

◆ 특집 ◆ FPD(Flat Panel Display) 제조 및 검사 공정 기술

마이크로캐비티 OLED 의 전극과 유기물층 두께가 발광 스펙트럼에 미치는 영향

Influence of Electrode and Thickness of Organic Layer to the Emission Spectra in Microcavity Organic Light Emitting Diodes

김창교^{1,✉}, 한가람¹, 김일영¹, 홍진수²

Chang Kyo Kim^{1,✉}, Ga-Ram Han¹, Il Yeong Kim¹, and Chinsoo Hong²

1 순천향대학교 전자정보공학과 (Department of Information and Electronics Engineering, Soonchunhyang Univ.)

2 순천향대학교 전자물리학과 (Department of Electronic Physics, Soonchunhyang Univ.)

✉ Corresponding author: cckim1@sch.ac.kr, Tel: 041-530-1339

Manuscript received: 2011.12.30 / Accepted: 2012.10.6

Organic light-emitting diodes (OLEDs) using microcavity effect have attracted great attention because they can reduce the width of emission spectra from organic materials, and enhance brightness from the same material. We demonstrate the simulation results of the radiation properties from top-emitting organic light-emitting diodes (TE-OLEDs) with microcavity structures based on the general electromagnetic theory. Organic materials such as N,N'-di (naphthalene-1-yl)-N,N'-diphenylbenzidine (NPB) as a hole transport layer and tris (8-hydroxyquinoline) (Alq₃) as emitting and electron transporting layer are used to form the OLEDs. The organic materials were sandwiched between anode such as Ni or Au and cathode such as Al, Ag, or Al:Ag. The devices were characterized with electroluminescence phenomenon. We confirmed that the simulation results are consistent with experimental results.

Key Words: OLED (유기발광다이오드), Microcavity (마이크로캐비티), Top-emitting (전면발광), Transparent Electrode (투명전극)

기호설명

α = directional orientation of the system

h = strip thickness strip thickness strip thickness strip thickness strip thickness

n = the real part of the refractive index

κ = the imaginary part of the refractive index

N = the real part of effective refractive index

K = the imaginary part of effective refractive index

θ_i = the propagating angle of EM wave with respect to

the normal of the interface between i th and $(i+1)$ th layer

r_{ij} = the reflection coefficient of EM wave propagating from i th layer to j th layer

t_{ij} = the transmission coefficient of EM wave propagating from i th layer to j th layer

δ_m = the optical path length of EM wave in the m th layer

$R_{0,N+1}$ = the reflectance of EM wave propagating from 0th layer to N th layer

$T_{0,N+1}$ = the transmittance of EM wave propagating from 0th layer to N th layer

1. 서론

OLEDs (organic light-emitting diodes)는 자발광형이기 때문에 LCD (liquid crystal display)에 비해 휘도 (brightness)와 효율이 높고 시야각 및 대조비 (contrast)가 우수하며 백라이트가 필요하지 않아서 경량 박형이고 소비전력 면에서도 우수하다.^{1,2} 또한 응답속도가 빨라서 우수한 동영상을 얻을 수 있을 뿐 만 아니라 유연기판에 소자 형성이 가능하여 많은 관심을 받고 있다.

OLED 는 PM (passive matrix)과 AM (active matrix)의 두 가지 방식으로 구동된다.³ PM 방식은 AM 방식에 비해 상대적으로 제조비용이 낮지만 높은 휘도를 얻기 위해서 높은 구동 전류를 필요로 한다. 이는 OLED 의 신뢰성에 좋지 않은 영향을 미치게 되고 소모전력을 높게 한다.⁴ 반면에 AM 방식은 적은 전류로 구동이 가능하기 때문에 대면적, 장수명 응용에 더 적합하다.⁵ OLED 는 발광 방식에 따라 배면 발광 (bottom emission)과 전면 발광 (top emission) 방식으로 나눌 수 있다. 배면 발광 방식은 TFT (thin film transistor)가 위치하고 있는 기판 아래로 빛을 내보내기 때문에 개구율이 제한되기 때문에 높은 휘도를 얻기 위해서는 높은 전류가 필요해서 소자의 열화를 용이하게 한다. 반대로 전면 발광 방식은 기판의 반대 방향으로 빛을 내보내기 때문에 TFT 소자의 수와 관계 없이 높은 개구율을 얻을 수 있다.⁶

TE-OLED (top-emitting OLED)는 반사판 기능을 하는 양극과, 유기물층 및 반투명 음극으로 구성되어 있다. 불투명한 양극과 반투명인 음극으로 구성된 마이크로 캐비티의 Fabry-Perot 간섭이 OLED 의 광출력을 향상시키고 광 스펙트럼에 영향을 미친다. 마이크로 캐비티 효과는 반사 전극의 반사도와 반투명전극의 투과도에 의해 상호간 빛의 간섭 효과와 두 전극 사이의 거리, 즉 유기물 층의 두께에 의해 발광 스펙트럼이 변화하는 현상이다.⁷⁻⁹ 마이크로 캐비티 효과를 이용하면 특정 파장의 빛을 선택적으로 발광할 수 있으며, 스펙트럼의 폭이 작아져 원래의 색보다 더 선명한 빛을 구현할 수 있다.

OLED 소자의 전면 발광 방식은 소자의 반투명 전극 방향으로 빛을 방출해야 하므로 반투명한 음극이 필요하다. 본 논문에서는 양극으로는 Ni 및 Au 를 선택하였고 음극으로는 Al, Ag, 및 Al:Ag 를 선택하여 시뮬레이션과 소자 제작 후에

발광 특성 실험을 통해서 특성을 비교 분석하였다. 또한, 본 논문에서는 유기물층의 두께 변화가 발광 스펙트럼에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해서 OLED 의 마이크로 캐비티에 의한 광학 특성을 조사하였고 실험을 통하여 시뮬레이션 결과를 확인하였다.

2. 시뮬레이션

OLED 의 양전극 및 음전극의 종류에 따른 발광 스펙트럼과 유기물층의 두께에 따른 발광 스펙트럼을 시뮬레이션하였다.

일반적으로 물질의 굴절률은 복소수이며 굴절률의 허수부는 물질에 의하여 빛이 흡수되는 현상과 밀접한 관련이 있다. OLED 박막의 굴절률을 복소수로 놓으면 전달 벡터 (propagation vector) 역시 복소수이기 때문에 박막 속에서 위상이 진행되는 방향과 에너지가 진행되는 방향이 달라지게 된다. 이렇게 진행되는 빛을 불균일파 (inhomogeneous wave)라고 한다. m 번째 박막의 굴절률을 $n_m + i\kappa_m$ 이라 하고, 공기에서 다중 박막 계로 진행되는 빛의 입사각을 θ_0 라 하자. 이때 m 번째 박막을 통과하는 전자기파는 주어진 박막의 굴절률과 다른 굴절률에 의해서 진행이 결정된다. 유효 굴절률 (effective refractive indices) $N_m + iK_m$ 의 실수부 N_m 은 아래의 식 (1)에 의해 결정된다.¹⁰

$$N_m^4 - (n_m^2 - \kappa_m^2 + N_s^2)N_m^2 + N_s^2(n_m^2 - \kappa_m^2) - n_m^2\kappa_m^2 = 0 \quad (1)$$

여기서 $N_s = n_0 \sin \theta_0$ 이다. 이렇게 결정된 N_m 을 이용하여 박막 속을 진행하는 전자기파의 방향 θ_m 은 다음과 같은 스넬법칙에 의하여 결정된다.

$$N_m \sin \theta_m = n_0 \sin \theta_0 \rightarrow \theta_m = \sin^{-1} \left(\frac{n_0 \sin \theta_0}{N_m} \right) \quad (2)$$

유효 굴절률의 허수부 K_m 은 아래 식으로 주어진다.

$$K_i = \frac{n_i \kappa_i}{N_i \cos \theta_i} \quad (3)$$

식(1)-(3)을 보면 알겠지만 굴절률 사이에 다음

과 같은 대소 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} N_m &\geq n_m \\ K_m &\geq \kappa_m \end{aligned} \quad (4)$$

이렇게 유효 굴절률과 빛의 진행방향이 결정되면 프레넬 방정식을 이용하여 인접한 박막 (m 번째 박막에서 $(m+1)$ 박막으로 진행되는 빛 경우) 사이의 반사계수와 투과계수를 구할 수 있다.

$$\begin{cases} r_{j,i+1} = \frac{N_i \cos \theta_i - N_{i+1} \cos \theta_{i+1} + i(K_i - K_{i+1})}{N_i \cos \theta_i + N_{i+1} \cos \theta_{i+1} + i(K_i + K_{i+1})} \\ t_{j,i+1} = \frac{2(N_i \cos \theta_i + iK_i)}{N_i \cos \theta_i + N_{i+1} \cos \theta_{i+1} + i(K_i + K_{i+1})} \\ r_{i,j+1} = \frac{(n_{i+1} + i\kappa_{i+1})^2 (N_i \cos \theta_i + iK_i) - (n_i + i\kappa_i)^2 (N_{i+1} \cos \theta_{i+1} + iK_{i+1})}{(n_{i+1} + i\kappa_{i+1})^2 (N_i \cos \theta_i + iK_i) + (n_i + i\kappa_i)^2 (N_{i+1} \cos \theta_{i+1} + iK_{i+1})} \\ t_{i,j+1} = \frac{2(n_i + i\kappa_i)(n_{i+1} + i\kappa_{i+1})(N_i \cos \theta_i + iK_i)}{(n_{i+1} + i\kappa_{i+1})^2 (N_i \cos \theta_i + iK_i) - (n_i + i\kappa_i)^2 (N_{i+1} \cos \theta_{i+1} + iK_{i+1})} \end{cases} \quad (5)$$

한 개의 박막에 들어온 빛은 양쪽에 있는 경계면을 통한 투과와 반사를 무한히 반복하여 무한개의 광선이 형성된다. 이런 박막이 여러 개 있으면 이 모든 광선을 다 추적하는 것은 어렵다.^{11,12}

그림 1 은 굴절률 n_0 인 매질에서 오른쪽으로 진행하는 빛의 전기장을 나타낸 것인데 이 빛은 수직으로 입사하지 않는 일반적인 상황을 표현한다. 이때 다중 박막 계를 통한 반사율과 투과율에 쓰이는 행렬은 다음과 같다.^{11,12}

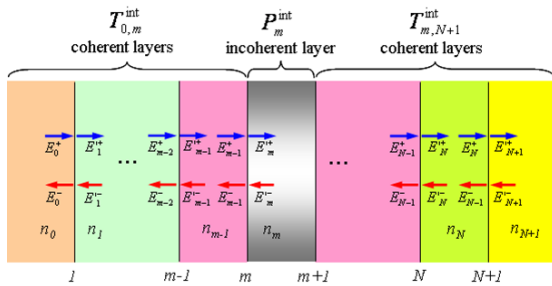


Fig. 1 Multiple film system and their corresponding electric fields

식(6)의 행렬로부터 다음과 같은 박막 계의 행렬을 얻는다.

$$\begin{aligned} T_{0,m}^{int} &= \frac{1}{|t_{0,m}|^2} \begin{pmatrix} 1 & -|r_{m,0}|^2 \\ |t_{0,m}|^2 & |t_{0,m} t_{m,0}|^2 - |r_{0,m} r_{m,0}|^2 \end{pmatrix} \\ P_m^{int} &= \begin{pmatrix} |\exp(-i\delta_m)|^2 & 0 \\ 0 & |\exp(-i\delta_m)|^2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} T_{m,N+1}^{int} &= \frac{1}{|t_{m,N+1}|^2} \\ &\times \begin{pmatrix} 1 & -|r_{N+1,m}|^2 \\ |r_{m,N+1}|^2 & |t_{m,N+1} t_{N+1,m}|^2 - |r_{m,N+1} r_{N+1,m}|^2 \end{pmatrix} \\ T_{0,N+1}^{incoh} &= T_{0,m}^{int} P_m^{int} T_{m,N+1}^{int} = \begin{pmatrix} T_{11}^{incoh} & T_{12}^{incoh} \\ T_{21}^{incoh} & T_{22}^{incoh} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)로부터 그림 1 의 박막 계에 대한 투과율과 반사율을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_{0,N+1}^{incoh} &= |r_{0,N+1}|^2 = \frac{T_{21}^{incoh}}{T_{11}^{incoh}} \\ T_{0,N+1}^{incoh} &= \frac{n_{N+1} \cos \theta_{N+1}}{n_0 \cos \theta_0} |t_{0,N+1}|^2 \\ &= \frac{n_{N+1} \cos \theta_{N+1}}{n_0 \cos \theta_0} \frac{1}{T_{11}^{incoh}} \end{aligned} \quad (8)$$

OLED 에서 발광층에서 발생한 빛은 점광원 (point-like source)과 유사하다. 그래서 식(8)에 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ 단위인 휘도 (radiance)를 고려하였다.¹³ OLED 시뮬레이션에서 사용한 박막의 광학적 특성은 참고문헌에서 발췌하여 사용하였다.¹⁴⁻¹⁹

3. 실험

OLED 제작을 위한 기판으로 0.7 mm 두께의 유리 기판을 세정하여 사용하였다. 유리 기판의 세정은 증류수 (DI water), 아세톤 (acetone), 메탄올 (methanol), 에탄올(ethanol), IPA 및 증류수 순으로 린스(rinse)를 한 후에 불활성 기체인 질소를 이용하여 수분을 제거한 후 오븐에 넣어 건조 시켰다.

OLED 소자의 양전극으로 Ni 및 Au 박막을 사용하였고 유리기판 위에 증착하여 제작하였다. 전자빔 증착기를 이용해서 두께 100 nm 의 Ni 박막을 유리기판 위에 증착하였다. Au 박막은 기판과의 접착력을 높이기 위해 10 nm 두께의 Ni 을 전자빔

증착기를 이용해서 유리기관 위에 증착한 후에 50 nm 의 Au 를 Ni 박막위에 증착하였다. 유리기관 위에 형성한 양전극 박막을 포토리소그래피법을 이용하여 양전극 패턴을 제작하였다. 양전극 패턴을 형성한 후에 증류수, 아세톤, 메탄올, IPA 및 증류수 순으로 잔여 PR (photoresist) 또는 미립자 (particle)를 제거하기 위해 초음파 세정 후 질소로 수분을 제거하고 오븐에서 건조시켰다. 양전극 위에 유기물을 증착하기 전에 양전극의 일함수를 증가시키기 위해서 O₂ 플라즈마를 이용하여 표면처리를 하였다. 공정 조건은 O₂를 25 sccm 으로 주입하였고 공정압력은 6.0×10⁻³ Torr 에서 50 W 로 300 초 동안 실시하였다.

유기물이 고분자일 경우에는 인쇄방법²⁰으로 도포하기도 하나 본 연구에서는 저분자를 이용하였으므로 진공증착법으로 도포하였다. 정공수송층으로 NPB (N,N'-di(naphthalene-1-yl)-N,N'-diphenylbenzidine)와 발광층으로 Alq₃ (tris (8-hydroxyquinoline))를 증착 후 음전극을 다단계 증착에 의해 진공증착하였다. NPB 의 두께는 60 nm 이었고 Alq₃ 의 두께는 40 nm 이었다. 모든 증착 공정은 4×10⁻⁶ Torr 이하의 고진공에서 수행 되었으며, 유기물 증착속도는 약 0.3~1 Å/s 사이로 조절하였다. 음전극으로부터 Alq₃ 층으로 주입되는 전자의 양을 증가시키기 위해서 음전극과 Alq₃ 사이에 전자주입층인 LiF 를 진공증착하였다. 음전극으로는 Al, Ag, Al:Ag 의 세가지 물질을 채택하였다. Al 의 경우에는 LiF 박막을 0.1 Å/s 의 증착율로 10 Å 두께로 증착한 후에 Al 을 1.0 Å/s 의 증착율로 250 Å 두께로 증착하였고, Ag 의 경우는 LiF 를 10 Å 두께로 증착한 후에 Ag 를 1 Å/s 증착율로 250 Å 두께로 증착하였다. Al:Ag 은 LiF 를 증착한 후에 Al 은 20 Å/s 의 증착율로 증착하였고 Ag 은 1 Å/s 의 증착율로 280 Å 두께로 증착하였다. 제작된 소자의 기본 구조는 양전극/NPB/Alq₃/LiF/음전극이었다.

제작된 소자의 특성 평가를 위한 실험은 Minolta 사의 CS-1000 측정 장비를 이용하여 EL (electroluminescence) 스펙트럼과 색좌표 특성을 평가하였고 Keithley 사의 Sourcemeeter 와 Photodetector 를 이용하여 전류밀도-전압-광출력 특성으로부터 외부양자효율 특성을 얻을 수 있다.

4. 결과 및 고찰

그림 2 는 양전극이 Ni 이고 음전극이 Al, Ag,

또는 Al:Ag 인 세가지 구조의 소자에 대해 EL 스펙트럼에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 음전극이 Al 일 경우보다 Ag 나 Ag:Al 일 경우가 상대적으로 발광 세기가 높았다. 색의 순도에 영향을 미치는 반폭치도 Ag:Al 의 경우가 가장 좁았다. 그러므로 Ni 이 양극으로 사용되면서 Ag:Al 이 음극으로 사용되었을 때 가장 좋은 발광 스펙트럼을 보여주었다.

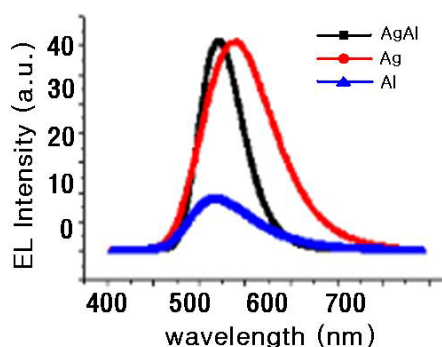


Fig. 2 Simulation results for EL spectra of OLEDs with anode of Ni and cathodes of Al, Ag or Al:Ag

그림 3 은 양전극이 Au 이고 음전극이 Al, Ag 및 Al:Ag 인 세가지 구조의 소자에 대해 EL 스펙트럼을 시뮬레이션한 결과를 보여주고 있다. 상대적으로 발광 세기를 보면 양극이 Ni 일 때 보다 상대적으로 더 높은 것을 보여주고 있다. 이것은 Au 의 일함수가 Ni 보다 크기 때문에 정공 주입능력이 높기 때문으로 여겨진다. 양전극이 Ni 와 Au 일 때 발광 스펙트럼을 보면 잘 알려진 Alq₃ 의 발광 스펙트럼인 515 nm 보다 긴 파장 쪽으로 이동된 것을 확인할 수 있었다. 이것은 마이크로 캐비티 효과에 의한 것으로 추정할 수 있다.

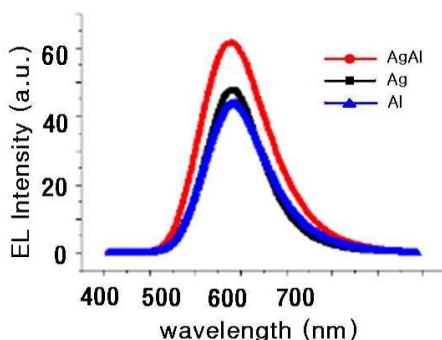


Fig. 3 Simulation results for EL spectra of OLEDs with anode of Au and cathodes of Al, Ag or Al:Ag

그림 4 는 Ni 와 Au 중 더 높은 발광 세기를 보여준 Au 를 양전극으로 하고 Al, Ag, 및 Al:Ag 중 더 높은 발광 세기를 보여준 Al:Ag 를 음전극으로 하여 유기물 층 두께 변화에 따른 캐비티 효과를 시뮬레이션한 결과이다. NPB 와 Alq₃ 의 두께 비는 51 nm:34 nm(전체 85 nm), 60 nm:40 nm(전체 100 nm), 72 nm:48 nm(전체 120 nm), 99 nm:61 nm(전체 160nm) 이었다. NPB 와 Alq₃ 층의 전체 두께가 120 nm 일 때 가장 높은 빛의 세기를 보여주었으며 100 nm 일 때도 높은 빛의 세기를 보여주었다. 반면에 85 nm, 140 nm, 및 160 nm 일 때에는 매우 약한 빛의 세기를 나타내었다. 반면에 유기물층의 두께가 두꺼울수록 마이크로 캐비티 효과에 의해 파장이 긴 쪽으로 이동한 것을 보여주고 있다.

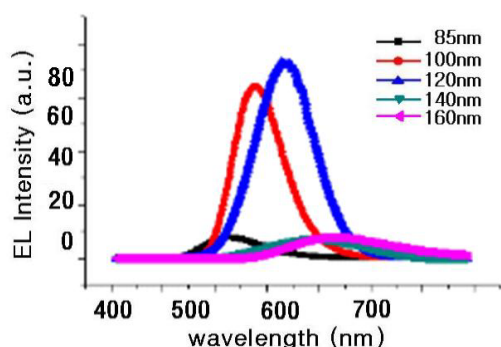


Fig. 4 Simulation results for EL spectra of OLEDs with anode of Au and cathode of Al:Ag as a function of thickness of organic layers

시뮬레이션 결과 양전극이 Au 일 때 좋은 발광 스펙트럼을 보여주었기 때문에 양전극이 Au 이고 음전극이 Al, Ag 및 Al:Ag 인 소자를 제작하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 그림 5 는 제작된 소자의 EL 스펙트럼을 보여주고 있다. 소자를 제작하여 측정된 EL 스펙트럼이 시뮬레이션한 결과와 유사한 경향성을 갖는 것을 알 수 있다. 음전극이 Al:Ag 일 때 가장 높은 발광 세기를 보여주고 있고 다음에 Ag 와 Al 순으로 발광 세기가 감소되고 있는 것을 보여주고 있다.

양극을 Au 로 하고 음극을 Al:Ag 로 하였을 때 유기물층의 두께를 변화시키면서 소자를 제작하여서 마이크로 캐비티 효과에 의한 발광 스펙트럼의 피크값 이동을 조사하였다. 유기물층의 두께는 시뮬레이션과 같이 NPB 와 Alq₃ 의 두께

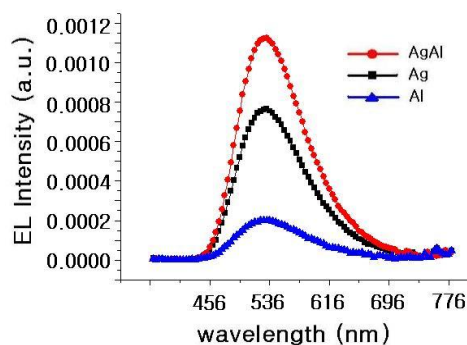


Fig. 5 EL spectra of OLEDs with anode of Au and cathodes of Al, Ag or Al:Ag

비를 51 nm:34 nm(전체 85 nm), 60 nm:40 nm(전체 100 nm), 72 nm:48 nm(전체 120 nm), 99 nm:61 nm(전체 160 nm)로 하여 제작하였다. 그림 6 은 제작된 소자의 유기물층의 두께 변화에 따른 발광 스펙트럼 변화를 보여주고 있다. 두께가 다른 유기물층을 가지는 OLED 의 발광 세기와 반폭치를 조사하였다. 발광세기는 유기물층의 두께가 120 nm 일 때 우수하였으나 색 순도에 영향을 주는 반폭치는 100 nm 일 때 우수한 것을 알 수 있다. 유기층 두께가 두꺼워 질수록 피크값이 긴 파장 쪽으로 이동하는 것은 마이크로캐비티 효과가 발생하였다는 것을 나타낸다. 그림 6 의 실험 결과는 그림 3 의 시뮬레이션 결과와 대체적으로 일치하고 있는 것을 보여주고 있다.

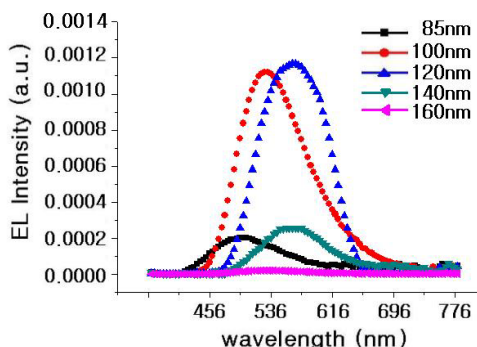


Fig. 6 EL spectra of OLEDs with anode of Au as a function of thickness of organic layers

5. 결론

TE-OLED 의 마이크로 캐비티 효과에 의한 광학적 특성을 분석하기 위해서 전자기 이론을 기초

로 하여 발광 시뮬레이션을 실시하였다. 양전극으로는 Ni 와 Au 를 사용하였고 음전극으로는 Al, Ag 및 Al:Ag 를 사용하여 OLED 소자를 제작하였다. 유기물질로는 정공수송층으로 NPB 와 전자수송층과 발광층으로 Alq₃ 를 이용하였다. 유기물층은 양전극과 음전극 사이에 위치하게 하였다. EL 스펙트럼 측정 결과 양전극으로는 Au 가 Ni 보다 높은 발광 특성을 보여주었고 음전극으로 Al:Ag 를 이용하였을 때 더 높은 발광 특성을 보여주었다. 또한 색의 순도를 결정하는 반폭치의 경우 음극이 Al:Ag 일 때 가장 적은 것으로 나타났다. 유기물층의 두께가 120 nm 일 때 가장 높은 발광 세기를 보여주었고 색순도를 결정하는 반폭치는 유기물층의 두께가 100 nm 일 때 가장 좋은 결과를 보여주었다. 유기물 층 두께가 두꺼워 질수록 마이크로 캐비티 효과에 의해 긴 파장 쪽으로 EL 스펙트럼이 이동하는 것으로 보여주었다. 시뮬레이션 결과는 실제 소자를 제작하여 측정한 결과와 유사한 결과를 얻었다.

참고문헌

1. Tang, C. W. and VanSlyke, S. A., "Organic electroluminescent diodes," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 51, pp. 913-915, 1987.
2. Tang, C. W., VanSlyke, S. A., and Chen, C. H., "Electroluminescence of doped organic thin films," *J. Appl. Phys.*, Vol. 65, pp. 3610-3616, 1989.
3. Meng, Z. and Wong, M., "Active-matrix organic light-emitting diode displays realized using metal-induced unilaterally crystallized polycrystalline silicon thin-film transistors," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 49, No. 6, pp. 991-996, 2002.
4. Kijima, Y., Asai, N., Kishii, N., and Tamura, S., "RGB luminescence from passive-matrix organic LED's," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 44, No. 8, pp. 1222-1228, 1997.
5. Hong, Y., Nahm, J.-Y., and Kanicki, J., "100 pi 4-a-Si:H TFTs active-matrix organic polymer light-emitting display," *IEEE J. Sci. Topics Quantum Electron.*, Vol. 10, No. 1, pp. 16-25, 2004.
6. Jackson, T. N., Lin, Y.-Y., Gundlach, D. J., and Klauk, H., "Organic thin-film transistors for organic light-emitting flat-panel display backplanes," *IEEE J. Sci. Topics Quantum Electron.*, Vol. 4, No. 1, pp. 100-104, 1998.
7. Peng, H., Sun, J., Zhu, X., Yu, X., Wong, M., and Kwok, H.-S., "High efficiency microcavity top-emitting organic light-emitting diodes using silver anode," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, No. 7, Paper No. 073517, 2006.
8. Wu, C. C., Hsieh, P. Y., Lin, C. L., and Chiang, H. H., "Methodology for optimizing viewing characteristics of top-emitting organic light-emitting devices," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 84, pp. 3966-3968, 2004.
9. Chang, C.-H., Cheng, H.-C., Lu, Y.-J., Tien, K.-C., Lin, H.-W., Lin, C.-L., Yang, C.-J., and Wu, C.-C., "Enhancing color gamut of white OLED displays by using microcavity green pixels," *Org. Electron.*, Vol. 11, pp. 247-254, 2010.
10. Chang, P. C. Y., Walker, J. G., and Hopcraft, K. I., "Ray tracing in absorbing media," *J. Quant. Spec. Rad. Transfer*, Vol. 96, pp. 327-341, 2005.
11. Centurioni, E., "Generalized matrix method for calculation of internal light energy flux in mixed coherent and incoherent multilayers," *Appl. Opt.*, Vol. 44, pp. 7532-7539, 2005.
12. Katsidis, C., Katsidis, C., and Siapkas, D. I., "General transfer-matrix method for optical multilayer systems with coherent, partially coherent, and incoherent interface," *Appl. Opt.*, Vol. 41, pp. 3979-3987, 2002.
13. Bathelt, R., Buchhauser, D., Garditz, C., Paetzold, R., and Wellmann, P., "Light extraction from OLEDs for lighting applications through light scattering," *Organ. Electron.*, Vol. 8, pp. 293-299, 2007.
14. Lide, D. R., "Handbook of Chemistry and Physics," CRC Press, pp. 12-133-12-150, 2004.
15. Mishra, A., Periasamy, N., Patankar, M. P., and Narasimhan, K. L., "Synthesis and characterization of soluble aluminum complex dyes based on 5-substituted-8-hydroxyquinoline derivatives for OLED applications," *Dyes and Pigments*, Vol. 66, pp. 89-97, 2005.
16. Himcinschi, C., Meyer, N., Hartmann, S., Gersdorff, M., Friedrich, M., Johannes, H.-H., Kowalsky, W., Schwambara, M., Strauch, G., Heuken, M., and Zahn, D. R. T., "Spectroscopic ellipsometric characterization of organic films obtained via organic vapor phase deposition," *Appl. Phys. A*, Vol. 80, pp. 551-555, 2005.
17. Himcinschi, C., Hartmann, S., Janssen, A., Meyer, N.,

- Friedrich, M., Kowalsky, W., Zahn, D. R. T., and Heuken, M., "Thin organic heterostructures deposited via organic vapor phase deposition: spectroscopic ellipsometry characterization," *J. Crystal Growth*, Vol. 275, pp. e1035-e1040, 2005.
18. Masenelli, B., Gagnaire, A., Berthelot, L., Tardy, J., and Joseph, J., "Controlled spontaneous emission of a tris (8-hydroxyquinoline) aluminum layer in a microcavity," *J. Appl. Phys.*, Vol. 85, pp. 3032-3037, 1999.
19. Djurišić, A. B., Kwong, C. Y., Guo, W. L., Lau, T. W., Li, E. H., Liu, Z. T., Kwok, H. S., Lam, L. S. M., and Chan, W. K., "Spectroscopic ellipsometry of the optical functions of tris (8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq_3)," *Thin Solid Films*, Vol. 416, pp. 233-241, 2002.
20. Kim, C. H., Kim, M. S., You, H. I., Choi, B.-O., Lee, S.-H., and Kim, D. S., "Roll-to-Roll Contact Printer with Multiple Printing Methods," *J. of the KSPE*, Vol. 27, No. 9, pp. 7-10, 2010.