더불어 본격적인 발전이 이루어졌다. 현재는 49년에 발표한 W.B. 쇼클리의 p-n접합이론에 따른 접합다이오드(Junction - Diode)와 쇼트키 이론에 따른 쇼트키 다이오드(Schottky Diode)가 실용화되어 많이 활용되고 있다. 이외에도 터널효과를 응용한 터널 다이오드(Tunnel Diode), 마이크로파의 발진(發振)이 가능한 건 다이오드(Gunn diode), 적외선 등을 발광하는 발광다이오드(Light Emitting Diode) 등 정류성 다이오드에 포함되지 않는 다양한 다이오드도 개발되고 있다. 이러한 다이오드의 기본 원리에 유기물 발광층을 이용하는 유기발광 소자의 기본적인 동작 메카니즘은 전극으로부터 전자(electron)와 정공(hole)이 주입되고 이들이 여기상태(Excitation state)를 거쳐 다시 재결합하는 것에 의해 발광된다.[6,7] 발광층을 중심으로 전자와 홀의 주입이 원활히 이루어지게 하기 위해 캐리어들의 이동이 쉽도록 일함수(Work Function)를 완만한 계단형으로 만들어 주게 되는데 이는 유기EL 발광소자의 정공 이동속도가 전자의 이동속도보다 빠르기 때문에 주로 홀 주입층이나 홀의 수송층의 박막 두께를 늘이거나 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 주

입되는 전자의 확산(Diffusion)을 방지하여야만 전자 주입효율(Electron Injection Efficiency)을 높일 수 있게 되고 발광효율(Electron luminescence)도 높아지게 된다. 원활한 수송자의 주입을 위해 일반적으로 유기발광 소자는 다층 박막 구조를 가지게 되며 다층박막 형성으로 인해 발생하는 물리적 현상들을 잘 파악하여야만 개선된 소자 제작이 가능하며 이를 뒷받침해 줄 이론적 근거를 제시함으로써 실제 소자로 활용할 경우 발생하는 여러 문제점들을 해결 할 수 있을 것이다.

2.2 다층박막 유기발광소자의 수치해석

그림 2는 본 논문에서 수치해석을 하기 위해 제시한 소자구조와 에너지 레벨을 표시한 그림이다. 유기발광소자의 기본 구조와 마찬가지로 기관은 유리를 사용하였으며 빛의 발광을 확인하기 위해 투명전극인 ITO를 양극 전극으로 사용하였다. 앞서 밝힌 바와 같이 유기발광소자는 전자의 이동속도보다 정공의 이동속도가 더 빠르기 때문에 상대적으로 전자의 이동속도보다 정공의 이동속도가 늦게 발광층으로 유입시키게 하기 위해 정공 주입층(HIL)과 정공 수송층(HTL)의 두께를 두껍게 박막처리 하여야 한다. HIL로 사용된 유기물은 CuPc이고 HTL로 사용된 유기물은 NPB를 사용하였다. 각 유기물 구조는 그림 2에 도시하였다. 또한 발광층으로 사용한 유기물은 C. W. Tang[1]이 제시한 안트라센 계열의 Alq3를 사용하였다.



<그림 2> 본 논문에서 수치해석을 위해 제시한 유기발광소자의 기본구조

수송자들의 이동이 원활하게 해 주기 위해 다층 박막구조로 소자를 제작하게 되는 유기발광 소자는 에너지 장벽이 높은 유기물 층 사이에 상대적으로 낮은 에너지 장벽을 삽입하여 제작하게 된다.[9] 따라서 이러한 에너지 장벽을 고려하여 수치해석을 하여야 하며 음극쪽에는 에너지 레벨이 조금씩 차이 나는 주석(Sn)과 은(Ag)를 캐소드로 사용하였다. 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 밸런스(balance)가 원활하게 될 것이다. 이로 인해 발광층에서 전자와 정공 쌍(Electron-Hole Pair)이 많이 형성되어 발광 효율이 높아지게 될 것이다.[9,10]

2.3 유기발광소자의 수치해석

기본적으로 수치해석의 원활한 해석을 위해서는 전자 수송자와 정공 수송자들이 모두 재결합한다고 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 q 는 전하량, R 은 재결합 비를 나타내며 $R = \gamma np$ 가 된다. 또한 $\gamma = 4\pi q\mu_R/\epsilon$ 은 Langevin 상수이다.[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 표시한다면 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 은 열평형 상태에서의 페르미(Fermi) 레벨이고, χ_C 는 전자 친화도 이다. 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. 표준-확산 방정식은 아래와 같다.

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

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

여기서 전계는 E 로 표시되었으며 전계는 $E = -d\psi/dx$ 가 되고 전자와 정공은 아래 두식으로 이동속도가 각각 주어진다.

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

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

여기서 μ_{n0} 와 μ_{p0} 는 전계가 걸리지 않았을 경우의 전자와 정공 이동속도이다. 쇼트키(schottky) 정공과 전자의 전기적 포텐셜 장벽(Potential

barrier) ϕ_{bp} 와 ϕ_{bn} 가 장벽급힘현상(barrier lowering)이 접합 부분에서 생긴다면 아래와 같은 수식을 얻을 수 있다.

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

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

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

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

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

아래 수식들은 사용되는 상수들이다.

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

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

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

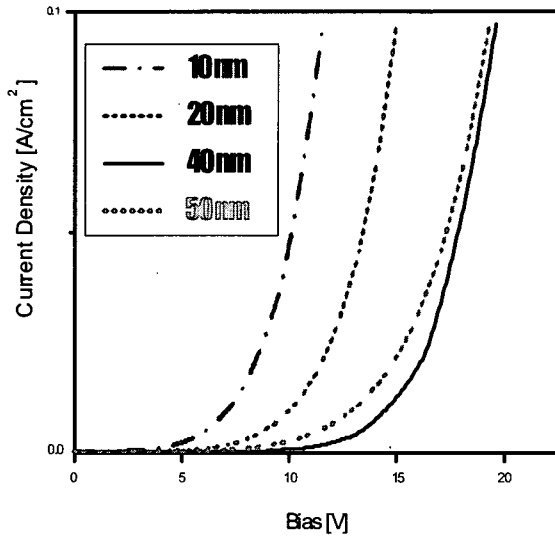
$$k_n = 8\pi\sqrt{2qm} (\phi_{bn} - \Delta\phi_{bn})^{3/2}/3h \quad (18)$$

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

3. 수치해석 결과

유기발광 소자의 수치해석은 프로그램마다 조금씩 차이를 보인다. 이는 프로그램마다 가지고 있는 유효소수자의 오차 때문이다. 그러나 그 차이는 오차 범위를 크게 벗어나지 않으므로 결과 값에는 차이가 없을 것으로 생각된다. 그림 3에서와 같이 소자의 전체 박막 두께를 각각 10/20/30/40/50 [nm]로 두고 수치해석 하였다. 기존의 유기발광 소자의 해석에 있어서 소자의 길이를 길게 하면 할수록 전류 밀도가 높아져 발광 효율이 좋아진다는 결과 값과 상반된다. 제작을 위해 최적화된 소자의 길이가 있음을 단적으로 알 수 있는 결과이다. 본 논문에서의 수치해석 결

과에서는 40[nm]에서 최적화된 전류밀도를 나타내었고 50[nm]가 되면 오히려 전류밀도가 떨어짐을 알 수 있다.



<그림 3> 본 논문에서 제시된 소자의 수치해석 결과

4. 결 론

본 논문에서는 현재 많은 연구가 진행되고 있는 유기발광소자의 물리적 이해를 돕기 위해 유기발광 기본 소자에 대한 수치해석을 하였다. 수치해석의 결과에서도 알 수 있듯이 발광 효율을 높이기 위해 최적화된 박막 두께를 얻기 위해 소자의 물리적 해석을 통한 최적화 된 박막 두께로 유기발광 소자를 제작한다면 높은 효율을 얻을 수 있을 것이다. 따라서 본 논문에서는 유기발광 소자의 기본구조를 수치해석 하여 직접 제작된 소자의 특성 값과 비교하였다.

또한 소자 제작에 있어 음극 전극쪽에 에너지 레벨이 다른 두 금속을 이종접합(Hetero junction) 시켜 하나의 음극 전극으로 사용한 결과 기존의 단일 전극을 사용했을 경우보다 전류 밀도가 높아짐을 알 수 있었다. 이는 전자가 이동을 하면서 순간적으로 전자 우물에 갇히게 되고 이렇게 전자우물에 갇힌 전자들은 전자 밀도를 높게 해 주는 결과를 얻게 되어 전자의 이동속도에 영향을 주게 된다. 유기발광 소자는 전자의 이동속도가 정공의 이동속도보다 상대적으로 느리기 때문에

전자의 이동속도를 높여 많은 전자와 정공이 쌍을 이루도록 할 수 있게 되며 전자와 정공 쌍이 높아지는 것은 서로 다른 음극 전극을 사용하는 이중 전극 제작이 발광 효율에 직접적인 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] C. W. Tang, S. A. Vanslyke, App(1987)l. Phys. Lett. 51, pp. 913-915.
- [2] C. D. J. Blades and Alison B Walker (2002), Synthetic Metals pp. 111-112.
- [3] Alison B Walker A. Kambili and S. J. Martin(2002), J. Phys R1. pp. 9825-9827.
- [4] G. G. Malliaras and J. C. Scott(1998), J. Appl. Phys. Vol 83, NUM 10, pp. 944-946.
- [5] B. K. Crone, P. S. Davids, I. H. Cambell, and D. L. Smith(2000), J. Appl. Phys. Vol 87, NUM4, pp. 1974-1976.
- [6] C. W. Tang, S. A. Vanslyke, C. H. Chen(1989), J. Appl. Phys. 65, pp. 3610-3312.
- [7] P. S. Davids, Sh. M. Kogan. I. D. Parker, & D. L. Smith(1996), Appl. Phys. Lett. 69, pp. 2270-2272.
- [8] D. Braun & A. J. Heeger(1991), Appl. Phys. Lett. 58, pp. 1982-1984.
- [9] I. D. Parker(1994), J. Appl. Phys. 75, pp. 1656 -1658.
- [10] I. H. Campbell, T. W. Hagler & D. L. Smith(1996), Phys. Rev. Lett. 76, pp. 1990-1992.
- [11] D. M. Pay(1970), J. Chem, Phys. 52, pp. 2285-2287.
- [12] G. G. Kepler, P. M. Besson, S. J. Jacobs, R. A. Anderson, M. B. Sinclair V. S. Valencia & P. A. Cahill(1995), Appl. Phys. Lett. 66, pp. 3618-3620.
- [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)



이 정 호 (Jung-Ho Lee)

- 정회원
- 1998년 2월 : 경일대학교 전자공학
학과
- 2002년 2월 : 홍익대학교 전자공
학과 (공학석사)
- 2002년 3월 : 홍익대학교 전자공학과 (박사수료)
- 2005년 10월 ~ 현재 : 천안대학교 정보통신학부
겸임교수
- 관심분야 : OLED(Organic Light Emitting Diode),
SET(Single Electron Transistor)