OLED 소자의 특성에 미치는 밀봉 버퍼용 고분자박막의 영향

이봉섭, 주성후, 양재웅*

경기도 포천시 선단동 대진대학교 공과대학 신소재공학과

The Effect of Polymer Thin Film for Sealing Buffer on the Characteristics of OLED Device

Bong Sub Lee, Sung Hoo Ju, Jae Woong Yang*

Department of Advanced Materials Science and Engineering, Daejin University, Seondan-dong, Pocheon-si, Kyonggi-do 487-711, Korea

(Received June 13, 2008 ; revised June 26, 2008 ; accepted June 29, 2008)

Abstract

In this paper, the LiF and polymer thin film as passivation layer have been evaporated on green OLED devices. HDPE, polyacenaphthylene, polytetrafluoroethylene, poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide), polysulfone and poly(dimer-acid-co-alkyl poly-amine) have been used as polymer materials. The optical transmittance of evaporated polymer thin film was very good as an above 90% in visible range. The morphology of polymer thin film was measured by AFM. As a result of the measurement average roughness(R_a) value of the polysulfone was very low as 2.2 nm. The green OLED devices with a structure of ITO/HIL/HTL/EML/Buffer/Al in series of various passivation films were fabricated and analyzed. It was observed that an OLED device with LiF as first passivation film has shown the good electrical and optical property, and all kind of polymer films did not influence on the I-V-L characteristics and the life time of OLED devices. Therefore, we found that polymer layer played a key role as a buffer layer between the inorganic passivation layers to relieve the stress of the inorganic layers.

Keywords: OLED, Passivation, Thin film, Polymer, Inorganic

1. 서 론

정보통신 및 컴퓨터의 발달과 함께 디스플레이 산업이 급속히 발전함에 따라 다양한 종류의 평판 디스플레이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그 중 유기발광디스플레이(Organic Light Emitting Display: OLED)는 높은 발광휘도, 빠른 응답속도, 넓은 시야각, 얇은 두께, 저소비 전력 및 단순한 소자구조와 제조공정으로 인해 액정디스플레이(Liquid Crystal Display: LCD), 플라즈마 디스플레이(Plasma Display Panel: PDP)를 대체할 차세대 디스플레이로 각광받고 있다¹⁻⁴⁾.

OLED 소자는 대기 중의 수분 및 산소에 상당히

취약하기 때문에 수분이나 산소에 노출될 경우 수분과 산소에 상당히 민감하게 반응을 하며, 전극으로 쓰인 금속물질은 대기 중의 산소나 수분에 노출되면 쉽게 산화된다^{2,5-8)}. 이러한 문제를 해결하기 위하여 OLED 소자를 제작한 후 산소나 수분의 침투를 방지할 수 있는 유리나 금속 캡을 사용하여 봉지를 한다^{2,9)}. 그러나 이와 같은 봉지방법은 OLED 소자의 두께와 무게를 증가시키고, 제작비용의 증가와 대면적 디스플레이 적용의 어려움, 특히 미래 디스플레이로 예상되는 플렉서블 디스플레이의 제작에 적용할 수 없다는 문제점을 안고 있다. 따라서 현재는 다양한 방법을 사용하여 만들어진 박막을 이용한 OLED 소자의 봉지 방법에 관한 연구가 많이 진행되고 있다^{2,10-17)}.

본 연구에서는 위의 문제를 해결하기 위하여 박

*Corresponding author. E-mail : jwyang@daejin.ac.kr

막을 사용한 OLED의 봉지 방법을 적용하였다. 박막 봉지방식으로 OLED의 손상을 없게 하고, 진공 상태에서 연속 공정이 가능하게 하기 위하여 모든 박막을 증착에 의하여 형성하는 저항가열 진공 증착법을 이용하여 무기막(LiF, Al) 및 다양한 종류의 고분자 보호막을 형성하였다. 고분자막을 열 증착하기 위해 자체적으로 고안한 보트를 사용하였고, ITO 유리위에 고분자막을 형성한 후 광학현미경과 원자현미경(Atomic Force Microscope: AFM)을 이용하여 형성된 막의 상태를 확인하였고, 막의 광 흡수도를 측정하여 막의 투과도를 분석하였다. 또한 봉지막이 소자에 미치는 영향을 조사하기 위하여 OLED 소자를 제작한 후 그 위에 연속공정으로 LiF 및 고분자막을 증착하여 제작한 OLED 소자의 전류-전압-휘도(Current-Voltage-Luminance: I-V-L) 특성을 측정하여 각각 다른 봉지막을 적용한 소자의 광학적, 전기적 특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

OLED 소자 제작을 위한 기판으로 100 mm x 100 mm 크기의 유리를 사용하고, 그 위에 투명전도막인 양극전극으로 두께 150 nm, 면저항 $12\Omega/\square$, 표면평탄도 10 Å인 ITO(Indium Tin Oxide)를 아세톤, 이소프로필알콜 및 초순수 물로 세정하여 사용하였다. 세정된 기판위에 감광제를 스핀코팅 방법으로 코팅하고, 패턴이 형성된 포토 마스크를 ITO 기판 위에 올려놓고 자외선을 조사하여 ITO의 패턴을 형성하였으며, 그 위에 절연성을 가지는 감광제를 사용하여 3 mm x 3 mm 크기의 발광화소를 구성하였다.

패턴이 형성된 기판위에 유기막 증착을 원활히 하기 위하여 자외선(Ultra-Violet: UV)을 조사하여 기판 표면을 활성화하고, 그 위에 10^{-7} torr의 진공도에서 다층의 유기막을 증착하여 OLED 소자를 제작하였다. 제작한 OLED 소자는 ITO(150 nm)/정공주입층/정공수송층/발광층 및 전자수송층/완충층/음극전극 구조로 녹색발광 소자를 제작하였다. 각 층은 정공주입층으로 ELM200을 1.5 Å/sec의 증착률로 50 nm, 정공수송층으로 NPB를 1.5 Å/sec의 증착률로 30 nm, 발광층 및 전자수송층으로 Alq₃를 1.5 Å/sec의 증착률로 50 nm, 완충층으로 LiF를 0.1 Å/s의 증착률로 0.5 nm 증착하고, 최종적으로 음극전극을 형성하기 위하여 Al을 5 Å/sec의 증착률로 100 nm 증착하였다. 제작된 OLED 소자의 구조를 그림 1에 나타내었다.

제작한 OLED 소자의 봉지를 위하여 무기 박막

Fig. 1. Structure of fabricated OLED.

으로 LiF와 Al을 사용하였고, 고분자 박막으로는 액상의 광 경화성 고분자 수지, poly(1,4-phenylene sulfide), polystyrene, [2.2]paracyclophan, high density polyethylene(HDPE), polyacenaphthylene, polytetrafluoroethylene, poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide), polysulfone, poly(dimer-acid-co-alkyl poly-amine)을 사용하였다. LiF와 Al은 일반적으로 판매되고 있는 텅스텐(W) 보트를 이용하였고, 고분자 물질은 자체 설계 제작된 망(200-mesh)이 설치된 다단계의 W-Boat에 의해 진공 증착하였다.

ITO 기판위에 형성된 고분자막의 표면은 광학현미경(Olympus사의 BX51)과 AFM(PSIA사의 XE-100)을 사용하여 측정하였고, 광학적 투과성을 확인하기 위하여 광 흡수도를 측정하였다. OLED에 대한 무기막과 고분자막의 영향은 OLED 소자위에 LiF막 및 각각의 고분자막을 증착하여 I-V-L 특성을 측정하였다. I-V-L 특성 측정을 위하여 OLED의 양극인 ITO에 (+) 전압을 인가하고, 음극인 Al에 (-) 전압을 인가하는 전원 인가 장치로 Keithley 2400을 사용하였고, 발광휘도 및 스펙트럼은 PR-650 Spectra-Scan Spectra-Colorimeter를 사용하여 측정하였다. 또한 OLED의 수명은 정전압소스(Programmable Power Supply HM7044)와 휘도계(CS-100)를 사용하여 측정하였다.

3. 결 과

OLED의 봉지에 사용할 수 있는 박막을 형성하기 위하여 ITO가 증착된 기판위에 고분자 물질을 진공증착법에 의하여 가열 증착하였다. 증착에 사용한 고분자 물질은 녹는점이 낮고, 분자량이 적은 것으로 (a) high density poly ethylene(HDPE), (b) poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide), (c) poly tetrafluoroethylene, (d) polyacenaphthylene, (e) polysulfone, (f) poly(dimer-acid-co-alkyl polyamine), (g) poly(1,4-phenylenesulfide), (h) polystyrene, (i) [2.2]

Fig. 2. Microscope image of thermal evaporated polymer on ITO glass (a) high density poly ethylene (HDPE), (b) poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide), (c) poly tetrafluoroethylene, (d) polyacenaphthylene, (e) polysulfone, (f) poly(dimer-acid-co-alkyl polyamine), (g) poly(1,4-phenylenesulfide), (h) polystyrene, (i) [2.2]paracyclophan, (j) UV epoxy.

paracyclophan, (j) UV epoxy 등이었고, 이 고분자 물질을 증착하여 얻어진 박막의 광학현미경 사진을 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 광학현미경 사진에서 그림 (a)~(h)의 왼쪽은 ITO 기판의 표면을 보여준 것이고 그림의 오른쪽은 고분자 막을 보여준 것이다. 그림에서 (a)~(f)는 고분자 박막이 균일하고 깨끗하게 형성되었음을 확인할 수 있었고, (f) poly(dimer-acid-co-alkyl polyamine)는 증착된 막이 충분히 경화되지 못하여 추가적인 공정으로 UV를 사용한 경화과정을 필요로 하였으며, (g)~(j)는 형성된 고분자 박막의 표면이 매우 불균일하게 형성되어 있음을 볼 수 있었다. 따라서 물질 (a)~(f)는 저항가열 진공증착법에 의하여 균일한 박막을 형성할 수 있어 OLED의 보호막형성을 위한 고분자 물질로 사용이 가능하나, (g)~(j)는 진공증착방법에 의하여 균일한 박막을 형성할 수 없어 OLED의 보호막용 고분자 물질로 사용할 수 없다는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1. AFM measurement value of various polymer thin films

Material	R_a	R_{rms}	R_{pv}
HDPE	20.0	24.8	235.8
polytetrafluoroethylene	8.3	10.3	89.7
poly(dimer-acid-co-alkyl polyamine)	4.2	5.2	42.8
polyacenaphthylene	2.9	3.5	25.4
poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide)	2.4	3.0	58.9
polysulfone	2.2	2.8	16.8

증착된 고분자 박막 중 광학현미경에서 표면의 균일도가 우수한 (a)~(f)의 표면형상을 원자현미경으로 측정하여 표면의 평탄도를 구하여 표 1에 나타내었다. 표 1에 나타낸 R_a 는 표면의 평균 평탄도를 의미하는 값이고, R_{rms} 는 표면의 제곱평균 근(root mean square) 평탄도를 의미하는 값이며, R_{pv} 는 최대점과 최저점(peak to valley)의 평탄도를 의미하는 값이다. 측정된 결과 표면의 평탄도(R_a)는 HDPE의 경우 20.0 nm를 나타내어 사용한 고분자 물질 중 표면이 가장 거칠게 형성된 결과를 나타내고 있고, polyacenaphthylene과 polysulfone은 2.9 nm과 2.2 nm로 사용한 고분자 물질 중 가장 완만한 표면 평탄도를 나타내었다. 기판으로 사용한 ITO 기판의 표면 평탄도가 1~2 nm임을 고려하면 ITO 기판위에 성막한 polyacenaphthylene과 polysulfone의 표면 평탄도는 매우 완만함을 알 수 있었다. 표면의 평탄도는 OLED의 보호막 형성을 위하여 다층 박막을 연속적으로 증착할 경우 연속되는 박막에 영향을 줄 수 있으므로 완만한 표면 평탄도를 가진 물질이 보다 적합한 것으로 판단된다.

박막을 이용하여 OLED를 봉지하는 경우 플렉시블(flexible) 디스플레이의 적용가능성과 상면발광(top emission) OLED 소자로의 응용가능성을 가지고 있다. 이러한 목적을 충족하기 위하여 보호막으로 사용되는 각각의 박막이 투명성을 가져야 한다. 따라서 증착방법에 의하여 형성한 6가지 종류의 고분자 박막에 대한 광 흡수도를 측정하여 그림 3에 나타내었다. 광 흡수도의 측정 범위는 300~900 nm로 가시광선의 모든 범위를 포함하여 측정하였다. 광 흡수도의 측정 결과 polyacenaphthylene의 경우 단파장영역인 300~500 nm의 파장에 대하여 흡수도가 최대 60%로 좋지 않은 투과도를 가지고 있어 광 투과를 필요로 하는 보호막으로는 적합하지 않음을 알 수 있었다. 그러나 그 이외의 모든 고분자 물질의 박막은 가시광선 영역인 400~800 nm 범위에서 10% 이하의 낮은 흡수를 하여 90% 이상의 높은 광 투과도를 가지고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 3. Visible light absorption spectra of polymer films.

OLED의 보호막으로서 적용성을 평가하기 위하여 무기막으로 (a) LiF를 사용하였고, 고분자막으로 (b) high density poly ethylene(HDPE), (c) poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide), (d) poly tetrafluoroethylene, (e) polyacenaphthylene, (f) polysulfone, (g) poly(dimer-acid-co-alkyl polyamine) 등의 물질을 사용하여 OLED 소자위에 각각의 막을 300 nm 두께로 증착하여 봉지한 OLED 소자와 유리캡을 사용하여 봉지한 OLED 소자의 휘도-전압 특성을 그림 4에 나타내었다. 이 때 특성 비교를 정확하게 하기 위하여 모든 보호막에 대하여 각각 동일한 기판에서 제작한 OLED 소자를 유리 봉지와 보호막 봉지를 실시하였다. 그림 4(a)의 경우 OLED 위에 LiF를 300 nm 성막한 것으로 13.5 V의 인가전압에서 전류밀도가 유리 캡을 사용하여 봉지한 경우 170 mA/cm^2 에서 LiF를 성막한 경우 398 mA/cm^2 로 약 2.3배 증가하였고, 발광휘도는 $6,972 \text{ cd/m}^2$ 에서 $20,444 \text{ cd/m}^2$ 로 약 2.9배 증가하였다. 이와 같이 OLED 제작 후 LiF 박막을 증착한 경우 LiF의 두께를 200 nm와 400 nm 증착한 경우에서도 300 nm를 증착한 경우와 유사하게 동일한 인가전압에서 전류밀도와 발광휘도가 증가한 결과를 나타내었다. 따라서 OLED 제작 후 LiF 막의 형성은 소자의 구동전압을 낮출 수 있으며, 동일한 전압에서는 보다 높은 전류를 흐르게 할 수 있어 발광휘도가 향상된다. 그림 4(b)~(g)까지의 OLED 위에 고분자를 300 nm 성막한 경우에는 6가지의 물질에서 약간의 차이는 보이고 있으나 유리 캡을 사용하여 봉지한 경우와 고분자 막을 증착한 경우가 큰 차이를 보이지 않고 거의 유사한 결과를 나타내었다. 이 결과로부터 증착에 사용한 6가지 종류의 고분자 막은 물질의 증착과정 및 고분자 막이 성막된 후에도

Fig. 4. Luminance of OLED versus driving voltage (a) LiF, (b) high density poly ethylene(HDPE), (c) poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide), (d) poly tetrafluoroethylene, (e) polyacenaphthylene, (f) polysulfone, (g) poly(dimer-acid-co-alkyl polyamine). (solid line : based OLED, dotted line : OLED evaporated with each materials).

OLED에 어떠한 영향을 주지 않은 결과이다. 따라서 증착에 사용한 고분자 물질은 OLED에 영향을 주지 않고 보호막 형성공정의 용력완화용 완충층으로 사용이 가능하다는 결과를 얻을 수 있었다.

무기막을 OLED 소자위에 두겹게 형성할 경우 소자에 미치는 영향을 조사하기 위해 OLED 소자 위에 형성한 박막으로 우수한 특성을 보인 LiF의 무기막을 $2 \mu\text{m}$ 의 두께로 성막한 OLED 소자의 수명을 측정하여 그림 5에 나타내었다. 수명측정은 초기 휘도를 500 cd/m^2 로 설정하고 휘도가 초기휘도의 절반이 되는 250 cd/m^2 로 될 때까지의 시간을 측정하였다. 무기막이 두꺼워지면 두께에 비례하여 보호막으로의 특성이 향상될 것으로 생각되지만 그림 5의 결과는 봉지를 하지 않은 소자보다도 수명이 감소하는 것을 나타내고 있다. 이 현상은 무기막 두

Fig. 5. Half life time of OLED by (a) non-encapsulation and (b) LiF 2 μ m encapsulation.

계가 증가하면 무기막 내부의 응력이 증가하여 강한 응력의 특성을 가진 무기막에 의해 보호막으로 형성한 무기막에 균열이 발생하거나 또는 하부층과의 계면 특성에 의하여 OLED 소자를 손상시켜 특성저하를 일으키는 것으로 설명할 수 있다¹⁸⁾. 따라서 OLED 소자의 보호막을 형성할때 무기막을 두 겹께 형성할 수 없게 된다. 이 결과로부터 우수한 방습 특성을 가지는 보호막을 형성하기 위하여 소자의 손상을 방지하고 응력을 해소할 수 있는 다층막 제작이 필요하게 되고, 무기막 사이의 응력해소를 위한 완충층이 필요하다.

다층 보호막의 소자 보호특성을 조사하기 위하여 보호막으로 LiF와 표면 평탄도가 가장 우수한 polysulfone을 증착하여 제작한 OLED 소자의 수명 특성을 측정하여 그림 6에 나타내었다. 보호막 효

Fig. 6. Half life time of OLED passivated with (a) none, (b) LiF/polysulfone, (c) LiF/polysulfone/LiF/polysulfone, (d) LiF/polysulfone/LiF/polysulfone/LiF/polysulfone layers.

과를 비교하기 위하여 소자는 (a) 보호막을 형성하지 않은 경우, (b) 보호막으로 LiF/polysulfone을 형성한 경우, (c) LiF/polysulfone/LiF/polysulfone을 형성한 경우, (d) LiF/polysulfone/LiF/polysulfone/LiF/polysulfone을 형성한 경우의 4가지 종류로 OLED 소자를 제작하여 수명을 측정하였다. 보호막을 형성하지 않은 경우와 비교하여 보호막을 형성한 경우에 소자의 수명이 12시간에서 16시간으로 증가하였으나, 적층된 막의 수를 증가시켜도 수명이 증가하지 않은 결과가 나타났다. 이 결과는 보호막을 적층하면 수분의 침투를 줄일 수 있다는 일반적인 논리와는 다른 결과로 LiF와 polysulfone의 박막이 방습특성을 갖추지 못하여 나타난 결과로 해석할 수 있다. 그러나 3개 층의 무기막이 적층되었음에도 소자의 손상은 발생되지 않았다. 이 결과에서 polysulfone이 방습막으로의 역할은 하지 못하나 응력완화용 완충층으로는 중요한 역할을 할 수 있음을 확인할 수 있었다.

따라서 LiF보다는 수분의 침투를 방지할 수 있는 금속 박막인 Al을 보호막 층으로 사용하여 제작한 OLED 소자의 수명을 측정하여 그림 7에 나타내었다. Al과 polysulfone의 적층에 의한 보호막 효과를 비교하기 위하여 OLED 소자위에 (a) 보호막을 형성하지 않은 경우, (b) LiF/polysulfone/Al/polysulfone을 형성한 경우, (c) LiF/polysulfone/Al/polysulfone/Al/polysulfone을 형성한 경우의 3가지 경우로 분류하여 OLED 소자를 제작하였고, 그 소자의 수명을 측정하였다. 보호막을 형성하지 않은 경우의 수명인 12시간과 비교하여 LiF/polysulfone/Al/polysulfone으로 보호막을 형성한 경우 소자의 수명이 46시간으로 증가하였으며, 또한 LiF/polysulfone/Al/polysulfone/

Fig. 7. Half life time of OLED passivated with (a) none, (b) LiF/polysulfone/Al/polysulfone, (c) LiF/polysulfone/Al/polysulfone/Al/polysulfone layers.

Al/polysulfone로 보호막을 형성한 경우 소자의 수명이 60시간으로 증가하였다.

LiF 및 Al 무기 보호막 비교실험을 통한 결과에서 알 수 있듯이 고분자 층은 보호층의 역할은 하지 못하나 무기보호막으로 형성하는 물질에 대한 응력을 완화시킬 수 있는 완충층의 역할은 충분히 수행할 수 있는 것으로 판단된다. 따라서 초박형의 OLED 제작 및 OLED를 플렉시블 디스플레이로 활용하기 위하여 필수적인 유연성을 가지는 박막 봉지 기술의 개발에서 저항 가열법에 의하여 증착한 고분자막이 무기 보호막 사이의 응력을 완화하는 중요한 역할을 할 수 있어 다층 박막으로 방습특성을 가지는 보호막 형성이 가능하게 되었다.

4. 결 론

박막을 이용한 OLED의 보호막 특성을 연구하기 위하여 OLED의 기본소자를 ITO/정공주입층/정공수송층/발광층 및 전자수송층/LiF/Al의 구조로 제작한 후 보호막을 형성하는 방법으로 OLED 소자를 제작하였다. 저항가열 진공증착법에 의하여 고분자 박막을 형성할 수 있는 고분자 물질을 선정하기 위하여 녹는점이 낮고, 분자량이 적은 고분자 물질의 증착시험을 한 결과 high density poly ethylene (HDPE), poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide), poly tetrafluoroethylene, polyacenaphthylene, polysulfone, poly(dimer-acid-co-alkyl polyamine)가 균일한 박막을 얻을 수 있었고, 표면의 평탄도는 polysulfone이 가장 우수한 2.2 nm의 평균 표면 평탄도를 나타내었고, 광 투과도는 가시광선 영역에서 모든 물질이 90% 이상의 높은 값을 나타내었다.

무기막과 고분자 물질 박막의 소자 영향을 평가하기 위하여 OLED 소자위에 LiF와 증착이 가능한 6종류의 고분자 박막을 형성하였다. 그 결과 OLED 소자위에 LiF를 첫 번째 층으로 증착한 경우에는 낮은 인가전압에서 높은 발광휘도를 나타내는 결과를 얻을 수 있었고, 6종류의 고분자 막을 첫 번째 층으로 증착한 경우에는 OLED 소자의 특성에는 특별한 변화가 없었다. 이것은 고분자 물질이 OLED 소자에는 어떠한 영향도 미치지 않고 있음을 나타낸 결과이다.

OLED 소자에 대한 보호막 특성을 측정하기 위하여 표면의 평탄도 특성이 가장 우수한 polysulfone을 선정하여 먼저 OLED/LiF/polysulfone/LiF/polysulfone/LiF/polysulfone 구조로 제작하여 소자의 수명을 측정하였다. 그 결과 보호막을 형성함에 따라 소자의 수명은 12시간에서 16시간으로 증가하였으나 다층

을 형성한 경우에도 소자의 수명은 증가하지 않았다. 이 결과는 LiF와 polysulfone이 방습특성을 가지지 않아 나타난 결과이고, 다층을 증착하여도 소자의 손상은 없는 것으로 관측되어 polysulfone이 무기 다층막 형성의 응력완화를 위한 완충층으로 작용하고 있음을 확인할 수 있었다. 다음으로 수분의 방습특성이 우수한 것으로 알려져 있는 금속인 Al을 적층한 OLED/LiF/polysulfone/Al/polysulfone/Al/polysulfone 구조로 OLED 소자를 제작하여 수명을 측정한 결과 보호막이 없는 경우 소자의 수명이 12시간에서 보호층의 수가 증가함에 따라 소자의 수명이 증가하여 60시간까지 증가하였다. 이 결과는 polysulfone이 다층박막 형성의 응력 완화층으로 역할을 수행하고 다수의 층을 형성함으로써 OLED 소자의 수명을 확보할 수 있음을 보여준 결과이다. 따라서 OLED 소자에 적용할 수 있는 박막 보호막 형성 기술 개발에 의하여 향후 플렉시블 디스플레이에도 고분자막이 응용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2007년도 대전대학교 학술연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. C. W. Tang, S. A. VanSlyke, Appl. Phys. Lett., 51 (1987) 913.
2. S. H. Ju, J. of IEEME, 19(8) (2006) 758.
3. Z. Y. Xie, L. S. Hung, Appl. Phys. Lett., 84(7) (2004) 1207.
4. C. N. Li, A. B. Djurišić, C. Y. Kwong, P. T. Lai, W. K. Chan, S. Y. Liu, Appl. Phys. A, 80 (2005) 301.
5. H. Aziz, Z. Popovic, C. P. Tripp, N. Hu, A. Hor, G. Xu, Appl. Phys. Lett., 72 (1998) 2642.
6. B. H. Cumpston, I. D. Parker, K. F. Jensen, J. Appl. Phys., 81 (1997) 3716.
7. V. N. Bliznyuk, S. A. Carter, J. C. Scott, G. Klarnar, R. D. Miler, D. C. Miller, Macromolecules, 32 (1999) 361.
8. K. K. Lien, S. J. Chua, S. F. Lim, J. Appl. Phys., 90 (2001) 976.
9. P. E. Burrows, V. Bulovic, S. R. Forrest, L. S. Sapochak, D. M. McCarty, M. E. Thompson, Appl. Phys. Lett., 65 (1994) 2922.
10. K. Yamashita, T. Mori, T. Mitzutani, J. Phys. D. Appl. Phys., 34 (2001) 740.
11. S. Kho, D. Cho, D. Jung, Jpn. J. Appl. Phys., 41 (2002) L1336.
12. S. H. Kwon, S. Y. Paik, O. J. Kwon, J. S. Yoo,

- Appl. Phys. Lett., 79 (2001) 4450.
13. M. S. Weaver, L. A. Michalski, K. Rajan, M. A. Rothman, J. A. Silvernail, P. E. Burrows, G. L. Graff, M. E. Gross, P. M. Martin, M. Hall, E. Mast, C. Bonham, W. Benneltz, M. Zumhoff, Appl. Phys. Lett., 81 (2002) 2929.
 14. J. D. Affinito, S. Eufinger, M. E. Gross, G. L. Graff, P. M. Martin, Thin Solid Films, 308 (1997) 19.
 15. P. E. Burrows, G. L. Graff, M. E. Gross, P. M. Martin, M. K. Shi, M. Hall, E. Mast, C. Bonham, M. B. Sullivan, Displays, 22 (2001) 65.
 16. W. Graupner, C. M. Heller, A. P. Ghosh, W. E. Howard (Eds.), SPIE Proceedings, USA, 4207 (2000) 11.
 17. R. C. Kwong, M. R. Nugent, L. Michalski, T. Ngo, K. Rajan, Y. J. Tung, M. S. Weaver, T. X. Zhou, M. Hack, M. E. Thompson, S. R. Forrest, J. J. Brown, Appl. Phys. Lett., 81 (2002) 162.
 18. Shizuo Tokito, Chihaya Adachi, Hideyuki Murata, 유기 EL 디스플레이 기초와 응용, 성안당, (2006) 125.