

## 저일함수 금속 아세트산 화합물 층을 사용한 유기발광다이오드의 전기발광 특성 향상

김만수 · 류근채 · 김영철<sup>†</sup>

경희대학교 화학공학과  
446-701 경기도 용인시 기흥구 서천동 1  
(2013년 5월 30일 접수, 2013년 6월 11일 수정본 접수, 2013년 6월 29일 채택)

## Effects of Low Workfunction Metal Acetate Layers on the Electroluminescent Characteristics of Organic Light-Emitting Diodes

Mansu Kim, Geun-Chae Yu and Young Chul Kim<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Kyung Hee University, 1 Seocheon-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 446-701, Korea  
(Received 30 May 2013; Received in revised form 11 June 2013; accepted 29 June 2013)

### 요 약

유기발광다이오드(Organic Light-Emitting Diodes, OLEDs)의 효율을 향상시키기 위하여 다양한 아세트산금속(M-acetate, M: Li, Na, K, Cs)을 cathode underlayer 소재로 사용하고 이들이 소자의 전자주입 및 발광 특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 1 nm 두께의 M-acetate 층을 cathode underlayer로 사용한 경우 Cs-acetate를 사용한 소자를 제외한 모든 소자에서 기존의 LiF 전자주입층을 사용한 소자보다 효율적인 전자주입 및 향상된 발광특성을 보였으며, M-acetate에 포함된 금속의 일함수가 작을수록 높은 전류밀도와 우수한 발광특성을 보였다. 또한, cathode underlayer의 두께가 소자의 특성에 미치는 영향을 분석한 결과, 사용된 M-acetate의 분자크기에 따라 각기 다른 두께(Li-acetate 0.7 nm, Cs-acetate 2.0 nm)에서 최적의 발광특성을 보였으며 기존의 LiF 층을 사용한 소자에 비하여 동일 인가전압에서 전류효율이 약 60% 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

**Abstract** – We investigated the effects of a cathode underlayer on the electroluminescence (EL) characteristics of organic light-emitting diodes (OLEDs) using various metal acetates (M-acetate, M = Li, Na, K, Cs) as a cathode underlayer. When 1 nm thick M-acetate layers were used as a cathode underlayer, the OLEDs with M-acetate showed better EL performance than the device with the conventional LiF electron injection layer except the device with Cs-acetate. More enhanced current density and improved EL characteristics were obtained when lower work function metal acetate was employed. In addition, the optimum M-acetate layer thickness that gives the best device performance proved to be 0.7 and 2.0 nm for Li-acetate and Cs-acetate, respectively, probably depending on the molecular size of M-acetate. The OLEDs with the M-acetate layers of optimized thickness demonstrated more than 60% enhanced current efficiency compared with that of the device using an LiF layer at the same applied voltage.

Key words: OLED, Cathode Underlayer, Work Function, Metal Acetate, Electron Injection

### 1. 서 론

유기발광다이오드(organic light-emitting diodes, OLEDs)의 성능 향상을 위해서는 전하의 주입과 수송이 용이하여 발광층으로 많은 수의 전자와 정공이 주입되고, 주입된 전자와 정공의 균형을 맞추어 효율적인 발광을 유도하는 것이 중요하다[1]. 그러나 유기물에서 정공의 이동도가 전자의 이동도보다 빠르고 일반적으로 음극에서의 전자의 주입장벽은 양극의 정공 주입 장벽보다 크기 때문에 OLED 소자의 전류밀도 및 효율을 향상시키기 위해서는 음극에서 발광층으로

전자의 주입 및 수송을 용이하게 하는 것이 필요하다. 효율적인 전자의 주입을 유도하기 위해 낮은 일함수를 갖는 금속(Li, Mg, Ca 등)을 음극으로 사용하여 전자주입을 향상시킬 수 있지만[2], 일함수가 작은 금속들은 산소 및 수분과의 반응성이 커서 소자 열화의 원인이 되기 때문에 주로 음극에는 알루미늄(Al)이 사용된다. 그러나 Al은 높은 일함수(4.3 eV)로 인해 유기물질의 LUMO(Lowest Unoccupied Molecular Orbital)로 효과적인 전자주입이 어렵게 되어 Al을 OLED의 음극으로 사용할 때 높은 구동전압과 낮은 효율이 나타나는 원인이 된다. 이러한 이유로 음극에서의 전자주입 특성을 향상시키기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다. Hung 등은 Al/LiF의 bilayer 음극을 사용하여 OLED 소자에서의 전자 주입을 향상시킨 결과를 발표하였으며[3], 현재까지도 LiF 박막은 Al과 유기물층 사이의 계면

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: kimyc@khu.ac.kr

<sup>‡</sup>이 논문은 경희대학교 정석진 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

에서 전자주입 특성을 향상시키는 소재로 널리 사용되고 있다. 박막의 LiF가 전자주입 및 소자 특성에 미치는 메커니즘에 대해서는 tunneling barrier reduction[4], chemical reaction[5-7], dipole formation [8] 등 여러 가지 모델로 설명하고 있으며 최근까지도 LiF 박막의 OLED 소자특성 향상 메커니즘에 관한 연구결과가 발표되고 있다[9]. 이 밖에도 Al 전극과 유기층의 계면에 metal fluorides(LiF[3], NaF[10], CsF[11]), metal oxides(MgO[12], Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[13]), organic metal complexes (Ca(acac)<sub>2</sub>[14], NaSt[15]) 등의 박막 도입에 의한 전자주입 특성 향상에 관한 연구결과가 보고되었다. 이와 같이 일함수가 낮은 알칼리 금속을 포함하는 물질을 이용하여 전자주입 특성을 높이려는 시도와 그 메커니즘 또한 다양한 방법으로 연구되고 있다.

본 연구에서는 OLED의 Al 음극과 유기물 층 사이에 기존의 LiF 층을 대신하여 다양한 음극 보조층(cathode underlayer)을 삽입한 복합 음극(bilayer cathode) 구조를 사용함으로써 음극의 전자주입 특성과 소자의 발광효율을 극대화할 수 있는 방안을 고찰하고자 한다. 본 연구에 사용하기 위한 새로운 cathode underlayer는 작은 일함수의 알칼리금속이 염의 형태로 포함된 유기물로서 LiF에 비해 해리에너지가 작을 것으로 예상되는 화합물을 사용하여 전자주입 및 소자의 발광특성에 미치는 영향을 LiF 층을 사용한 경우와 비교분석하였다. 또한, cathode underlayer의 두께가 OLED 소자의 전기발광 특성에 미치는 영향과 cathode underlayer의 박막형성 메커니즘에 대하여 고찰하였다.

## 2. 실험

유리 위에 코팅된 인듐주석산화물(Indium-Tin Oxide, ITO, 10 Ω/□)을 광식각 공정을 통하여 패터닝한 후 ITO가 패터닝된 30×30 mm<sup>2</sup> 크기의 유리 기판을 사용하여 OLED 소자를 제작하였다. 패터닝된 기판은 증류수, 트리클로로에틸렌, 아세톤, 이소프로필알코올에서 각각 10분 동안 초음파 세척 후 100 °C 대류오븐에서 약 1시간 동안 건조시켜 사용하였다. 제작된 OLED 소자의 구조와 에너지 밴드 다이어그램은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 정공수송층으로 N,N-bis(1-naphthyl)-N,N-diphenyl-1,1-biphenyl-4,4-diamine(NPB)을, 발광층으로 8-hydroxy-quinolino)-aluminium(Alq3)을, 그리고 음극으로 Al을 사용하고 각각의 metal acetate (M-acetate, M = Li, Na, K, Cs) 층을 발광층과 음극 사이에 추가하여 OLED 소자를 제작하였다. OLED 소자는 3×10<sup>-6</sup> Torr의 고진공 하에서 진공열증착 방법으로 섀도우 마스크를 사용하여 증착하였으며, 각 층의 두께는 NPB 40 nm, Alq3 60 nm, M-acetate 1 nm, Al 100 nm로 제작하였고, 수정진동센서(quartz crystal microbalance)를 이용하여 증착속도를 측정하여 정공수송층과

발광층의 유기물 층은 1 Å/s, 음극으로 사용한 금속 층은 약 5-6 Å/s의 속도로 증착하였다. 이렇게 제작된 OLED 소자는 패터닝된 ITO와 Al이 유기물층을 사이에 두고 교차되는 면에서 발광이 이루어지는 구조로 발광 면적은 3×3 mm<sup>2</sup>로 제작하였다. 제작된 OLED 소자의 전기발광(Electroluminescence, EL) 특성은 source-measure unit (Keithley 2400)과 calibrated SM-240 CCD spectrometer (CVI)가 연계된 I-V-L 측정장치로 측정하였다. Cs-acetate와 Li-acetate 두께에 따른 표면의 이미지는 1 μm×1 μm의 사이즈로 원자간력현미경(AFM, Dimension 3100, VEECO)을 이용하여 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. M-acetate cathode underlayer를 사용한 OLED 소자의 전기발광 특성

Fig. 2는 다양한 M-acetate (M=Li, Na, K, Cs)를 각각 Alq3 발광층과 Al 음극 사이에 cathode underlayer로 사용하여 제작한 소자의 전류밀도-전압 및 휘도-전압 특성을 기존의 LiF 전자주입층 사용 소자와 비교하여 나타낸 그래프이다. Cs-acetate를 제외한 나머지 M-acetate를 cathode underlayer로 사용한 소자들은 LiF를 사용한 소자에 비하여 같은 인가전압에서 높은 전류밀도와 휘도를 보였다. 특히, M-acetate내에 포함된 금속의 일함수가 작아지는 순서에 따라(Li: 2.9 eV, Na: 2.7 eV, K: 2.3 eV) 소자의 특성이 향상되는 결과를 얻었다. 인가전압이 10 V일 때, Li-acetate, Na-acetate, K-acetate, Cs-acetate, LiF가 도입된 소자들의 전류밀도는 각각 13, 17, 18, 1.4, 3 mA/cm<sup>2</sup> 이었고, 휘도는 각각 440, 600, 630, 42, 30 cd/m<sup>2</sup>을 나타냈다. 이와 같은 결과는 M-acetate 층이 Al 음극과 Alq3 발광층 사이에서 전자의 주입장벽을 낮추는 계단역할의 에너지 준위를 제공함으로써 발광층으로의 효율적인 전자주입을 유도하였음을 의미한다. 또한, M-acetate에 포함된 금속의 일함수에 따라 M-acetate 층의 일함수가 달라지며 포함된 금속의 일함수가 낮아수록 더욱 효율적으로 전자 주입을 유도한 것으로 나타났다.

### 3-2. Cs-acetate 박막의 두께에 따른 OLED 소자의 전기발광 특성

M-acetate 층을 사용한 OLED 소자들은 기존의 LiF 층을 사용한 소자에 비해 같은 인가전압에서 대체적으로 향상된 전류밀도와 휘도를 나타내었으나, Cs-acetate 층을 사용한 소자만은 다른 소자에 비해 현저히 낮은 전류밀도와 휘도를 나타냈다. 이러한 결과의 원인이 Cs의 크기와 Cs-acetate의 증착두께에 있다고 판단하여 Cs-acetate 층의 두께를 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 nm로 각각 다르게 증착한 후 OLED 소자를 제작하고 전기발광 특성을 분석하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이

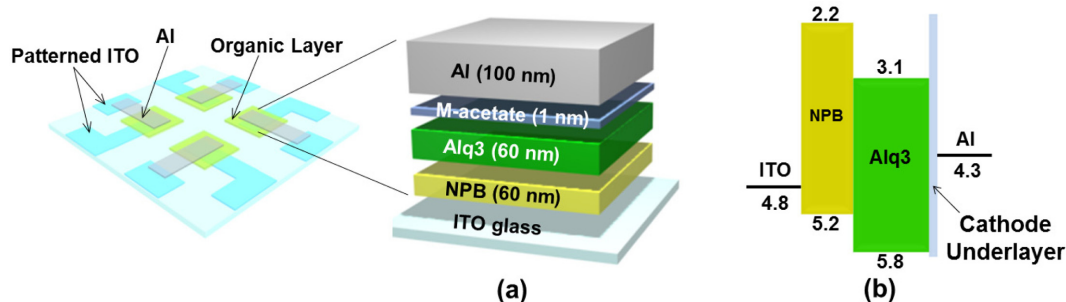


Fig. 1. (a) Schematic diagram, device structure and (b) energy band diagram of organic light-emitting diode fabricated in this study.

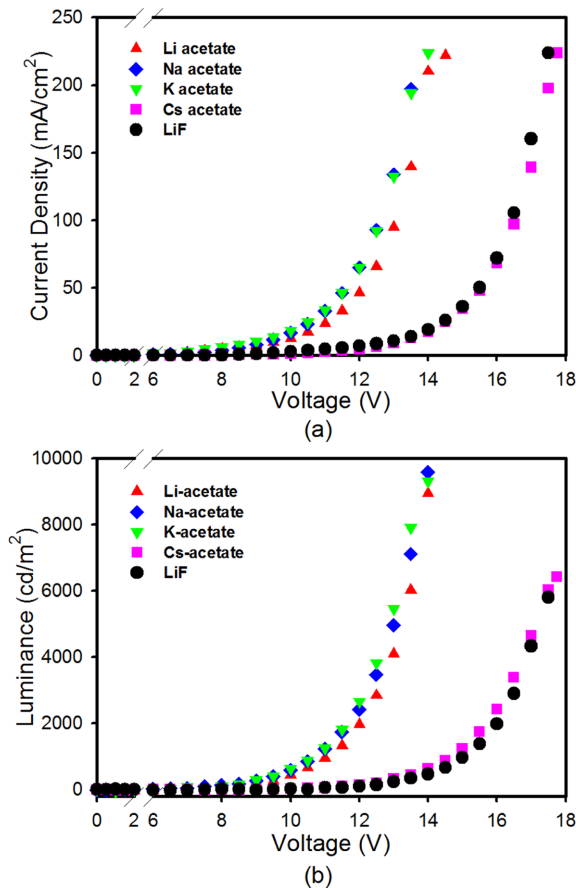


Fig. 2. (a) Current density-voltage and (b) luminance-voltage characteristics of OLEDs with varied M-acetate cathode underlayer.

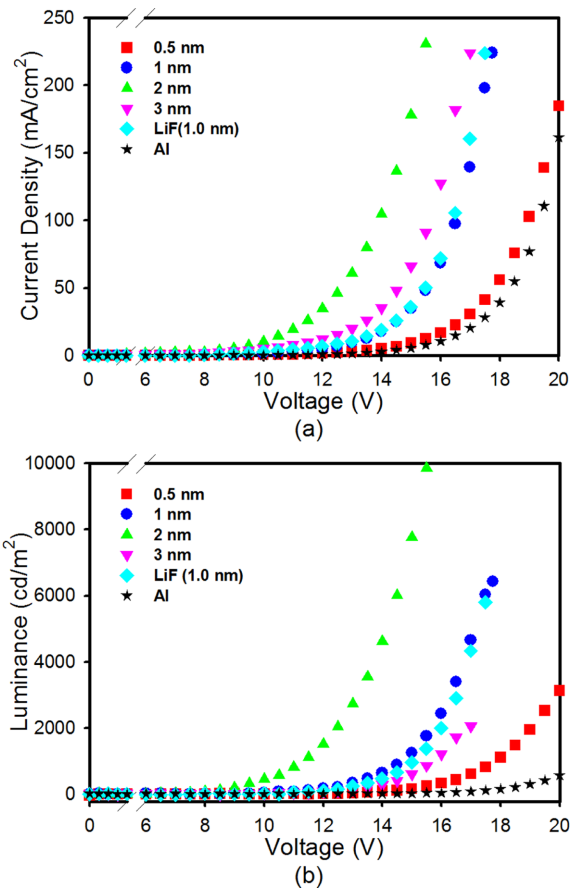


Fig. 3. (a) Current density-voltage and (b) luminance-voltage characteristics of OLEDs as a function of the thickness of Cs-acetate cathode underlayer.

Cs-acetate 층의 두께가 2.0 nm일 때 소자의 전류밀도가 가장 높았으며, 2.0 nm 이하의 두께에서는 두께의 증가에 따라 전류밀도와 휘도가 증가하다가 3.0 nm의 경우에는 오히려 감소하였다. 또한, Cs-acetate 층이 도입된 소자는 Cs-acetate의 두께가 2 nm일 때 인가전압 15.5 V에서 9,850 cd/m²의 휘도를 보였고, 0.5, 1.0, 3.0 nm의 경우에는 각각 250, 1,750, 860 cd/m²의 휘도를 나타냈다. 이 결과는 2 nm의 두께의 Cs-acetate 층을 cathode underlayer로 사용하였을 때 가장 효율적으로 발광층으로의 전자주입을 유도하고, 이로 인해 발광층에서 형성되는 엑시톤(exciton)이 많아지게 되어 소자의 발광특성을 향상 시킨 것으로 볼 수 있다. Fig. 4는 Cs-acetate 층의 두께에 따른 전류효율-휘도 특성을 나타낸 그래프이다. LiF 층을 사용한 소자는 2,000 cd/m²의 휘도에서 2.8 cd/A의 전류효율을 나타낸 반면, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 nm 두께의 Cs-acetate 층을 사용한 소자는 동일 휘도에서 각각 1.9, 3.6, 4.4, 0.9 cd/A의 전류효율을 보였다. 결과적으로 2.0 nm 두께의 Cs-acetate 층을 사용한 소자는 LiF(1 nm) 층을 사용한 소자 대비 약 60% 향상된 효율을 나타냈다. Cs-acetate 층의 도입으로 전자의 주입량을 증가시키으로써 전류밀도를 높일 뿐만 아니라 발광층 내부로 주입되는 전자의 증가로 정공과 전자의 균형을 맞추어 소자의 효율이 향상된 것으로 판단된다.

### 3-3. Cs-acetate 층의 두께에 따른 표면 특성 분석

Cs-acetate 층의 두께에 따른 OLED 소자의 발광특성 변화 원인을

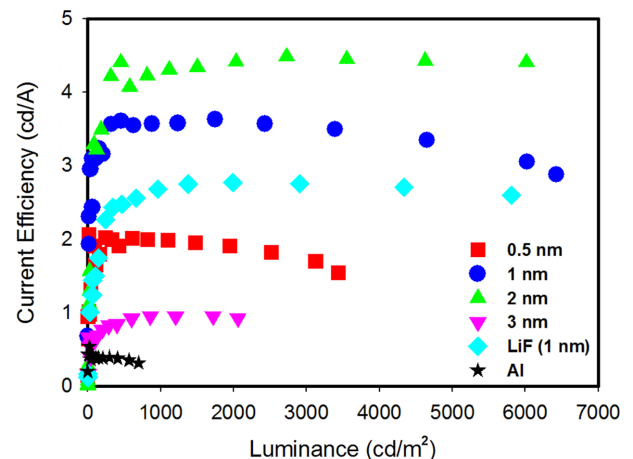


Fig. 4. Current efficiency vs luminance plots of the OLEDs as a function of the thickness of Cs-acetate cathode underlayer.

분석하기 위해 Alq3 층 위에 각각 다른 두께로 증착된 Cs-acetate 박막 표면을 AFM을 사용하여 분석하였다. Fig. 5는 Alq3 박막의 표면과 그 위에 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 nm 두께로 각각 증착된 Cs-acetate 박막의 표면 morphology를 측정된 AFM 이미지이다. Alq3의 표면(0 nm로 표시)과 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 nm 두께로 증착된 Cs-acetate 박막의 표면 거칠기는 RMS 값이 각각 1.29, 1.85, 1.99, 2.10, 3.55 nm로 변화하

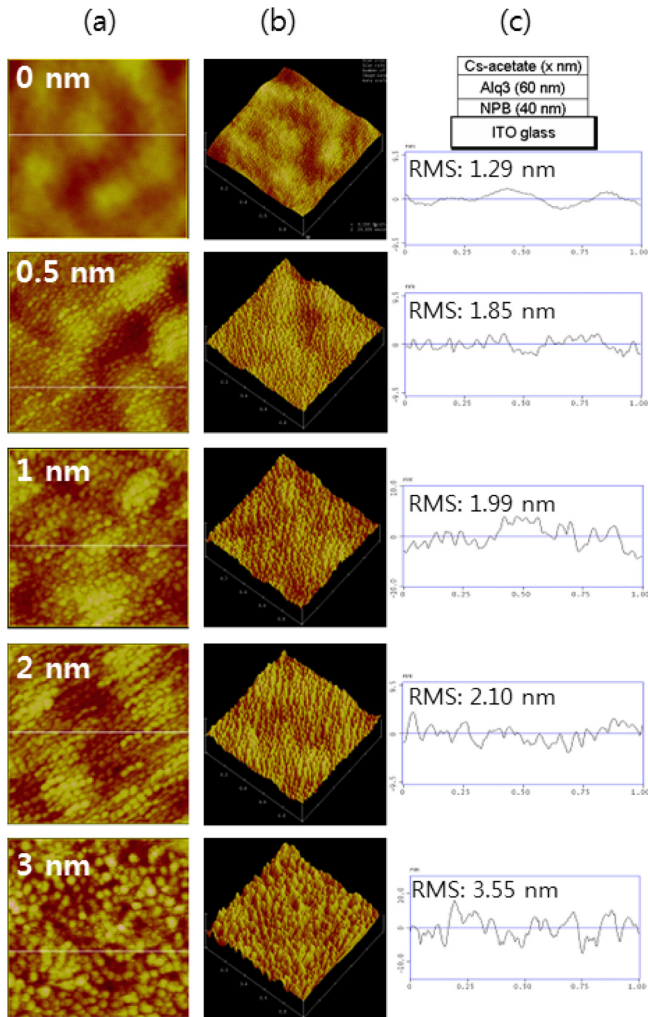


Fig. 5. AFM (a) topographic images, (b) 3D images, and (c) cross section profiles of Cs-acetate films with varied thickness ( $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ ).

였는데, Cs-acetate가 0.5 nm의 두께로 증착되었을 때 그 값이 크게 증가하였으나 두께가 1.0~2.0 nm인 영역에서는 증가폭이 작아졌다. 이것은 Cs-acetate가 Alq3 위에 증착되기 시작하는 초기과정에서는 표면 거칠기가 크게 증가하였으나 1.0~2.0 nm의 두께 영역은 기판 전면에 막이 형성되는 과정으로서 막의 치밀도가 높아지면서 표면 거칠기의 증가폭이 감소한 것으로 해석된다. 그러나 이후 막의 두께가 3.0 nm로 증가하면 RMS 값이 다시 큰 폭으로 증가하였는데, 이는 Cs-acetate 박막이 Stranski-Krastanov 성장 모델[16]을 따라 형성되기 때문인 것으로 설명할 수 있다. 박막의 증착 시 증착층의 성장 메커니즘은 기판의 표면에너지, 증착 속도 및 온도 등에 따라 변화하는데, Stranski-Krastanov 성장 모델에서는 증착 초기에 기판위에 균

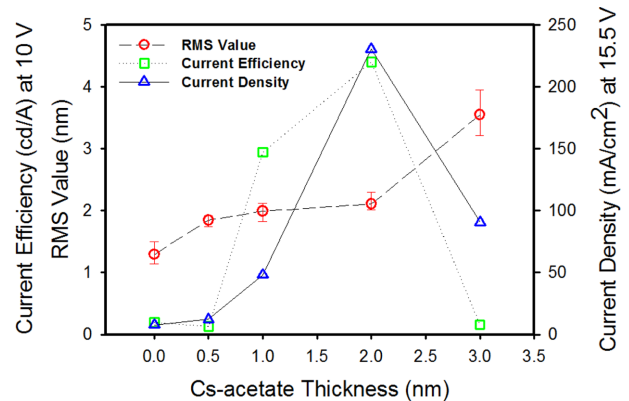


Fig. 7. Roughness of the Cs-acetate film surface, current density and current efficiency of the OLEDs as a function of the thickness of Cs-acetate cathode underlayer.

일한 박막이 형성되고 이후 형성된 막 위에서 3차원 섬 구조를 거쳐 2차막이 형성되며, 이러한 성장 방식은 기판과 박막형성 물질과의 상호 작용력과 박막형성 물질들 간의 상호 작용력에 의해 결정된다. Fig. 6에 Stranski-Krastanov 성장 모델을 도식화하여 나타내었다. 결과적으로 Cs-acetate의 경우, 약 2 nm 두께에서 균일한 박막을 형성하고 이후 섬 구조로 추가 Ca-acetate가 증착되는 것으로 해석할 수 있다.

Fig. 7은 Cs-acetate 층의 두께에 따른 표면 거칠기와 각 두께의 Cs-acetate 층을 사용한 OLED 소자의 전류밀도 및 전류효율을 나타낸 그래프이다. 초기 박막이 형성되는 2.0 nm의 두께에서 전류밀도 및 전류효율이 가장 높은 결과를 나타내었으며 표면의 거칠기가 증가하는 3 nm 두께에서는 오히려 감소하는 결과를 보였다. 2 nm 이하의 두께에서는 전면에 고른 박막이 형성되어 가는 과정으로 2 nm까지 두께가 증가함에 따라 Cs-acetate에 의한 OLED 소자의 전기발광 특성 향상의 결과를 보였으나, 이후 3 nm의 두께를 사용한 소자의 경우 오히려 불균일하고 두꺼운 Cs-acetate 층에 의해 전류밀도 및 전류효율이 감소하는 결과가 나타난 것으로 볼 수 있다. 또한, 일정 두께이상의 Cs-acetate 층을 사용할 경우 Cs-acetate 자체가 절연체로 작용하여 음극으로부터 발광층으로의 전자주입을 방해하는 요인이 될 수도 있을 것이다.

### 3-4. Li-acetate 박막의 두께에 따른 OLED 소자의 전기발광 특성

앞선 연구에서 Cs-acetate 층의 두께가 전자 주입 및 발광 특성의 향상에 영향을 미치는 것을 확인하였다. Cs-acetate 층을 도입한 경우에는 2 nm 두께에서 가장 향상된 전기발광 특성을 보였던 반면, Li-acetate 층을 cathode underlayer로 사용한 소자의 경우에는 1 nm 두께에서도 눈에 띄게 향상된 전류밀도와 휘도의 결과를 보였다. 이

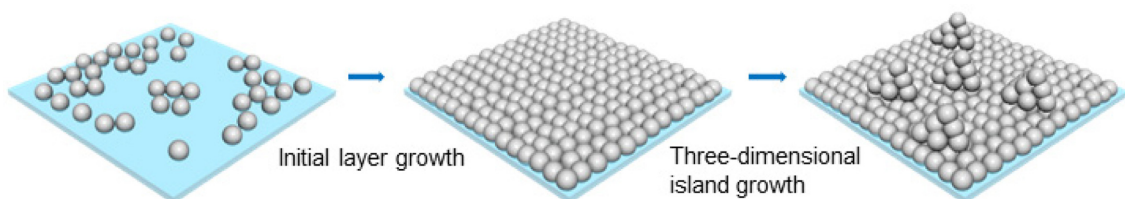


Fig. 6. Schematic illustration of Stranski-Krastanov growth model.



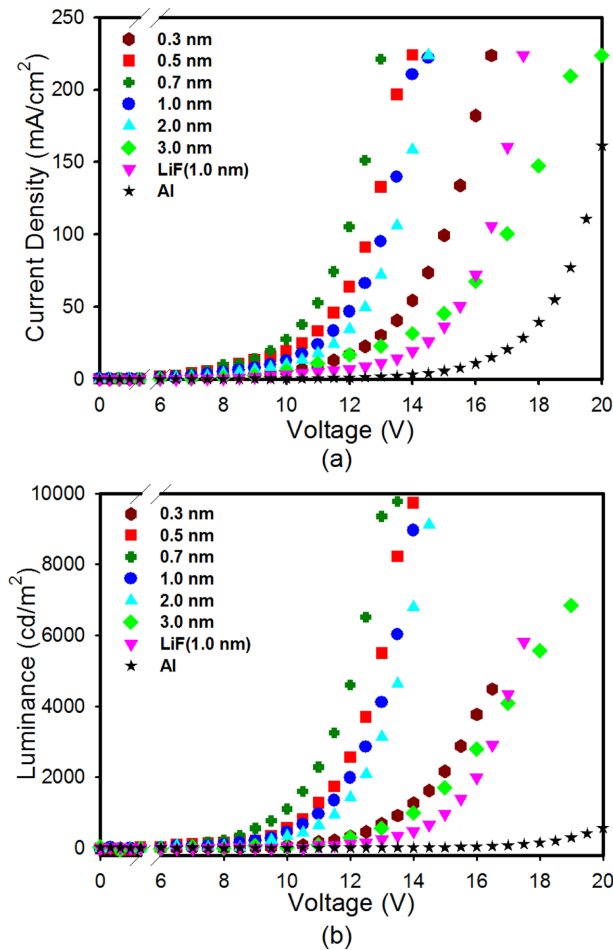


Fig. 8. (a) Current density-voltage and (b) luminance-voltage characteristics of OLEDs as a function of the thickness of Li-acetate cathode underlayer.

는 M-acetate의 종류 및 분자의 크기에 따라 OLED 소자에 적용 시 최적의 두께가 각각 다를 수 있기 때문이라고 생각되어, 원자의 크기가 가장 작은 금속인 Li를 포함하는 Li-acetate를 다양한 두께로 증착한 OLED 소자를 제작하고 그 특성을 분석하여 최적의 두께를 확인하는 실험을 진행하였다. Fig. 8은 Alq3 발광층과 Al 음극 사이에 Li-acetate 층의 두께를 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0, 3.0 nm로 증착하여 제작한 소자들의 전류밀도-전압 그리고 휘도-전압 특성을 나타낸 그래프이다. Li-acetate 층을 사용한 소자는 기존 LiF 층을 사용한 소자에 비하여 전자주입 및 발광특성이 향상된 결과를 나타냈으며, 특히 0.7 nm 두께의 LiF 층이 도입된 소자는 같은 인가전압에서 가장 높은 전류밀도와 휘도를 보였다. 0.7 nm를 기준으로 LiF 층의 두께가 감소하거나 증가할수록 전류밀도가 낮아졌는데, 각 두께의 Li-acetate 층이 증착된 표면을 AFM으로 확인한 결과 0.7 nm 두께까지는 균일한 막이 형성되지만 이후 표면 거칠기가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, Li-acetate 층의 두께가 0.7 nm 이하인 영역은 Alq3 위에 고른 박막이 전면적으로 형성되는 과정이고, 0.7 nm 두께에서 전면에 고른 박막이 형성되며 이후 추가적인 Li-acetate의 증착에 의해 섬 구조가 형성되며 표면 거칠기가 증가한 것으로 판단된다. 이에 따라 OLED 소자의 발광특성 또한 완전한 Li-acetate 박막이 형성된 0.7 nm 두께에서 가장 우수했으며 이후 급격히 전류밀도가 감

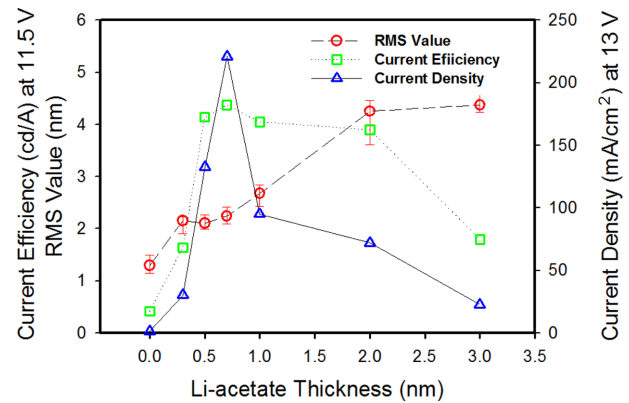


Fig. 9. Roughness of the Li-acetate film surface, current density and current efficiency of the OLEDs as a function of the thickness of Li-acetate cathode underlayer.

소한 결과를 나타내었다. Fig. 9에 Li-acetate 층의 두께에 따른 표면 거칠기와 각 두께의 Li-acetate 층을 사용한 OLED 소자의 전류밀도 및 전류효율을 나타내었다. Li-acetate 층의 두께가 0.7 nm까지 증가함에 따라 소자의 전류밀도와 전류효율은 점차 증가하는 경향을 보였고, 이후 전류밀도가 급격히 감소하며 효율 또한 감소하는 결과를 나타냈다. 이러한 두께 증가에 의한 전류밀도 및 효율의 감소는 두께가 형성된 Li-acetate 층에 의해 전자의 주입이 비효율적으로 이루어진 결과로 볼 수 있다. 0.7 nm 두께의 Li-acetate 층을 사용한 OLED 소자는 약 4.4 cd/A의 최대 전류효율을 보였으며 이는 LiF 층을 사용한 소자의 효율에 비하여 약 60% 향상된 결과이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 다양한 alkali metal acetate(M-acetate, M = Li, Na, K, Cs) 층을 OLED 소자의 발광층과 음극 사이의 cathode underlayer로 사용함으로써 OLED 소자의 발광특성을 향상시킬 수 있었다. M-acetate 층의 두께를 1 nm로 고정하여 OLED 소자를 제작한 결과, Cs-acetate 층을 사용한 경우를 제외하고 기존에 널리 사용되는 LiF 층을 사용한 소자에 비해 크게 향상된 발광특성을 나타냈으며, M-acetate에 포함된 금속의 일함수가 낮아질수록 같은 인가전압에서 더 높은 전류밀도와 휘도를 보였다. Cs-acetate 층을 사용한 OLED 소자의 경우는 2 nm의 두께에서 최적의 발광특성을 보였는데, 2 nm 두께에서 전면에 고르게 박막이 형성되며 두께가 더 증가하면서 섬 구조의 표면을 형성하여 오히려 소자의 전류밀도 및 효율이 감소되는 현상을 확인하였다. 또한 원자의 크기가 가장 작은 Li를 포함하는 Li-acetate 층을 사용한 소자는 0.7 nm 두께에서 최적의 발광특성을 보였으며, 이는 AFM을 통해 확인한 두께 변화에 따르는 박막 표면 이미지의 변화 양상에 잘 부합하였다. M-acetate 층의 증착 시 M-acetate 내 금속의 종류와 크기에 따라 전면에 균일한 박막을 형성하는 두께가 다를 수 있음을 확인하였고, 각각 균일한 박막을 형성할 수 있는 최적 두께에서 가장 향상된 발광특성을 보이는 OLED 소자를 제작할 수 있었다. 최적화된 OLED 소자는 Cs-acetate 층(2 nm)을 사용한 경우 약 10,000 cd/m<sup>2</sup>의 최대 휘도와 4.5 cd/A의 최대 전류효율을 보였으며, Li-acetate 층(0.7 nm)을 사용한 경우 약 9,800 cd/m<sup>2</sup>의 최대 휘도와 4.4 cd/A의 최대 전류효율을 보였다. 이렇게 향상된 전류효율은 기존의 LiF 층

을 전자주입층으로 사용한 소자대비 약 60% 향상된 결과이다. 또한 cathode underlayer를 도입한 OLED 소자의 구동전압(100 cd/m<sup>2</sup>의 휘도를 내는데 필요한 인가전압)은 Cs-actate 층 및 Li-acetate 층을 사용한 경우 각각 8.5 V와 7.5 V로 기존의 LiF 층을 사용한 소자(12 V)에 비해 3.5~4.5 V 가량 낮은 결과를 나타냈다.

## 감 사

이 논문은 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(No. 2011-0027256) 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

1. Qui, Y., Gao, Y., Wei, P. and Wang, L., "Organic Light-Emitting Diodes with Improved Hole-Electron Balance by using Copper Phthalocyanine/Aromatic Diamine Multiple Quantum Wells," *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 2628(2002).
2. Stössel, M., Staudigel, J., Steuber, F., Simmerer, J. and Winkler, A., "Impact of the Cathode Metal Work Function on the Performance of Vacuum-Deposited Organic Light Emitting Devices," *Appl. Phys. A*, **68**, 387-390(1999).
3. Hung, L. S., Tang, C. W. and Mason, M. G., "Enhanced Electron Injection in Organic Electroluminescence Devices using an Al/LiF Electrode," *Appl. Phys. Lett.*, **70**, 152(1997).
4. Zhang, S. T., Ding, X. M., Zhao, J. M., Shi, H. Z., He, J., Xiong, Z. H., Ding, H. J., Obbard, E. G., Zhan, Y. Q., Huang, W. and Hou, X. Y., "Buffer-Layer-Induced Barrier Reduction: Role of Tunneling in Organic Light-Emitting Devices," *Appl. Phys. Lett.*, **84**(3), 425(2004).
5. Hung, L. S., Zhang, R. Q., He, P. and Mason, G., "Contact Formation of LiF/Al Cathodes in Alq<sub>3</sub>-based Organic Light-Emitting Diodes," *J. Phys. D Appl. Phys.*, **35**, 103-107(2002).
6. Jabbour, G. E., Kippelen, B., Armstrong, N. R. and Peyghambarian, N., "Aluminum Based Cathode Structure for Enhanced Electron Injection in Electroluminescent Organic Devices," *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 1185(1998).
7. Mason, M. G., Tang, C. W., Hung, L.-S., Raychaudhuri, P., Madathil, J., Giesen, D. J., Yan, L., Le, Q. T., Gao, Y., Lee, S. T., Liao, L. S., Cheng, L. F., Salaneck, W. R., dos Santos, D. A. and Brédas, J. L., "Interfacial Chemistry of Alq<sub>3</sub> and LiF with Reactive Metals," *J. Appl. Phys.*, **89**(5), 2756(2001).
8. Watkins, N. J. and Gao, Y., "Vacuum Level Alignment of Pentacene on LiF/Au," *J. Appl. Phys.*, **94**(2), 1289(2003).
9. Sun, Z., Ding, X., Ding, B., Gao, X., Hu, Y., Chen, X., He, Y. and Hou, X., "Buffer-Enhanced Electron Injection in Organic Light-Emitting Devices with Copper Cathode," *Organic Electronics*, **14**, 511-515(2013).
10. Lee, J., Park, Y., Kim, D. Y., Chu, H. Y., Lee, H. and Do, L.-M., "High Efficiency Organic Light-Emitting Devices with Al/NaF Cathode," *Appl. Phys. Lett.*, **82**(2), 173(2003).
11. Chan, M. Y., Lai, S. L., Fung, M. K., Lee, C. S. and Lee, S. T., "Impact of the Metal Cathode and CsF Buffer Layer on the Performance of Organic Light-Emitting Devices," *J. Appl. Phys.*, **95**, 5397(2004).
12. Choi, H. W., Kim, S. Y., Kim, W.-K. and Lee, J.-L., "Enhancement of Electron Injection in Inverted Top-Emitting Organic Light-Emitting Diodes Using an Insulating Magnesium Oxide Buffer Layer," *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 082102(2005).
13. Zhang, S. T., Zhou, Y. C., Zhao, J. M., Zhan, Y. Q., Wang, Z. J., Wu, Y., Ding, X. M. and Hou, X. Y., "Role of Hole Playing in Improving Performance of Organic Light-Emitting Devices with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Layer Inserted at the Cathode-Organic Interface," *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 043502(2006).
14. Xu, Q., Ouyang, J., Yang, Y., Ito, T. and Kido, J., "Ultrahigh Efficiency Green Polymer Light-Emitting Diodes by Nanoscale Interface Modification," *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 4695(2003).
15. Zhan, Y. Q., Xiong, Z. H., Shi, H. Z., Zhang, S. T., Xu, Z., Zhong, G. Y., He, J., Zhao, J. M., Wang, Z. J., Obbard, E., Ding, H. J., Wang, X. J. and Ding, X. M., "Sodium Stearate, an Effective Amphiphilic Molecule Buffer Material Between Organic and Metal Layers in Organic Light-Emitting Devices," *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 1656(2003).
16. Arvia, A. J. and Salvarezza, R. C., "An Interdisciplinary Approach to the Electrochemistry at Solid Electrodes," *J. Braz. Chem. Soc.*, **8**(2), 91-100(1997).