

자기조립단분자막을 이용한 양자점 발광다이오드의 전하 균형도 개선

Improved charge balance in quantum dot light-emitting diodes using self-assembled monolayer

박 상 욱*, 정 운 호**,***, 배 예 윤*, 임 재 훈**,***, 노 정 균***

Sangwook Park*, Woon Ho Jung**,***, Yeyun Bae*, Jaehoon Lim**,***, Jeongkyun Roh***

Abstract

To improve the efficiency and stability of colloidal quantum dot light-emitting diodes (QD-LEDs), it is essential to achieve charge balance within the QD emissive layer. Zinc oxide (ZnO) is widely used for constructing an electron transport layer in the state-of-the-art QD-LEDs, but spontaneous electron injection from ZnO often results in excessive electrons in QDs that significantly deteriorate the performance of QD-LEDs. In this study, we demonstrated the improved performance of QD-LEDs by modifying the electron injection property of ZnO with self-assembled monolayer (SAM)-treatment. As a result of improved charge balance, the external quantum efficiency and maximum luminance of QD-LEDs with SAM-treatment were improved by 25% and 200%, respectively, compared to the devices without SAM-treatment.

요 약

양자점 발광 다이오드(QD-LED)의 효율과 안정성 향상을 위해서 QD 발광층에 주입되는 전하의 균형을 이루는 것은 필수적이다. 산화 아연(ZnO)은 최신 QD-LED에서 전자수송층(electron transport layer, ETL)을 구성하기 위해 가장 많이 사용되고 있으나, ZnO의 자발적인 전자 주입은 QD-LED의 성능을 크게 열화시키는 과도한 전자 주입을 유발한다. 본 연구에서는 자기조립단분자막(self-assembled monolayer, SAM) 처리를 통해 ZnO의 전자 주입 특성을 조절하여 QD-LED의 성능을 향상시켰다. 전하 균형을 향상시킨 결과, SAM을 처리한 QD-LED는 SAM을 처리 안한 소자와 비교하여 내부 양자 효율(external quantum efficiency, EQE)이 25%, 최대 휘도는 200% 향상되었다.

Key words : Quantum dots, quantum dot light-emitting diodes, self-assembled monolayer, charge balance, octadecylphosphonic acid

* Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University

** Dept. of Energy Science, Centre for Artificial Atoms, Sungkyunkwan University (SKKU)

*** SKKU Institute of Energy Science and Technology (SIEST), Sungkyunkwan University

★ Corresponding author

E-mail : jkroh@pusan.ac.kr, Tel : +82-51-510-7336

※ Acknowledgment

This work was supported by a 2-Year Research Grant of Pusan National University

Manuscript received Jan. 28, 2023; revised Feb. 9, 2023; accepted Feb. 16, 2023.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://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.

I. 서론

양자점은 양자구속효과(quantum confinement effect)를 가지는 나노미터 크기의 반도체 입자이다. 입자의 크기에 따라 발광 파장을 조절할 수 있으며[1, 2], 내부 양자 효율이 높고 반치폭(full width half maximum, FWHM)이 좁다는 장점을 가지고 있어[3, 4], 발광 다이오드[5]와 레이저[6], 광센서[7], 태양 전지[8]를 구현하기 위한 차세대 소재로 각광 받아왔다. 이 중 디스플레이 응용을 위한 발광 다이오드 연구가 가장 활발히 이루어졌다.

양자점 발광 다이오드는 전계발광(electroluminescence, EL) 방식으로 빛을 내는 소자이다. 발광층으로는 양자점을 사용하고 있으며, 양자점에서 전자와 정공의 쌍인 엑시톤을 형성하여 발광하기 때문에, 전자와 정공을 효율적으로 주입하는 것이 중요하다. 효율적인 전자와 정공의 주입을 위해 유기발광다이오드(organic light-emitting diode, OLED)와 유사하게 전하 수송층과 전하 주입층을 도입한 다층 구조의 p-i-n 다이오드 구조를 사용하며, 현재는 n-타입 반도체로 무기물인 산화 아연(zinc oxide, ZnO)을 사용하는 것이 대표적이다. 반대로 p-타입 반도체로는 다양한 유기물을 사용하고 있다.

양자점 발광 다이오드에서 정공과 전자의 주입 균형을 맞추는 것은 효율과 수명을 향상시키는 중요한 요소이다. 이동도가 높은 무기 전자 수송층(electron transport layer, ETL)과 비교하여, 정공 수송층(hole transport layer, HTL)은 비교적 이동도가 낮은 유기물을 사용하여 전자와 정공의 주입 불균형이 발생하게 된다. 이러한 요인에 의해 소자가 구동하면 양자점 발광층에 많은 전자가 쌓이게 되며, 이는 효율을 낮추는 비방사 재결합인 오제 재결합을 발생시킨다[9, 10]. 전하의 균형을 맞추기 위해 현재 두 가지 방법이 활발히 연구되고 있다. 첫 번째는 양자점과 산화 아연 사이 계면에 polymethylmethacrylate (PMMA)나 산화 알루미늄(Al_2O_3)와 같은 절연성 물질을 얇게 도입하는 방식을 연구하였으며[11, 12], 다른 방법으로는 산화 아연의 이동도를 낮추고 주입 장벽을 높이기 위해 마그네슘, 갈륨, 리튬 등의 물질을 도핑하는 연구가 진행되었다[13, 14]. 하지만 스핀 코팅으로 절연성 물질을 얇게 도입할 경우 정확한 두께 조절이 어렵다는 문제가 있고, 원자층 증착법(atomic layer deposition, ALD)을 도입하여 절연성 물질을 형성할 경우 두께 조절은 용이하나 복잡한 공정 과정을 가진다는 문제가 있다. 도핑을 하는 방식은 높은 온도의 공정 조건을 요구한다

는 문제를 가지고 있다.

본 연구에서는 과도한 전자의 주입을 억제하기 위한 계면층으로 자기조립단분자막(self-assembled monolayer, SAM)을 도입하였다. SAM은 낮은 온도에서 공정이 가능하며, 간단한 공정을 통해 박막을 형성할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이러한 이유로 인해 SAM을 활용하여 QLED의 성능 및 안정성을 향상시키기 위한 다양한 시도가 있었다[15, 16]. ZnO와 양자점 계면에 포스포닉산 기반의 SAM인 octadecylphosphonic acid(ODPA)를 처리하여 양자점 발광 다이오드를 제작하였으며, 이를 통해 전자의 주입을 억제하여 QD-LED의 전하 균형을 향상시켰다. 전하 균형도 향상과 누설 전류 감소의 결과로 외부양자효율은 25%, 최대 휘도는 2배 이상 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구는 SAM을 활용한 계면 처리가 QD-LED 소자의 성능 향상에 다양하게 활용될 가능성을 보여준다.

II. 본론

2.1 물질

Tris(4-carbazoyl-9-ylphenyl)amine(TCTA) 물질은 OSM에서 구매하였으며, 알루미늄 금속 팔렛과 molybdenum oxide(MoO_x)은 iTASCO사에서 구매하였다. 에탄올($\geq 99.5\%$), 아세트산 아연 이수화물(zinc acetate dihydrate, $\geq 99\%$), 에탄올아민($\geq 99.5\%$), octadecylphosphonic acid (ODPA), 2-methoxyethanol ($\geq 99.8\%$), 옥테인($\geq 99\%$), 클로로벤젠($\geq 99\%$)은 Sigma-Aldrich사에서 구매하였다. 수산화 칼륨(KOH), 메탄올($\geq 99.9\%$), isopropyl alcohol(IPA, $\geq 99.9\%$), 아세톤($\geq 99.7\%$)는 삼천 화학 회사에서 구매했다. 양자점은 CdSe/Cds/CdZnS 구조로 합성한 양자점을 사용하였다[17]. 양자점은 9.8 nm의 입자 크기, 86%의 광발광 양자 효율(photoluminescence quantum yield, PLQY), 29 nm의 좁은 FWHM와 636 nm의 peak spectrum의 적색 발광 특성을 가진다.

2.2. QD-LED 소자 제작 및 분석

Indium tin oxide(ITO)가 패터닝된 유리 기판을 아세톤, IPA로 각각 20분씩, 탈 이온수(deionized water)로 15분 동안 초음파세척기를 통해 세척을 하였으며, 그 후 100도의 오븐에서 건조하였다. 기판을 사용하기 전에 ultraviolet ozone(UVO) 처리를 15분 진행한 후 사용하였다.

Sol-gel ZnO 박막은 Yanming Sun이 보고한 sol-gel 합성법을 따라 합성하여 제작하였다[18]. 이렇게 만들어진 sol-gel 용액을 준비해둔 기판에 2000 rpm 60초로 스핀 코팅하였으며, 공기 중에서 hot plate에서 200°C 1시간 동안 열처리를 하였다. ZnO 박막의 두께는 약 40 nm이다. ODPA를 처리하는 기판은 0.5 mM의 농도의 ODPA 에탄올 용액에 넣고 4시간과 12시간 동안 처리하였다. 이후 순수한 에탄올로 기판을 씻고 질소로 용액을 제거하기를 2번 반복하여 잔여물을 제거하였다. 그 후 hot plate에서 15분 동안 200°C에 열처리하였다. 이후 공정은 질소 환경인 글러브 박스로 옮겨서 진행하였다. 옥테인에 20 mg mL⁻¹로 녹아있는 양자점을 4000 rpm에 1분 동안 스핀 코팅하였고, hot plate 90°C에 30분 동안 열처리를 하였다. 그 후 열 증착기로 기판을 옮겨서 나머지 공정을 진행하였다. 증착기의 진공도 10⁻⁷ torr에서 공정을 진행하였으며, TCTA를 0.5 Å s⁻¹의 속도로 50 nm, MoOx를 0.3 Å s⁻¹에서 10 nm 증착하고 마스크를 바꾼 후 Al을 2 Å s⁻¹ 속도로 100 nm 두께로 증착하였다. 이후 봉지(encapsulation) 공정을 하여 공정을 마무리하였다.

전류와 전압 특성은 Keithley 2450 소스 미터로 측정하였으며, 휘도는 분광 방사 휘도계인 Konica-Minolta CS-2000으로 측정하였다. 또한 EL spectra와 Commission Internationale de L'Éclairage(CIE) 색좌표 또한 CS-2000을 사용하여 측정하였다.

표면 거칠기(surface morphology)는 원자현미경(atomic force microscope, AFM, Park system XE-100)을 사용하여 측정하였으며, UPS 측정은 X-선 광전자 분광 분석기인 AXIS SUPRA 모델을 사용하여 측정하였다. 박막의 두께는 엘립소미터(ellipsometer)를 사용하여 측정하였다. 접촉각은 탈 이온수 1.0 μl를 기판 표면에 떨어트려 각도를 ImageJ 프로그램을 이용하여 측정하였다.

2.3 결과 및 분석

Fig. 1 (a)~(b)를 통해 소자의 구조와 에너지 밴드 다이어그램을 나타내었다. Fig. 1 (a)에 나타내었듯이 ITO (150 nm)가 패터된 유리 기판을 사용하였으며, ETL로는 전자의 주입을 높이고 정공의 주입을 막을 수 있는 sol-gel ZnO 박막(40 nm)을 사용하였다. HTL로는 정공 전송을 원활하게 하고 전자의 주입을 막을 수 있는 lowest unoccupied molecular orbital(LUMO) 값을 가진 TCTA(50 nm)를 사용하였으며, 정공의 주입 특성

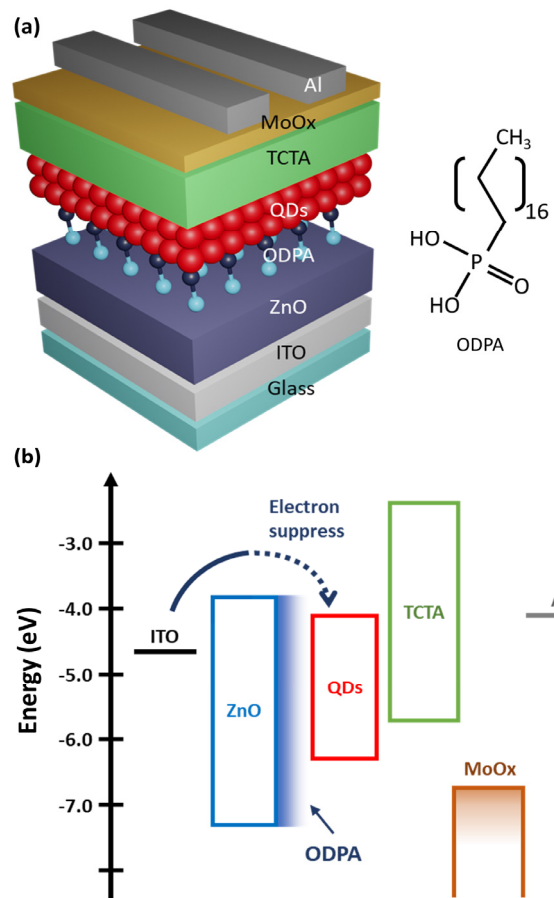


Fig. 1. (a) Device structure and chemical structure of ODPA. (b) Energy band diagram of the QD-LEDs with ODPA-treatment.

그림 1. (a) QD-LED 소자 구조와 ODPA의 화학적 구조 (b) ODPA 처리한 소자의 에너지 밴드 다이어그램

을 높이기 위해 정공 주입층(hole injection layer, HIL)으로 MoOx(10 nm)를 사용하였다. 그리고 발광층으로는 CdSe/CdS/CdZnS 구조의 양자점을 사용하였으며, 양극으로 100 nm 두께의 Al을 증착하였다. CdSe 기반의 양자점은 Fig. 1 (b)에서 보여주듯이 전극과 ZnO 박막의 장벽 높이가 낮아 정공보다 전자가 많이 주입된다. 이를 해결하기 위해 산화아연 박막 계면을 ODPA (Fig. 1 (a))로 처리하여 전자의 주입을 억제하였다.

ODPA가 sol-gel ZnO 박막에 제대로 처리되었는지 확인하기 위해 Fig. 2 (a)~(b)와 같이 접촉각 측정과 원자현미경(AFM)을 통해 표면 특성을 분석하였다. Fig. 2 (a)에서 기존 ZnO 박막은 표면에 하이드록실기(-OH group)가 존재하기 때문에 접촉각이 49도로, 친수성의 표면을 가지는 것을 확인할 수 있다. 반면, Fig. 2 (b)에서 ODPA를 4시간 처리한 ZnO 박막은 표면의 하이드록실기를 ODPA로 치환하였기 때문에 접촉각이 100°로 높아졌으며, 소수성을 가지는 것을 볼 수 있다. 이를 통

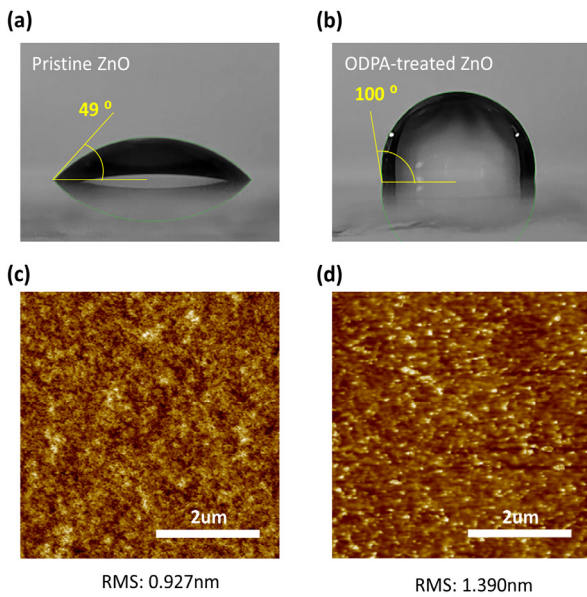


Fig. 2. Water contact angles of (a) pristine and (b) ODPA-treated ZnO. The volume of the droplet is 1.0 μl . AFM images of (c) pristine and (d) ODPA-treated ZnO. The scale bars indicate 2 μm .

그림 2. (a) ODPA 처리 안한 ZnO 와 (b) ODPA 처리한 ZnO의 물 접촉각. (c) ODPA 처리 안한 ZnO와 (d) ODPA 처리한 ZnO의 AFM 사진

해 산화아연 박막에 ODPA가 제대로 처리가 되었음을 확인할 수 있다. Fig. 2 (c)~(d)는 AFM을 통해 surface morphology를 보여준다. Fig. 2 (c)에서 기존 산화아연 박막의 root mean square (rms)는 0.927 nm로 균일한 박막을 보여주며 Fig. 2 (d)에서 ODPA를 처리한 ZnO 박막의 rms는 1.390 nm로 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 ODPA가 처리되어 rms가 상승하였음을 보여주며, QD-LED에 많이 사용되는 ZnO 나노입자 (nanoparticles, NPs)의 rms가 보통 1~2nm 수준이기 때문에[19] ODPA를 처리하여도 소자를 제작하기에 적합한 표면을 가지는 것을 알 수 있다.

Fig. 3 (a)~(d)에서는 QD-LED의 EL 특성을 보여준다. Fig. 3 (a)는 소자의 전류밀도-전압-휘도(current density-voltage-luminance, J - V - L) 그래프를 나타낸다. ODPA 처리를 안한 소자와 비교하여 ODPA를 4시간 처리한 소자의 성능이 더 높은 것을 보여주는데, 2 V 이하의 전압 구간에서 ODPA를 처리한 소자의 전류 밀도가 처리 안한 소자의 전류 밀도보다 낮은 것을 통해 누설 전류가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. ODPA를 처리하지 않은 소자의 경우, 과도한 전자 주입에 의해 QD 발광층에 전자가 축적되며, 인접한 HTL로 전자들이 넘어가게 되고 누설 전류가 발생한다. 반면 ODPA 처리한

소자는 전자의 주입을 줄여 전자의 축적을 억제하고 HTL로 넘어가는 전자를 방지하여 누설 전류가 감소한다. 뿐만 아니라 전자와 정공 주입의 균형을 맞췄기 때문에 ODPA 4시간 처리한 소자가 ODPA를 처리 안한 소자(Max L : 2,961 cd m^{-2})에 비해 더 높은 최대 휘도(Max L : 6,016 cd m^{-2})를 보여준다. 반면 ODPA를 12시간 처리한 소자의 경우, 긴 시간 처리하여 SAM이 단분자막으로 형성되지 않고 다층막으로 형성된다[20]. 따라서 절연층이 두껍게 처리되어 전자의 주입을 과도하게 억제하게 되는데, 이에 따라 전류 밀도가 감소하고 턴 온 전압이 4.2 V로 증가한다. 또한 전자의 주입이 과도하게 억제되어 소자의 성능이 떨어져 최대 휘도가 1,853 cd m^{-2} 으로 떨어지는 것을 보여준다. Fig. 3(b)는 외부 양자 효율-휘도(external quantum efficiency, EQE-luminance) 그래프를 나타낸다. 앞서 J - V - L 그래프를 통해 볼 수 있듯이, ODPA 처리 안한 소자의 경우 저전압에서의 누설 전류가 높아 휘도가 낮을 때의 EQE가 낮은 것을 확인할 수 있으며, 전하 균형이 맞지 않아 최대 EQE가 2.91%인 것을 확인할 수 있다. ODPA를 4시간 처리한 소자의 경우, 전자의 주입을 억제하여 전하 불균형을 해소하고 누설전류를 줄였기 때문에 최대 EQE가 기존 소자의 25% 상승한 3.66%임을 알 수 있다. 반면 ODPA를 12시간 처리한 소자의 경우, 전자의 주입을 과도하게 억제시켜 전하 불균형을 유발하여 EQE는 2.66%로 기존 소자보다 10% 낮은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3 (c)는 전류 효율-전류 밀도(current efficiency-current density) 그래프를 나타낸다. 전류 효율은 EQE와 유사한 경향을 나타내며 ODPA 처리 안한 소자는 2.2 cd A^{-1} , ODPA를 4시간 처리한 소자는 2.68 cd A^{-1} , ODPA를 12시간 처리한 소자는 1.98 cd A^{-1} 의 전류 효율을 보여준다. Fig. 3 (d)는 각 QD-LED 소자의 54 mA cm^{-2} 에서 EL spectra를 보여준다. ODPA 처리 안한 소자는 641 nm, ODPA 4시간 처리 소자는 642 nm, ODPA 12시간 처리 소자는 644 nm의 peak spectrum로 유사한 스펙트럼을 가지는 것을 보여준다.

ODPA 처리에 따른 전자 주입 특성을 확인해보기 위해 Fig. 4 (a)와 같이 electron-only device(EOD) 구조를 도입하였다. 아래 ITO 전극을 음극으로 하여 성능을 확인하였으며, 하부층에는 QD-LED와 동일하게 sol-gel ZnO 박막을 사용하였다. 그리고 정공의 개입이 없는 전자 주입 특성만을 확인해보기 위해, 정공 방지층(hole blocking layer, HBL)로서 ZnO NPs 박막을 도입하였다.

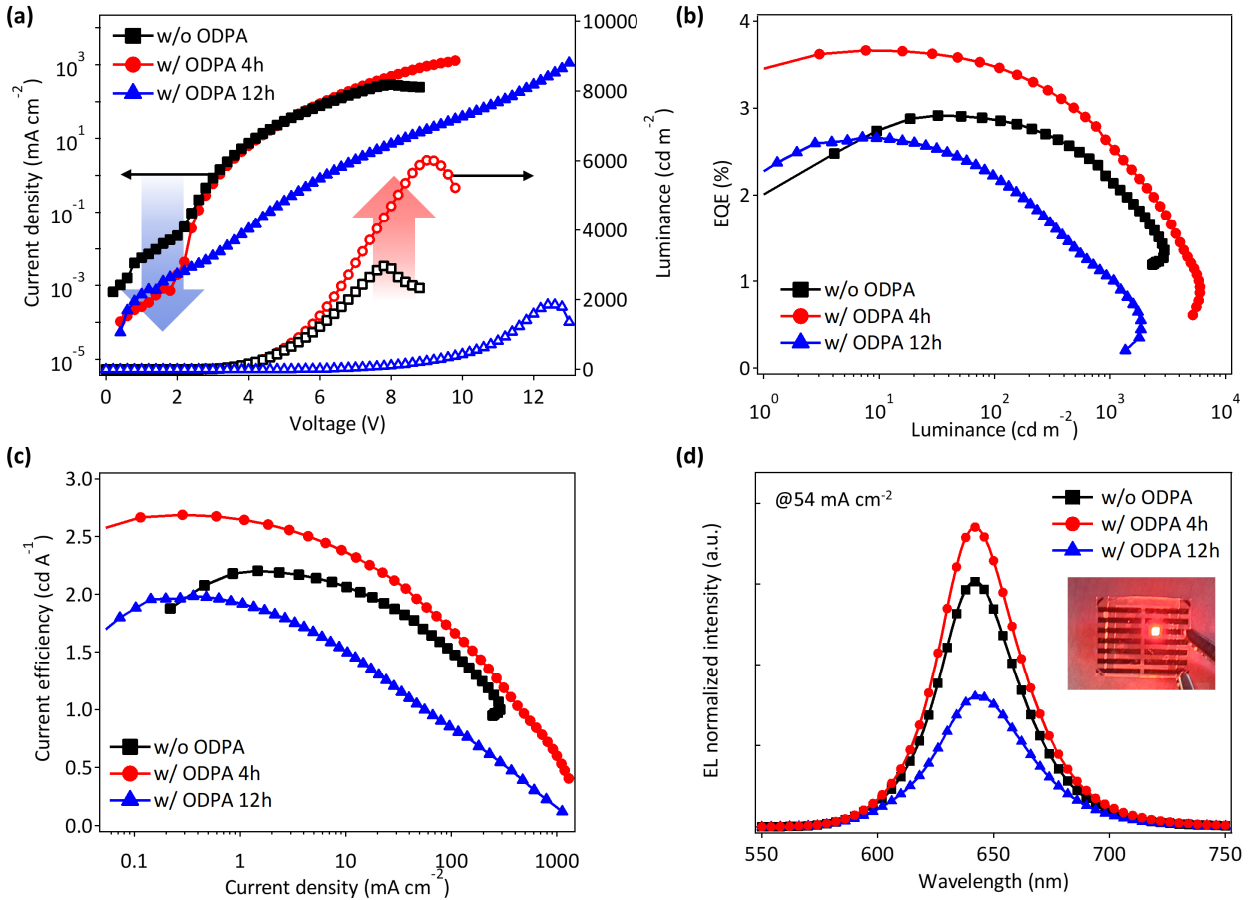


Fig. 3. Comparison of EL characteristics of QD-LEDs with and without ODPA-treatment. (a) Current density-voltage-luminance, (b) EQE-luminance, and (c) current efficiency-current density characteristics of the QD-LEDs with and without ODPA-treatment (d) EL spectra of the devices measured at the current density of 54 mA cm⁻². The inset shows uniform surface emission in QD-LEDs with ODPA-treatment.

그림 3. 기존 ZnO와 ODPA 처리한 ZnO를 기반으로 한 QD-LED의 전계 구동 비교 (a) 전류 밀도-전압-휘도 그래프. (b) EQE-휘도 그래프. (c) 전류 효율-전류 밀도 그래프. (d) 전계발광 (EL) 스펙트럼 (at 54 mA cm⁻²)과 ODPA 처리한 소자의 발광사진 (inset)

Fig. 4 (b)는 EOD의 전류 밀도-전압(current density-voltage) 그래프를 보여준다. ODPA 처리 안한 EOD의 경우 높은 전류 밀도를 가지는 것을 확인할 수 있고, 반면 ODPA를 처리한 두 소자의 경우 상대적으로 낮은 전류 밀도를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 전자의 주입을 억제하여 Fig. 3 (a)에서 누설 전류를 억제하고 전하의 균형을 조절함을 보여준다. ODPA를 12시간 처리한 소자는 ODPA를 4시간 처리한 소자보다 크게 전류 밀도가 낮아짐을 확인할 수 있다. 즉, 과도한 전자 억제를 야기하고, 전자보다 정공의 주입이 많아져 소자의 전하 불균형을 유발함을 확인할 수 있다.

마지막으로, Fig. 5를 통해 ODPA를 처리 안한 소자와 ODPA를 4시간 처리한 소자의 수명을 비교하였다. 1,000 cd m⁻²에서의 전류를 1분마다 인가하여, encapsulation을 한 소자를 측정하여 수명을 나타내었다. 기존 소자의

경우, 2.64시간만에 처음 휘도의 50% 지점에 도달하는 것을 확인할 수 있으며, ODPA를 처리한 소자는 3.94시간만에 처음 휘도의 50%에 도달하는 것을 보여준다. 이를 100 cd m⁻²에서의 수명으로 변환하기 위해, 수명 계산식

$$L_0^n T_{50} = \text{constant} \tag{1}$$

을 도입하였다. L_0 는 처음 휘도, T_{50} 는 처음 휘도의 50%가 되는 시간, n 은 가속 팩터이다. 이 때, 가속 팩터로 대표적인 값인 1.8을 대입하여 계산하면, ODPA를 처리한 소자의 100 cd m⁻²에서의 T_{50} 은 248.6시간이고 ODPA 처리 안한 소자의 T_{50} 은 166.6시간이다. 이를 통해 ODPA 처리를 통해 전자의 과도한 주입을 억제하여 전하의 균형을 맞추고, 오제 재결합(Auger recombination)을 줄여 소자의 수명을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

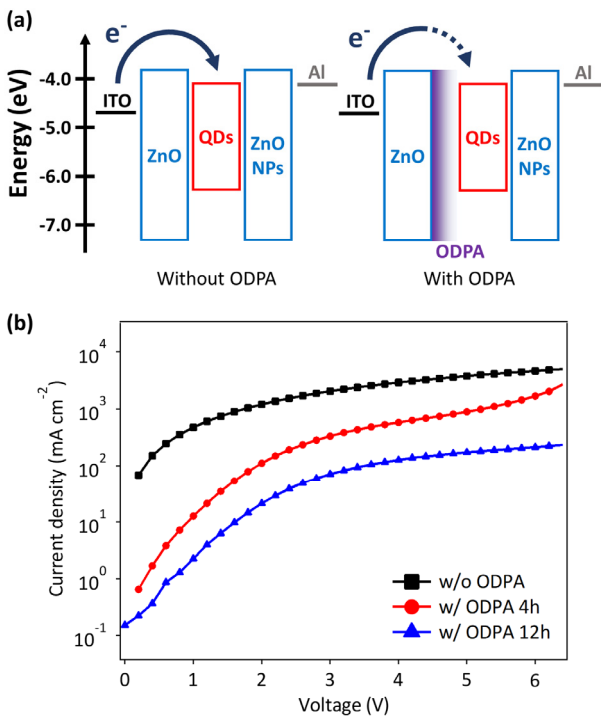


Fig. 4. (a) Energy band diagram of the electron-only devices (EODs) based on pristine ZnO (left) and ODPA-treated ZnO (right). (b) Current density-voltage characteristics of the EODs with and without ODPA-treatment.

그림 4. (a) 기존 ZnO (좌)와 ODPA 처리한 ZnO (우)를 이용한 EOD의 밴드 다이어그램. (b) EOD의 전류 밀도-전압 그래프

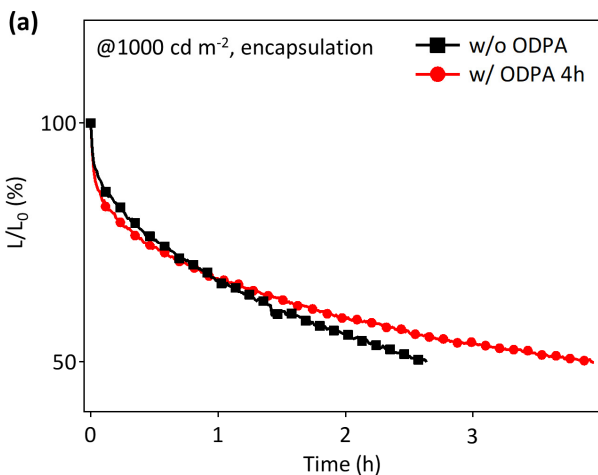


Fig. 5. (a) Comparison of lifetime of the QD-LEDs with and without ODPA-treatment measured at the initial luminance of $1,000 \text{ cd m}^{-2}$.

그림 5. (a) ODPA 처리 안한 소자와 ODPA 4시간 처리한 소자의 수명 (초기 휘도 $1,000 \text{ cd m}^{-2}$ 에서 측정)

III. 결론

본 연구에서는 QD-LED의 전하 균형도 개선을 위해 SAM 물질인 ODPA를 처리하여 소자를 제작하였다. ODPA를 처리한 sol-gel ZnO 박막을 검증하기 위해 AFM, 접촉각 측정법을 통해 표면 특성을 검증하였으며, EOD 구조를 통해 전자 주입 특성을 검증하였다. ODPA 처리는 기존의 연구들과 다르게 저온에서 쉬운 공정을 통해 처리가 가능하며, 전자의 주입을 줄여 누설 전류를 줄이고 전하 균형을 개선하는 것을 확인할 수 있었다. 그 결과, 양자점 발광 다이오드의 EQE는 25% 상승하였으며, 최대 휘도는 2배 이상 상승하였다. 또한, 수명인 T_{50} 는 2.64시간에서 3.94시간으로 약 50% 상승하였다. 본 연구를 통해 SAM을 이용한 QD-LED의 계면 처리는 효율과 안정성을 향상시키는 효과적인 방법임을 확인할 수 있었다. 이는 SAM 처리기술이 양자점 기반의 광전소자의 성능 향상에 다양하게 응용될 수 있음을 보여준다.

References

- [1] C. B. Murray, D. J. Norris, and M. G. Bawendi, "Synthesis and characterization of nearly monodisperse CdE (E = sulfur, selenium, tellurium) semiconductor nanocrystallites," *J. Am. Chem. Soc.*, Vol.115, No.19, pp.8706-8715, 1993. DOI: 10.1021/ja00072a025
- [2] X. Peng, "An essay on synthetic chemistry of colloidal nanocrystals," *Nano Res.*, Vol.2, No.6, pp.425-447, 2009. DOI: 10.1007/s12274-009-9047-2
- [3] W. K. Bae, S. Brovelli and V. I. Klimov, "Spectroscopic insights into the performance of quantum dot light-emitting diodes," *MRS Bull.*, Vol.38, No.9, pp.721-730, 2013. DOI: 10.1557/mrs.2013.182
- [4] 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. DOI: 10.1021/acs.chemrev.6b00169
- [5] M. Park, J. Roh, J. Lim, H. Lee, and D. Lee, "Double Metal Oxide Electron Transport Layers

- for Colloidal Quantum Dot Light-Emitting Diodes,” *Nanomaterials*, Vol.10, No.4, p.726, 2020.
DOI: 10.3390/nano10040726
- [6] 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, p.271, 2020.
DOI: 10.1038/s41467-019-14014-3
- [7] H. Yu, D. Kim, J. Lee, S. Baek, J. Lee, R. Singh, and F. So, “High-gain infrared-to-visible upconversion light-emitting phototransistors,” *Nat. Photonics*, Vol.10, No.2, pp.129-134, 2016.
DOI: 10.1038/s41467-019-14014-3
- [8] G. Shi, H. Wang, Y. Zhang, C. Cheng, T. Zhai, B. Chen, X. Liu, R. Jono, X. Mao, Y. Liu, X. Zhang, X. Ling, Y. Zhang, X. Meng, Y. Chen, S. Duhm, L. Zhang, T. Li, L. Wang, S. Xiong, T. Sagawa, T. Kubo, H. Segawa, Q. Shen, Z. Liu, and W. Ma, “The effect of water on colloidal quantum dot solar cells,” *Nat. Commun.*, Vol.12, No.1, p.4381, 2021.
- [9] W. K. Bae, Y.-S. Park, J. Lim, D. Lee, L. A. Padilha, H. McDaniel, I. Robel, C. Lee, J. M. Pietryga, and V. I. Klimov, “Controlling the influence of auger recombination on the performance of quantum-dot light-emitting diodes,” *Nature Communications*, Vol.4, No.1, 2013.
- [10] J. H. Chang, P. Park, H. Jung, B. G. Jeong, D. Hahm, G. Nagamine, J. Ko, J. Cho, L. A. Padilha, D. C. Lee, C. Lee, K. Char, and W. K. Bae, “Unraveling the origin of operational instability of quantum dot based light-emitting diodes,” *ACS Nano*, Vol.12, No.10, pp.10231-10239, 2018. DOI: 10.1021/acsnano.8b03386
- [11] X. Dai, Z. Zhang, Y. Jin, Y. Niu, H. Cao, X. Liang, L. Chen, J. Wang, and X. Peng, “Solution-processed, high-performance light-emitting diodes based on quantum dots,” *Nature*, Vol.515, No.7525, pp.96-99, 2014.
- [12] H. Jin, H. Moon, W. Lee, H. Hwangbo, S. H. Yong, H. K. Chung, and H. Chae, “Charge balance control of quantum dot light emitting diodes with atomic layer deposited aluminum oxide interlayers,” *RSC Adv.*, Vol.9, No.21, pp. 11634-11640, 2019. DOI: 10.1039/C9RA00145J
- [13] Z. Zhang, Y. Ye, C. Pu, Y. Deng, X. Dai, X. Chen, D. Chen, X. Zheng, Y. Gao, and W. Fang, “High-performance, solution-processed, and insulating-layer-free light-emitting diodes based on colloidal quantum dots,” *Adv. Mater.*, Vol.30, No.28, pp.1801387, 2018.
DOI: 10.1002/adma.201801387
- [14] J. Lim, Y.-S. Park, K. Wu, H. J. Yun and V. I. Klimov, “Droop-free colloidal quantum dot light-emitting diodes,” *Nano Lett.*, Vol.18, No.10, pp.6645-6653, 2018.
DOI: 10.1021/acs.nanolett.8b03457
- [15] J. Lin, X. Dai, X. Liang, D. Chen, X. Zheng, Y. Li, Y. Deng, H. Du, Y. Ye, D. Chen, C. Lin, L. Ma, Q. Bao, H. Zhang, L. Wang, X. Peng, and Y. Jin, “High-performance quantum-dot light-emitting diodes using NIO x hole-injection layers with a high and stable work function,” *Advanced Functional Materials*, Vol.30, No.5, p.1907265, 2019.
DOI: 10.1002/adfm.201907265
- [16] L. Li, Y. Luo, Q. Wu, L. Wang, G. Jia, T. Chen, C. Zhang, and X. Yang, “Efficient and bright green INP quantum dot light-emitting diodes enabled by a self-assembled dipole interface monolayer,” *Nanoscale*, Vol.15, No.6, pp.2837-2842, 2023.
- [17] L. Z. Borg, D. Lee, J. Lim, W. K. Bae, M. Park, S. Lee, C. Lee, K. Char, and R. Zentel, “The effect of band gap alignment on the hole transport from semiconducting block copolymers to quantum dots,” *J. Mater. Chem. C*, Vol.1, No.9, p.1722, 2013.
- [18] Y. Sun, J. H. Seo, C. J. Takacs, J. Seifert and A. J. Heeger, “Inverted Polymer Solar Cells Integrated with a Low-Temperature-Annealed Sol-Gel-Derived ZnO Film as an Electron Transport Layer,” *Adv. Mater.*, Vol.23, No.14, pp.1679-1683, 2011.
DOI: 10.1002/adma.201004301
- [19] J. Xu, L. Wang, X. Zhao, Y. Shi, Y. Shi and T. Liu, “High-Performance Blue Quantum Dot Light Emitting Diode via Solvent Optimization

Strategy for ZnO Nanoparticles,” *Nanomaterials*, Vol.11, No.4, p.959, 2021.

DOI: 10.3390/nano11040959

[20] D. K. Schwartz, “Mechanisms and kinetics of self-assembled monolayer formation,” *Annu. Rev. Phys. Chem.*, Vol.52, p.107, 2001.

DOI: 10.1146/annurev.physchem.52.1.107

BIOGRAPHY

Sangwook Park (Member)



2021 : BS degree in Electrical Engineering, Pusan National University.

2023 : MS degree in Electrical Engineering, Pusan National University.

Woon Ho Jung (Member)



2019 : BS degree in chemistry, Dankook University.

2021 : MS degree in chemistry, Dankook University.

2022~present : PhD degree course in Energy Science, Sungkyunkwan University.

Yeyun Bae (Member)



2022 : BS degree in Electrical Engineering, Pusan National University.

2022~present : MS degree course in Electrical Engineering, Pusan National University.

Jaehoon Lim (Member)



2007 : BS degree in Chemical and Biological Engineering, Seoul National University.

2013 : PhD degree in Chemical and Biological Engineering, Seoul National University.

2020~present : Assistant Professor, Dept. of Energy Science, Sungkyunkwan University.

2018~2019 : Assistant Professor, Dept. of Chemical Engineering, Ajou University.

2017~2018 : Assistant Research Professor, Center for High Technology Materials, University of New Mexico, United States.

2014~2017 : Post Doc. Researcher, Chemistry Division, Los Alamos National Laboratory.

Jeongkyun Roh (Member)



2012 : BS degree in Electrical and Electronic Engineering, POSTECH.

2014 : MS degree in Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University.

2016 : PhD degree in Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University.

2019~present : Assistant Professor, Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University.

2017~2019 : Post Doc. Researcher, Los Alamos National Laboratory.