

# 랭뮤어-블롯젯을 통해 형성된 고밀도 양자점 박막과 이를 기반으로 한 발광다이오드

이승현<sup>1</sup> · 정병국<sup>2</sup> · 노정균<sup>3,\*</sup>

## Light-emitting Diodes based on a Densely Packed QD Film Deposited by the Langmuir-Blodgett Technique

Seunghyun Rhee<sup>1</sup>, Byeong Guk Jeong<sup>2</sup>, and Jeongkyun Roh<sup>3,\*</sup>

### Abstract

To achieve high-performance colloidal quantum dot light-emitting diodes (QD-LEDs), the use of a densely packed QD film is crucial to prevent the formation of leakage current pathways and increase in interface resistance. Spin coating is the most common method to deposit QDs; however, this method often produces pinholes that can act as short-circuit paths within devices. Since state-of-the-art QD-LEDs typically employ mono- or bi-layer QDs as an emissive layer because of their low conductivities, the use of a densely packed and pinhole-free QD film is essential. Herein, we introduce the Langmuir-Blodgett (LB) technique as a deposition method for the fabricate densely packed QD films in QD-LEDs. The LB technique successfully transfers a highly dense monolayer of QDs onto the substrate, and multilayer deposition is performed by repeating the transfer process. To validate the comparability of the LB technique with the standard QD-LED fabrication process, we fabricate and compare the performance of LB-based QD-LEDs to that of the spin-coating-based device. Owing to the non-destructiveness of the LB technique, the electroluminescence efficiency of the LB-based QD-LEDs is similar to that of the standard spin coating-based device. Thus, the LB technique is promising for use in optoelectronic applications.

**Keywords:** Quantum dots, Langmuir-Blodgett, Quantum dot light-emitting diodes

### 1. 서 론

양자점 (quantum dot, QD)이란 나노미터 크기를 가지는 반도체 결정으로, 크기가 반도체의 보어 반지름 (Bohr radius)보다 작아 양자구속효과 (quantum confinement effect)를 가지는 소재를 말한다. 양자점은 크기에 따라 밴드갭이 달라져 크기조절을 통해 발광파장을 조절할 수 있으며, 발광 스펙트럼의 반치전폭 (full width at half maximum, FWHM)이 좁아 선명한 빛을 내기

때문에 차세대 디스플레이를 구현할 핵심 소재로 주목받아 왔다[1-3]. 콜로이드 양자점은 용액공정을 통해 박막을 형성할 수 있다는 장점을 가져 이를 이용하여 발광다이오드 (light-emitting diode (LED))를 구현하기 위해 많은 연구가 수행되어져 왔다[4-6].

양자점 발광다이오드 (QD-LED)는 전계구동을 통해 양자점에서 빛을 내는 반도체 소자이다. 양자점 발광층으로 전자와 정공을 주입하고 엑시톤을 형성함으로써 빛을 내게되는데, 효율적인 전하 주입을 위해 전자와 정공의 주입층 및 수송층으로 구성된 다층 구조를 사용한다. 많은 연구를 통하여 유기-무기 하이브리드 전하 수송층을 사용하는 것이 표준 구조로 정립되었는데, 이 구조에서는 양자점 발광층이 산화아연 (zinc oxide, ZnO)을 기반으로 한 무기 전자 수송층 (electron transport layer, ETL)과 유기물 기반의 정공 수송층 (hole transport layer, HTL) 사이에 위치하게 된다. 무기 ETL을 통해 양자점으로 주입된 전자와 유기 HTL을 통해 주입된 정공이 양자점 발광층에서 만나서 여기자 (exciton)를 형성하고 재결합 (recombination) 함으로써 빛을 낸다. 고효율 양자점 발광다이오드를 구현하기 위해서는 전하수송층을 통해 양자점 발광층으로 효율적인 전하주입을 하는 것이 필수인데, 이를 위해서는 양자점 발광층을 단일층 (monolayer) 혹은 이중층 (bilayer)의 얇은 두께로 구성하여야 한다. 이는 양자점의 전도도가 낮기 때문인데, 두꺼운 양자점 발

<sup>1</sup> 한국화학연구원 에너지소재연구센터(Division of Advanced Materials, Korea Research Institute of Chemical Technology)

141, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34114, Korea

<sup>2</sup> 성균관대학교 나노공학과(SKKU Advanced Institute of Nano Technology and Department of Nano Engineering, Sungkyunkwan University) 2066, Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 16419, Korea

<sup>3</sup> 부산대학교 전기공학과(Department of Electrical Engineering, Pusan National University)

2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

\*Corresponding author: jkroh@pusan.ac.kr

(Received: Jun. 30, 2022, Revised: Jul. 7, 2022, Accepted: Jul. 12, 2022)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

광층을 사용할 경우 양자점 내부로 전하주입이 원활하지 않아 발광효율에 큰 저하가 일어나기 때문이다. 얇은 양자점 박막을 발광층으로 형성할 때 중요한 것은 고밀도로 조밀한 박막을 형성하여야 한다는 것이다. 발광층의 두께가 매우 얇기에 박막에 핀홀 (pin hole) 혹은 갈라짐 (crack)이 존재하게 된다면 주입된 전하가 양자점을 지나쳐 반대편 전하수송층으로 이동하는 누설전류 경로가 쉽게 형성된다. 이는 발광소자 내에서의 효율 저하 및 수명 특성을 떨어뜨리는 주요 요인 중 하나이며, 나노 입자를 기반으로 하는 광전자소자에서 큰 문제 중 하나로 지목되고 있다[7,8]. 일반적으로 QD-LED 제작시 양자점 발광층은 스핀코팅을 통해 형성되는데, 스핀코팅은 두께 조절을 정확하게 할 수 없고 밀도가 높은 조밀한 박막을 제작하는데 한계가 있다는 문제가 있다. 이러한 문제에도 불구하고, 양자점 고밀도 박막을 정확한 두께로 형성하는 기술에 대한 연구는 부족한 상황이다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 랭뮤어-블로젯 (Langmuir-Blodgett, LB) 공정을 도입하여 고밀도 양자점 발광다이오드를 제작하는 연구를 수행하였다. LB 공정은 고밀도 박막을 전사공정을 통해 형성할 수 있다는 장점이 있으며, 공정을 반복함으로써 단일층을 여러 번 쌓을 수 있기 때문에 두께 조절을 정확하게 할 수 있다는 장점이 있다[9,10]. 본 연구에서는 이러한 장점을 QD-LED 제작에도 활용할 수 있는지 검증하기 위하여 양자점 박막을 LB 공정을 활용하여 형성한 후 QD-LED를 제작하였고, 이를 스핀코팅 공정으로 제작된 QD-LED와 발광특성을 비교하였다. 그 결과, LB 공정을 통해 제작된 QD-LED가 스핀코팅으로 제작된 소자와 유사한 수준의 외부양자효율을 보임을 확인하였으며, 우수한 계면 특성을 가진다는 가능성을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과는 랭뮤어-블로젯 공정이 QD-LED 제작에 적용 가능함은 물론, 다양한 종류의 광전소자[2,11,12] 제작에도 활용 가능함을 보여준다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 물질

양자점은 Type I 구조의 CdSe 코어 (반지름 = 2.0 nm) / ZnS 셸 (두께 = 6.0 nm)에 oleic acid 리간드를 가지는 적색 발광 양자점을 제작하여 사용하였다. 합성된 CdSe/ZnS 양자점은 약 16nm의 입자크기를 가지며 90%의 높은 광발광 양자 효율 (photoluminescence quantum yields, PLQY)을 보이고, 34 nm의 좁은 반치폭 (full width at half maximum, FWHM)을 가진다.

QD-LED 소자 제작에 사용된 4,4-Bis(N-carbazolyl)-1,1-biphenyl (CBP, 99.9%) 정공수송층은 OSM에서 구매하였으며, 정공주입층인 molybdenum oxide (MoO<sub>3</sub>, 99.95%)와 상부 양극 알루미늄 금속 팔렛 (Al, 99.999%) 은 Taewon Scientific Co.

(TASCO)에서 구매하여 진행되었다.

### 2.2 랭뮤어-블로젯 (LB) 공정

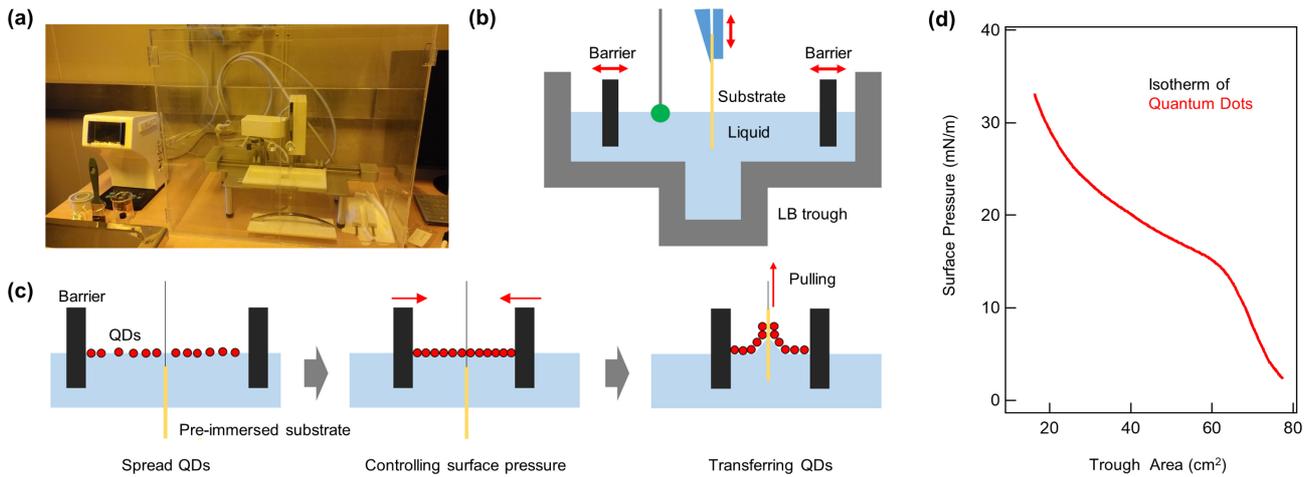
LB 공정을 통한 양자점 박막 제작 과정은 다음과 같다. 양자점의 표면은 유기 리간드 (oleic acid)가 둘러싸고 있기 때문에 물 위에 떨어뜨렸을 때 용해되지 않고 공기/물 계면에 뜨는 성질을 가진다. 본 연구에서는 LB 수조에 담긴 탈 이온수 (deionized water, DI water) 위에 5 mg/mL 로 톨루엔 솔벤트에 희석된 양자점을 미량주사기로 2 방울 떨어뜨려 전개 시켰다. 약 10분간 톨루엔 솔벤트가 충분히 증발되기를 기다린 후, LB 수조 양쪽 장벽을 이동시켜 공기/물 계면에 분산된 양자점의 표면 압력을 천천히 증가시켰다. 이때 양자점이 기판에 전사되는 압력은 표면 압력-면적 등온선 (surface pressure-area ( $\pi$ -A) isotherm)을 기반으로 탈 이온수 표면의 양자점이 단일층으로 가장 높은 밀도로 형성될 수 있는 최적 압력 (18 mN/m)을 선정하여 양자점 필름을 전사시켰다. 해당 압력에서 탈 이온수 위에 수평방향으로 밀집된 양자점은 기판을 수직으로 담갔다 빼는 것 (기판 이동 속도 = 3 mm/min)으로 기질 표면에 균일하고 높은 밀도의 양자점 박막 형성이 가능하였다. LB 공정 전에 기판의 뒷면에 테이프를 부착하여 공정 이후 제거하는 것으로 양자점을 기판 윗면에만 전사시킬 수 있었다.

### 2.3 QD-LED 소자 제작 및 분석

QD-LED 소자는 패턴 된 Indium-Tin-Oxide (ITO)기판 위에 역구조 (inverted) 형태로 제작하였다. ITO 기판은 acetone, isopropyl alcohol, deionized water로 각각 15분 동안 초음파 세정 통해 세척을 진행하였으며 이후 100 °C 오븐에서 30분간 건조하였다.

전하수송층으로 사용된 ZnO sol-gel 박막은 스핀 코팅 공정을 이용하여 제작되었으며, spinning rate는 20 mg/ml 로 에탄올에 용해된 ZnO sol-gel 용액을 뿌리고 2000 rpm으로 30초 동안 진행하였다. 이후 ZnO/ITO 박막을 hot plate에서 450 °C의 온도로 30분간 열처리를 진행하였다. 형성된 ZnO 박막은 약 40 nm의 두께를 가졌다.

양자점 발광층의 제작은 LB 공정과 스핀코팅 공정 두 가지 방식으로 진행되었다. LB 공정은 앞서 서술된 방식을 통해 ZnO/ITO 기판 위에 이중층의 양자점 발광층을 형성하여 진행하였다. 한편 양자점 발광층의 스핀코팅 공정은 ZnO/ITO 기판을 수분, 산소가 차단된 Ar 분위기의 글로브 박스로 옮겨서 진행되었다. 이때 사용된 양자점 용액은 20 mg/ml로 톨루엔에 희석된 상태로 사용하였으며, spinning rate은 4000 rpm으로 30초 동안 진행되었다. LB와 스핀코팅 공정을 통해 형성된 각각의 양자점 발광층은 hot plate에서 80 °C의 온도로 30분간 열처리를 진행한 후 진공 열 증착기로 옮겨졌다.



**Fig. 1.** (a) Photograph and (b) schematic diagram of the Langmuir-Blodgett (LB) trough. (c) Schematic illustration of the QD deposition process by the LB technique. (d) The surface pressure-area ( $\pi$ -A) isotherm of the CdSe/ZnS QDs with a diameter of 16 nm.

QD/ZnO/ITO 기판은 진공 열 증착기로 옮겨져 60 nm의 정공수송층 (HTL, hole transport layer), 10 nm의 정공주입층 (HIL, hole injection layer), 그리고 130 nm의 상부 알루미늄 양극을 각각 1.0, 0.1, 2.0 Å/sec로 증착하였다. 진공 열 증착기의 내부 진공도는 약  $1 \times 10^{-7}$  Torr에서 진행되었다.

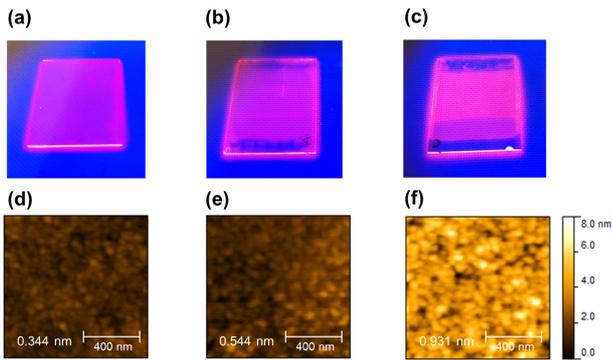
ZnO, 양자점 박막의 두께는 ellipsometry를 통해 측정되었으며, 제작된 QD-LED 소자의 전류밀도-전압-휘도 (J-V-L) 및 발광 스펙트럼 분석은 Keithley 236 및 Konica Minolta사의 CS-2000을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 LB 공정의 과정을 나타낸다. Fig. 1(a)와 (b)에 나타나 있는 것처럼, LB 공정은 액체를 담을 수 있는 수조 (LB trough)와 액체표면의 압력을 조절할 수 있는 장벽 (barrier), 표면의 압력을 측정하는 센서, 그리고 기판을 고정할 수 있는 홀더로 이루어진다. Fig. 1(c)는 LB 공정을 이용한 양자점 박막의 형성 과정을 나타낸다. 먼저, LB 수조를 탈 이온수 (DI water)로 채운 후 양자점 용액을 떨어뜨린다. 소수성 리간드를 가지고 있는 양자점은 가라앉지 않고 탈 이온수 표면에 떠있게 되는데, 수조 양단에 위치한 장벽을 중앙쪽으로 이동시키면 표면 압력이 증가되며 액체 표면에 조밀한 양자점 단일막을 구성하게 된다. 그 후, 미리 용액속에 담겨있는 기판을 천천히 끌어올리면 조밀한 양자점 단일막이 기판위로 전사된다. 조밀한 양자점 단일막 전사를 위해 중요한 변수는 장벽을 통해 가해지는 표면압력과 기판을 끌어올리는 속도이다. 가해지는 표면 압력은 Fig. 1(d)에 나와있는 표면압력-면적 등온선 (surface pressure-area isotherm)을 통해 정해진다. 장벽이 이동하며 면적이 줄어들어 따라 표면 압력이 증가하는데, 그에 따라 양자점의 상 (phase)가 기체에서 액

체로, 다시 고체로 변화한다. 면적  $62 \text{ cm}^2$  이하일 때 표면압력이 급격히 변화하는데, 이는 탈 이온수 표면에 떠있는 양자점이 조밀한 단일막을 형성하기 시작하여 양자점의 상이 액체에서 고체로 변화했다는 것을 의미한다. 따라서, 표면압력  $62 \text{ cm}^2$  이상일 때 조밀한 양자점 박막을 기판으로 전사할 수 있게 된다. LB 공정의 장점은 박막의 두께를 단일막 (monolayer) 수준으로 제어할 수 있다는 것이다. 기판을 끌어올리거나 다시 담그는 과정을 반복하는 횟수가 형성된 양자점의 층 수와 일치하게 된다. 한 번 끌어올리는 과정만 하게 된다면 양자점 단일막을 형성하게 되고, 끌어올리고 담그는 과정을 하게 된다면 이중막 (bilayer), 여기에 다시 끌어올리는 과정을 추가한다면 삼중막 (trilayer)을 형성하게 된다. 정확한 양자점 박막의 두께 조절은 다양한 종류의 양자점 기반 전자소자, 광전자소자 제작에 중요한 이점이 된다. 특히, QD-LED의 경우 효율적 전하주입을 위해서는 단일 혹은 이중막을 형성하여야 하기에 정확한 두께조절은 필수이다. 스핀코팅으로 양자점 박막을 형성하게 될 경우 양자점 용액의 농도, 혹은 스핀코팅의 회전속도를 통해 양자점 박막의 두께를 조절하게 되는데, 제어가 힘들뿐더러 재현성 및 균일성이 떨어지는 문제점을 가지고 있다. LB 공정의 다른 장점으로는 조밀한 박막을 형성하는 것이다. 표면 압력이 커짐에 따라 LB 수조에 떠있는 양자점 간의 간격이 줄어들게 되고, 매우 조밀한 단일층을 형성하게 된다. 이를 그대로 전사하기 때문에 기판 위에 조밀한 양자점 단일막을 형성할 수 있으며, 이는 누설전류 없는 QD-LED제작에 큰 도움이 된다.

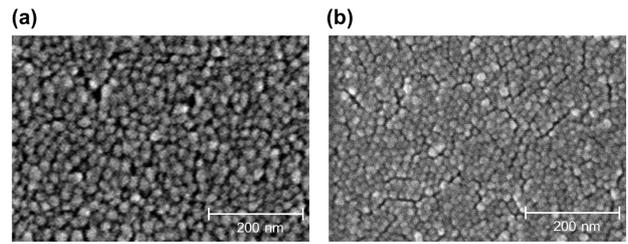
QD-LED 제작에 앞서 LB공정으로 제작된 박막의 표면상태를 확인하였다. Fig. 2는 스핀코팅 또는 LB 공정으로 형성한 박막의 특성을 보여준다. Fig. 2의 (a)와 (d)는 각각 스핀코팅으로 형성한 QD박막의 광 발광 (photoluminescence, PL) 사진과 원자력간현미경 (atomic force microscope, AFM)의 표면 모폴로지를 보여준다. Fig. 2의 (b)와 (e)는 LB로 형성한 QD 단일막



**Fig. 2.** Photographs and atomic force microscope (AFM) surface morphologies of (a, d) the spin coated QD film, (b, e) the LB-deposited QD monolayer and (c, f) the LB-deposited QD bilayers, respectively. The size of the substrate is 2 cm × 2.4 cm and the scale bars on the AFM images are 400 nm.

의 PL 사진과 AFM 표면 모폴로지, Fig. 2의 (c)와 (f)는 LB 로 형성한 QD 이중막의 PL 사진과 AFM 표면 모폴로지를 보여준다. Fig. 2 (b)와 (c)의 형광 발광 사진을 통해 LB 공정을 이용한 QD 단일막과 이중막이 큰 면적에 걸쳐 균일하게 형성되었음을 확인할 수 있다. 엘립소미터 (ellipsometry)를 통해 형성된 양자점 QD 박막의 두께를 측정된 결과 스핀코팅을 통해 제작된 박막은 약 23 nm, LB 공정을 통한 양자점 단일막은 약 16 nm, 그리고 LB 공정을 통한 양자점 이중막은 약 32 nm의 두께를 가지는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 LB 공정이 나노입자의 개별층을 적층하는데 매우 우수한 공정이라는 것을 확인하였다. 이는, QD-LED와 같이 얇은 박막을 활성층으로 필요로 하는 소자뿐만 아니라 QD 태양전지, QD 레이저 등 두꺼운 활성층을 필요로 하는 소자에도 LB공정이 활용될 수 있음을 보여준다. AFM 표면 모폴로지의 측정 결과 LB 공정을 통해서 제작된 QD 단일막과 이중막 모두 (Fig. 2 e, f) 표면 거칠기 (표면 모폴로지의 rms 값)가 1 nm 이하의 평탄한 박막이 형성된다는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 LB 공정을 통해 제작된 나노입자 박막이 평탄한 표면 거칠기가 중요한 전자 소자 (e.g., 태양전지, 발광소자, 트랜지스터)에 적용되기 용이함을 나타낸다.

Fig. 3은 스핀코팅 공정을 통해 제작된 양자점 박막과 LB 공정 통해 제작된 양자점 이중막의 주사전자 현미경 (scanning electron microscope, SEM)을 측정된 이미지이다. 두 박막 모두에서 고른 양자점 분포를 확인할 수 있지만, Fig. 3(a)에 나타난 것처럼 스핀코팅을 통해서 제작된 양자점 박막은 나노 입자들이 밀집되지 못하고 나노입자 사이에 빈공간이 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 스핀코팅 공정을 통해 제작된 박막의 두께가 약 23 nm 였다는 사실을 통해 해당 박막은 단일막과 이중막 사이의 약 1.5층의 양자점층, 즉 단일층과 이중막이 혼재된 형태의 박막이 형성된다는 것을 유추할 수 있다. 한편, Fig. 3(b)를 통해 LB공정을 통해 형성된 QD 이중막은 매우 높은 밀도로 양자점 박막이 형성되었음을 확인할 수 있으며, 측정된 두께가 약

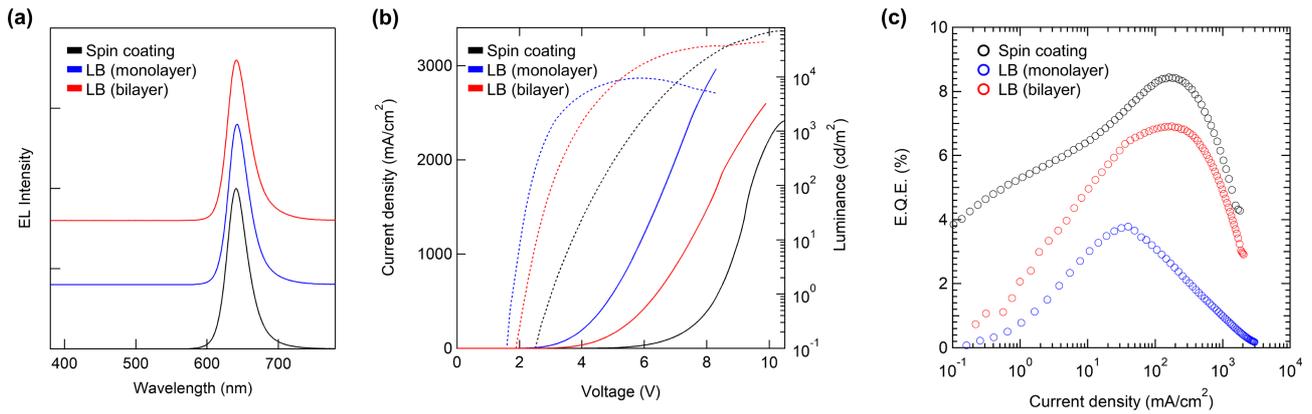


**Fig. 3.** Scanning Electron Microscope (SEM) images of the QD film deposited by (a) the spin coating and (b) LB technique (bilayer). The scale bars represent 200 nm.

32 nm 였다는 것을 통해 이것은 양자점 박막이 layer-by-layer로 밀도 있는 박막이 형성되었다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 높은 밀도의 QD 박막은 전자소자에 적용되었을 때 인접한 막과의 계면에서 매우 낮은 계면 저항을 가질 것으로 예상되고 일정한 두께를 기반으로 누설 전류를 억제할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 4는 스핀코팅 공정을 통해 제작된 양자점 박막과 LB 공정을 통해 제작된 양자점 단일막 그리고 이중막을 기반으로 한 양자점 발광소자 (QD-LEDs) 각각의 전자발광 특성을 보여준다. Fig. 4(a)를 통해 세종류의 발광소자에서 모두 adjacent peak 없이 양자점 발광층 ( $EL_{peak} = 640 \text{ nm}$ )에서만 적색 빛이 발광하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 대부분의 주입된 전자-정공이 양자점 발광층에서만 결합된다는 것으로 이해할 수 있으며, LB 공정을 제작된 양자점 박막이 효과적인 발광층으로 동작한다는 것을 확인할 수 있다. Fig. (b)와 (c)를 통해 LB 공정을 통해서 제작된 양자점 단일막을 기반으로 한 QD-LEDs 소자는 높은 누설전류로 인해 낮은 전자발광 특성을 가진다는 것을 확인할 수 있다. 양자점의 단일막의 경우 아무리 촘촘하게 정렬되더라도 어쩔 수 없이 빈 공간이 존재하게 된다. 이는 정공수송층과 전자수송층 사이 치명적인 단락 경로 (short path)를 생성하며, 발광 소자 전반의 효율을 떨어뜨리게 된다. 이러한 문제는 LB공정을 반복하여 양자점 이중막을 형성함으로써 해결 가능하다. LB 공정으로 형성된 양자점 이중막을 기반으로 한 QD-LEDs는 낮은 누설전류값을 기반으로 스핀코팅 공정을 통해서 제작된 QD-LEDs와 유사한 전계발광 특성을 보인다. 이중막 양자점 기반의 QD-LEDs는 낮은 문턱 전압 ( $V_{on} = 2.2 \text{ V}$ ), 높은 최고 휘도 ( $L_{peak} = 44,900 \text{ cd/m}^2$ ), 그리고 높은 최고 외부양자효율 ( $EQE_{peak} = 6.91 \%$ )를 가진다.

특히나 문턱 전압 ( $V_{on}$ ) 수치는 스핀코팅 공정을 통한 양자점 박막 기반의 QD-LEDs의 문턱 전압 ( $V_{on} = 3.0 \text{ V}$ ) 보다도 낮은 전압 영역에서 발광소자가 동작할 수 있음을 확인할 수 있다. 문턱 전압 이전의 전류 (누설 전류)는 LB 공정 기반 (이중막)과 스핀코팅 기반의 QD-LED 두 소자 모두 비슷한 수치를 보인다는 점을 생각할 때 이러한 문턱 전압의 감소는 소수 전자 (minority carrier)의 주입 특성이 향상되었음을 알 수 있다. 발광소자 내부에서의 전하이동은 계면 간의 에너지 준위 차이, 전하 전달 속



**Fig. 4.** (a) Electroluminescence (EL) spectra measured at 30 mA/cm<sup>2</sup>, (b) current density-voltage-luminance (J-V-L) characteristics, and (c) external quantum efficiencies (EQEs) with respect to current densities of the QD-LED based on spin coating (black) and LB technique (blue – monolayer, red – bilayer). All device share the same full width half maximum (FWHM) value of 34 nm in the EL spectra.

도, 계면 저항 등 특성들의 영향을 받으며, LB 공정을 통한 양자점 이중막은 void 없는 매우 밀집된 양자점 박막을 가지기 때문에 정공수송층과의 계면에서 더 우수한 전하 주입 특성을 가진다고 추측할 수 있다.

QD-LEDs의 전계발광 특성을 통해 LB 공정을 통해 제작된 나노입자 박막도 전자소자에서 우수한 전기 광학적 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 특히나 전사되는 입자들이 매우 높은 밀도로 밀집된다는 LB 공정의 특성은 나노입자 박막의 치명적인 문제 중 하나인 void의 형성을 최대한 억제시켜줄 수 있다는 특별한 기능으로 작용할 수 있다. 따라서 발광소자 외에도 계면저항이 매우 중요하게 작용하는 태양전지, TFT와 같은 전자소자에서도 LB 공정을 통해 나노입자를 적층한다면 더 우수한 특성들을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고효율, 고안정성 양자점 발광다이오드를 구현하기 위한 핵심 전제인 고밀도 양자점 발광층 형성하기 위한 방법으로 LB 공정을 도입하여 검증하였다. LB 공정을 통해 고밀도 양자점 박막이 형성 가능함을 확인하였고, 전사 공정의 반복을 통해 단일막 적층을 통한 다층막 형성이 가능함을 보였다. 형성된 양자점 이중막을 기반으로 양자점 발광다이오드를 제작하였으며, LB 공정의 비파괴성, 핀홀이 없는 고밀도 박막 형성 능력으로 낮은 구동전압과 높은 전계 발광효율을 가지는 소자를 구현할 수 있었다. 본 연구를 통해 LB 공정이 고효율, 고안정성 양자점 발광다이오드 구현의 핵심 기술이 될 잠재력을 지녔음을 확인하였다. 또한, 본 기술은 양자점 발광다이오드 뿐만 아니라 핀홀이 없는 박막, 정확한 두께조절이 필요한 박막이 필요한 태양전지, 트랜지스터, 센서와 같은 다른 반도체 소자 제작에도 응용가능 할 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

#### REFERENCES

- [1] J. Kwak, W. K. Bae, D. Lee, I. Park, J. Lim, M. Park, H. Cho, H. Woo, D. Y. Yoon, and K. Char, "Bright and efficient full-color colloidal quantum dot light-emitting diodes using an inverted device structure", *Nano Lett.*, Vol. 12, No. 5, pp. 2362-2366, 2012.
- [2] J. M. Pietryga, Y.-S. Park, J. Lim, A. F. Fidler, W. K. Bae, S. Brovelli, and V. I. Klimov, "Spectroscopic and device aspects of nanocrystal quantum dots", *Chem. Rev.*, Vol. 116, No. 18, pp. 10513-10622, 2016.
- [3] S. Rhee, K. Kim, J. Roh, and J. Kwak, "Recent progress in high-luminance quantum dot light-emitting diodes", *Curr. Opt. Photonics*, Vol. 4, No. 3, pp. 161-173, 2020.
- [4] S. Rhee, D. Hahm, H.-J. Seok, J. H. Chang, D. Jung, M. Park, E. Hwang, D. C. Lee, Y.-S. Park, and H.-K. Kim, "Steering interface dipoles for bright and efficient all-inorganic quantum dot based light-emitting diodes", *ACS Nano*, Vol. 15, No. 12, pp. 20332-20340, 2021.
- [5] S. H. Kim, G. W. Baek, J. Yoon, S. Seo, J. Park, D. Hahm, J. H. Chang, D. Seong, H. Seo, and S. Oh, "A bioinspired stretchable sensory-neuromorphic system", *Adv. Mater.*, Vol. 33, No. 44, p. 2104690, 2021.
- [6] G. W. Baek, S. G. Seo, D. Hahm, W. K. Bae, J. Kwak, and S. H. Jin, "Highly efficient, surface ligand modified quantum dot light-emitting diodes driven by type-controllable MoTe<sub>2</sub> thin film transistors via electron charge enhancer", *Adv. Electron. Mater.*, Vol. 7, No. 10, p. 2100535, 2021.
- [7] S. Rhee, J. H. Chang, D. Hahm, K. Kim, B. G. Jeong, H. J. Lee, J. Lim, K. Char, C. Lee, and W. K. Bae, "Positive incentive" approach to enhance the operational stability of

- quantum dot-based light-emitting diodes”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 11, No. 43, pp. 40252-40259, 2019.
- [8] S. Rhee, J. H. Chang, D. Hahm, B. G. Jeong, J. Kim, H. Lee, J. Lim, E. Hwang, J. Kwak, and W. K. Bae, “Tailoring the electronic landscape of quantum dot light-emitting diodes for high brightness and stable operation”, *Acs Nano*, Vol. 14, No. 12, pp. 17496-17504, 2020.
- [9] S. Acharya, J. P. Hill, and K. Ariga, “Soft Langmuir–Blodgett technique for hard nanomaterials”, *Adv. Mater.*, Vol. 21, No. 29, pp. 2959-2981, 2009.
- [10] S. Rhee, D. Jung, D. Kim, D. C. Lee, C. Lee, and J. Roh, “Polarized electroluminescence emission in high-performance quantum rod light-emitting diodes via the Langmuir-Blodgett technique”, *Small*, Vol. 17, No. 32, p. 2101204, 2021.
- [11] J. Roh, Y.-S. Park, J. Lim, and V. I. Klimov, “Optically pumped colloidal-quantum-dot lasing in LED-like devices with an integrated optical cavity”, *Nat. Commun.*, Vol. 11, No. 1, pp. 1-10, 2020.
- [12] Y.-S. Park, J. Roh, B. T. Diroll, R. D. Schaller, and V. I. Klimov, “Colloidal quantum dot lasers”, *Nat. Rev. Mater.*, Vol. 6, No. 5, pp. 382-401, 2021.