

전자차단층 도입을 통한 전체 용액공정 기반의 역구조 InP 양자점 발광다이오드의 성능 향상

노희재¹ · 이경은¹ · 배예운¹ · 이재엽¹ · 노정균^{1,+}

Improved Performance of All-Solution-Processed Inverted InP Quantum Dot Light-Emitting Diodes Using Electron Blocking Layer

Heejae Roh¹, Kyoungun Lee¹, Yeyun Bae¹, Jaeyeop Lee¹, and Jeongkyun Roh^{1,+}

Abstract

Quantum dot light-emitting diodes (QD-LEDs) are emerging as next-generation displays owing to their high color purity, wide color gamut, and solution processability. Enhancing the efficiency of QD-LEDs involves preventing non-radiative recombination mechanisms, such as Auger and interfacial recombination. Generally, ZnO serves as the electron transport layer, which is known for its higher mobility compared to that of organic semiconductors and can lead to excessive electron injection. Some of the injected electrons pass through the quantum dot emissive layer and undergo non-radiative recombination near or within the organic hole transport layer (HTL), resulting in HTL degradation. Therefore, the implementation of electron blocking layers (EBLs) is essential; however, studies on all-solution-processed inverted InP QD-LEDs are limited. In this study, poly(9-vinylcarbazole) (PVK) is introduced as an EBL to mitigate HTL degradation and enhance the emission efficiency of inverted InP QD-LEDs. Using a single-carrier device, PVK was confirmed to effectively inhibit electron overflow into the HTL, even at extremely low thicknesses. The optimization of the PVK thickness also ensured minimal disruption of the hole-injection properties. Consequently, a 1.5-fold increase in the maximum luminance was achieved in the all-solution-processed inverted InP QD-LEDs with the EBL.

Keywords: Quantum dot, Quantum dot light-emitting diodes, Electron blocking layer, Single carrier device, All-solution-process

1. 서 론

양자점 발광다이오드(quantum dot light-emitting diodes, QD-LEDs)는 높은 색순도, 넓은 시야각, 그리고 핵 크기 조절을 통한 발광파장 제어가능성으로 차세대 디스플레이 소자로 주목받고 있다[1,2]. 특히 콜로이드 양자점은 잉크젯 프린팅(inkjet printing)이 가능하기 때문에 전체 용액공정(all-solution-process)으로 소자 제작이 가능하고, 이로 인해 대면적 디스플레이를 구현하기 위한 적합한 기술로 연구되어져 왔다[3]. 디스플레이 패널 제조에서의 생산성 향상과 대면적 디스플레이를 원하는 소비자들의

수요에 맞춰 8세대 이상의 원장(mother glass)의 필요성이 커지고 있는데, 열증착 방식의 경우 대형 원장을 사용하였을 때에 처짐(sagging) 현상이 발생하게 된다. 하지만 원장을 하부에 두는 잉크젯 프린팅의 경우 이러한 문제가 발생하지 않기 때문에 대면적 디스플레이 제작이 가능해지고[4], 이러한 이유로 전체 용액공정으로 제작한 양자점 발광다이오드에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다.

대면적 디스플레이 구현을 위해 전체 용액공정 가능성만큼 중요한 것은 발광 화소의 스위치 역할을 하는 박막 트랜지스터(thin-film transistor, TFT) 백플레인(backplane)과의 조합이다. 현재 대면적 디스플레이에 가장 많이 사용되는 TFT는 높은 전하이동도와 균일도, 우수한 off-current 특성을 가진 indium-gallium-zinc oxide (IGZO)를 기반으로 한 n-type TFT이다[5]. N-type TFT는 발광 화소의 전극으로 음극(cathode)을 요구하기 때문에 하부 전극을 통해 전자를 주입 받는 역구조(inverted structure) 양자점 발광다이오드에 대한 연구가 필요하다[6,7].

양자점 발광다이오드의 효율적인 발광을 위해서는 주입된 전하가 열로 방출되는 비발광 결함을 방지해야 한다. 대표적인 비

¹부산대학교 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. 28, 2024, Revised: Jul. 8, 2024, Accepted: Jul. 22, 2024)

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.

발광 결합 메커니즘으로는 전자-정공 주입 불균형으로 인한 오제 재결합(auger recombination)과 발광층 외 주변 전하수송층 또는 계면에서 발생하는 비발광 재결합이 있다[8]. 일반적으로 양자점 발광다이오드에서는 산화아연(zinc oxide, ZnO) 기반의 전자수송층과 유기반도체 기반의 정공수송층을 사용하는데, 유기반도체 대비 빠른 ZnO의 전자 이동도로 인하여 발광층에 전자가 과잉 주입되게 된다[9,10]. 과잉 주입된 전자는 발광층 내 전하 균형을 무너뜨려 비발광 오제결합을 유발할 뿐만 아니라 유기물 기반의 정공수송층으로 넘어가 비발광 재결합을 통해 유기물을 열화시키게 된다[11]. 유기 정공수송층으로 주입되는 전자를 막기 위해 발광층과 유기 정공수송층 계면에 poly(methyl methacrylate) (PMMA)와 같은 절연체를 전자차단층(electron blocking layer, EBL)으로 삽입한 연구가 보고되었지만 절연체 도입으로 인해 전반적인 전류 밀도가 감소하며 저전압 구동만 하는 한계를 지녔다[12]. 고효율 전체 용액공정 역구조 양자점 발광다이오드 구현을 위해서는 용액공정으로 형성이 가능하면서도 하부층 손상과 전하 주입 특성 저하를 유발하지 않는 전자차단층에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 과도한 전자 주입으로 인한 정공주입층의 열화를 막고 발광효율을 향상시키기 위해 poly(9-vinylcarbazole) (PVK)를 전자차단층으로 활용하였다. PVK 전자차단층 도입으로 전자가 정공수송층인 poly[(9,9-dioctylfluorenyl-2,7-diyl)-co-(4,4'-(N-(4-sec-butylphenyl) diphenylamine))] (TFB)로 넘어가는 것을 방지하였고, 이를 통해 전체 용액공정 InP 역구조 양자점 발광다이오드의 성능을 향상시켰다. PVK는 TFB 대비 낮은 lowest unoccupied molecular orbital (LUMO)를 가지고 있어 전자가 정공수송층으로 넘어가지 않고 발광층 내에서 머물 수 있도록 한다. 본 연구에서는 PVK를 활용하여 하부층 손상을 방지하며 용액공정으로 전자차단층을 도입하였으며, 전자차단층으로 인한 정공 주입 특성을 저하시키지 않기 위해 전자차단층 두께 최적화 연구를 수행하였다. 단일전하소자(single carrier device)를 통해 최적화된 PVK 전자차단층을 도입한 결과, 발광층으로의 정공 주입을 방해하지 않으면서 유기 정공수송층으로의 전자 주입을 억제하였다. 누설 전자 주입에 의한 유기 정공수송층의 열화를 방지한 결과, 전체 용액공정 기반 양자점 발광다이오드의 최대 휘도를 1.5배 상승시켰다.

2. 연구 방법

2.1 물질

Indium tin oxide (ITO) 기판은 AMG에서 구매하였다. Isopropanol (IPA) (99.9%), acetone (99.7%), dimethyl sulfoxide (DMSO)는 삼천 화학에서 구매하였다. 아세트산 아연(zinc acetate dihydrate) (99%), 아세트산 마그네슘(magnesium acetate tetrahydrate)

(98%), 에탄올아민(ethanolamine) (99.5%), m-xylene (99.8%), tetramethylammonium hydroxide (TMAH) (97%), ethanol (anhydrous, 99.9%), butanol (anhydrous, 99.9%), poly(9-vinylcarbazole) (PVK)는 Sigma-Aldrich에서 구매하였다. Poly(9,9-dioctylfluorene-alt-N-(4-sec-butylphenyl)-diphenylamine) (TFB)는 OSM에서 구매하였다. PEDOT:PSS solutions (in water, Clevious PVP AI4083)는 Heraeus Electronic Materials Division에서 구매하였다. Molybdenum oxide (MoOx) (99.995%) 파우더와 aluminum (Al) 펠렛, silver (Ag) 펠렛, gold (Au) 펠렛은 태원과학에서 구매하였다. 코어가 InP인 양자점을 유니암에서 구매하였다.

2.2 ZnMgO Nano Particles 합성

Zinc acetate dihydrate와 magnesium acetate tetrahydrate를 dimethyl sulfoxide (DMSO) 용액에 3분 동안 초음파 처리하고, 30°C에서 30분 동안 spinning rate 800 rpm으로 교반하였다. Tetramethylammonium hydroxide (TMAH)를 ethanol 10 ml에 초음파 처리하여 용해시켰다. TMAH 용액을 30 ml h⁻¹ 속력으로 30분 동안 앞서 만들어둔 DMSO 용액에 주입하였다. 이후, 4시간 동안 30°C에서 800 rpm의 속력으로 교반하였다. 형성된 용액을 4,000 rpm에서 10분간 원심분리(centrifuge)하는 과정을 두 번 반복하였다. Ethanolamine 0.1 ml를 용액에 주입하여 ligand 처리하였다. 4,000 rpm에서 10분간 원심분리하고 용매를 butanol로 치환하였다.

2.3 Electron-only device (EOD) 소자 제작

Indium-tin oxide (ITO) 기판 상부에 각 물질들을 적층하는 방식으로 EOD를 제작하였다. Acetone, isopropyl alcohol (IPA), deionized water 순서로 각각 15분간 초음파 세정을 진행하고 100°C 오븐에서 2시간 건조하였다. 표면에 흡착되어 있는 불순물을 제거해 표면 거칠기를 낮추기 위해 ITO 기판 표면에 UV-Ozone (UVO)을 15분간 처리하였다. 이후, 산소와 수분에 취약한 소자를 보호하기 위해 질소 분위기의 glove box에서 공정이 진행되었다. 20 mg/ml 농도의 ZnMgO 용액을 spinning rate 2,000 rpm으로 60초간 스핀 코팅하였다. 형성된 박막을 90°C에서 30분간 핫 플레이트를 통해 열처리하였다. Chlorobenzene에 각각 1 mg/ml과 3 mg/ml 농도로 분산된 TFB와 PVK를 spinning rate 3,000 rpm에서 40초간 스핀 코팅하고 110°C에서 30분간 핫 플레이트에서 열처리하였다. Octane에 10 mg/ml 농도로 분산된 InP QDs를 spinning rate 2,000 rpm에서 60초간 스핀 코팅하고 이어서 ZnMgO 용액도 동일 조건으로 스핀 코팅하였다. InP QDs와 ZnMgO 박막 모두 90°C에서 30분간 핫 플레이트에서 건조하였다. 챔버 내부 진공도 3×10^{-6} Torr 이하에서 Al을 2 A s⁻¹의 속도로 100 nm 두께로 진공 열증착(thermal evaporation)하였다.

2.4 Hole-only device (HOD) 소자 제작

EOD 소자 제작 시와 같이 ITO 기판을 세정하였다. ITO 기판 표면에 UV-Ozone을 15분간 처리하였다. Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS) 용액을 spinning rate 3,000 rpm에서 40초간 스핀 코팅한 후, 형성된 박막을 공기 중에서 150°C, 15분간 열처리하였다. 이후 공정은 산소와 수분에 취약한 소자를 보호하기 위해 질소 분위기의 glove box에서 진행하였다. 8 mg/ml 농도의 TFB 용액을 spinning rate 3,000 rpm으로 40초간 스핀 코팅한 후, 형성된 박막을 110°C에서 30분간 열처리하였다. 1 mg/ml과 3 mg/ml 농도의 PVK를 spinning rate 3,000 rpm에서 40초간 스핀 코팅하였다. 110°C에서 30분간 핫 플레이트에서 열처리하였다. Octane에 10 mg/ml 농도로 분산된 InP QDs를 spinning rate 2,000 rpm에서 60초간 스핀 코팅하고 90°C에서 30분간 핫 플레이트에서 건조하였다. 진공 챔버로 소자를 옮긴 후 TCTA, MoOx, Ag를 각각 40 nm, 10 nm, 100 nm 두께로 열 증착하였다. 모든 열 증착 공정은 챔버 내부 진공도 3×10^{-6} Torr 이하에서 진행하였다.

2.5 양자점 발광다이오드 소자 제작

세정과 UVO 처리가 끝난 기판위에 butanol에 20 mg/ml 농도로 용해된 ZnMgO를 2,000 rpm으로 60초간 스핀 코팅하고 핫 플레이트에서 90°C, 30분간 열처리하였다. Octane에 10 mg/ml 농도로 용해된 InP QDs를 ZnMgO 박막 위에 2,000 rpm으로 60초간 스핀 코팅하고 핫 플레이트에서 90°C, 30분간 열처리하였다. 각각 1 mg/ml (6 nm), 3 mg/ml (21 nm) 농도의 PVK를 3,000 rpm으로 40초간 스핀 코팅하고 핫 플레이트에서 110°C, 30분간 열처리하였다. m-Xylene에 8 mg/ml 농도로 용해된 TFB를 3,000 rpm으로 40초간 스핀 코팅하고 핫 플레이트에서 110°C, 30분간 열처리하였다. PEDOT:PSS를 IPA와 1:1 부피 비율로 섞고 30분간 초음파 처리하였다. 이후 혼합 용액을 TFB 박막 위에서 spinning rate 3,000 rpm으로 40초간 스핀 코팅하고 핫 플레이트에서 110°C, 20분간 열처리하였다. 챔버 내부 진공도 3×10^{-6} Torr 이하에서 Au (80 nm)을 2 A s^{-1} 의 속도로 진공 열증착하였다.

2.6 소자 특성 분석

전류 밀도와 전압 측정은 Tektronix사의 Keithley 2450 Source Meter를 이용하였다. 휘도 측정을 위해 Konica Minolta사의 CS-2000을 사용하였다. PVK 박막의 두께 측정을 위해 Nanoview사의 spectroscopic ellipsometer인 SE MG-1000을 사용하였다. EOD, HOD, 양자점 발광다이오드 소자 모두 공정 후 epoxy resin을 사용해 봉지(encapsulation)하여 측정을 진행하였다.

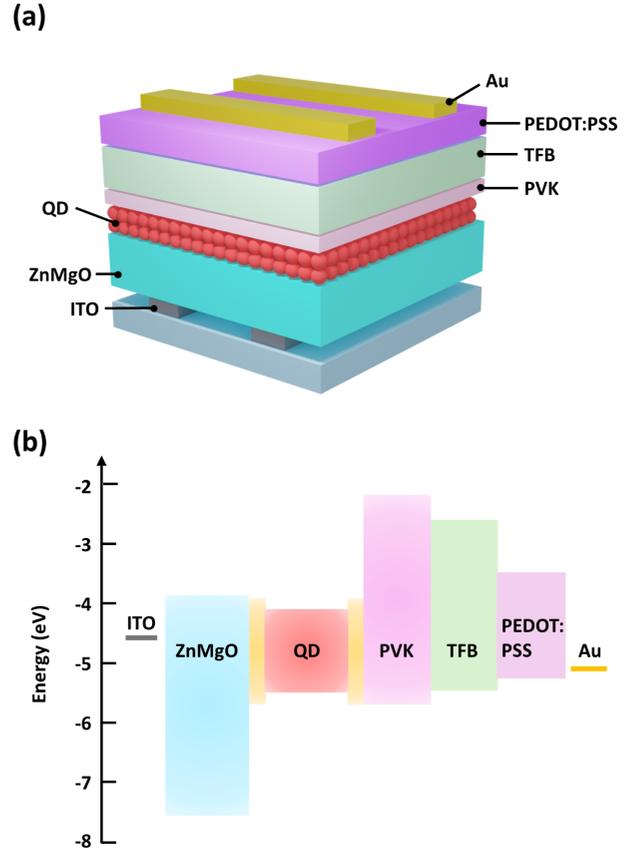


Fig. 1. Schematic illustrations of (a) device structure and (b) energy band diagram of QD-LEDs.

3. 결과 및 고찰

소자의 구조와 energy band diagram은 Fig. 1에 나타내었다. 본 연구는 전극을 제외한 모든 층들을 용액공정을 통해 제작하였는데, Fig. 1 (a)를 보면 알 수 있듯이 QD 층 아래에 유기물 층이 놓이는 정구조와 달리 역구조에서는 QD 층 위에 유기물 층이 쌓이게 되어 그 유기물의 용매가 QD 층을 씻어내어 손상 시키지 않도록 해야한다. 전체 용액공정으로 양자점 발광다이오드를 제작하기 위해 QD 발광층 위 층 3번의 용액 공정을 진행하였는데, 각각의 층의 역할은 다음과 같다. PEDOT:PSS는 정공주입층으로써 전극으로부터 정공의 주입을 돕는다[13]. TFB는 높은 정공 이동도를 가진 정공수송층으로써 정공이 손쉽게 발광층까지 이동될 수 있도록 한다[14]. PVK는 ZnMgO로부터 발광층에 주입된 전자가 TFB 층으로 넘어가는 것을 막는 전자 차단층의 역할을 한다. Fig. 1 (b)에서 비교할 수 있듯 PVK는 TFB에 비해 낮은 lowest unoccupied molecular orbital (LUMO)를 가지고 있어 전자를 QD 층 내에 가두기에 적합한 소재이다[15]. 하지만 TFB 대비 다소 떨어지는 정공 이동도를 가지고 있어 정공의 주입을 방해하지 않으면서도 전자 차단 역할을 할 수 있는 PVK의 두께 최적화 연구가 수행되어야 한다.

3.1 EOD를 통한 전자 차단 특성 분석

양자점 발광다이오드에서 QD 발광층과 TFB 정공수송층 사이에 위치하여 전자차단층의 역할을 하는 PVK가 그 기능을 제대로 하는지 알아보기 위하여 Fig. 2 (a)와 같은 구성으로 electron-only device (EOD)를 제작하였다. TFB와 PVK의 용매로 인한 QD 층의 손상에 의한 누설 전류 영향을 측정에서 배제시키고 오직 물질의 에너지 준위에 따른 전자 차단 특성만을 고려하기 위해 QD 층 하부에 유기물 층을 형성하였다.

Fig. 2 (b)에서 각각 3 mg/ml의 농도로 분산시킨 TFB와 PVK로 제작한 EOD를 비교해 보았을 때, TFB 소자 대비 PVK 소자의 전류 밀도(current density)가 모든 구간에서 낮게 흐르며 PVK가 전자를 효과적으로 차단함을 보여주었다.

특히, 각각 1 mg/ml의 농도로 분산시킨 TFB와 PVK 소자를 비교하였을 때에도 PVK가 효과적인 전자차단층으로 동작하였다. TFB (1 mg/ml) 소자는 유기물을 삽입하지 않은 소자에 비해 유사한 전류 밀도를 보이며 전자차단층으로 기능하기에는 부

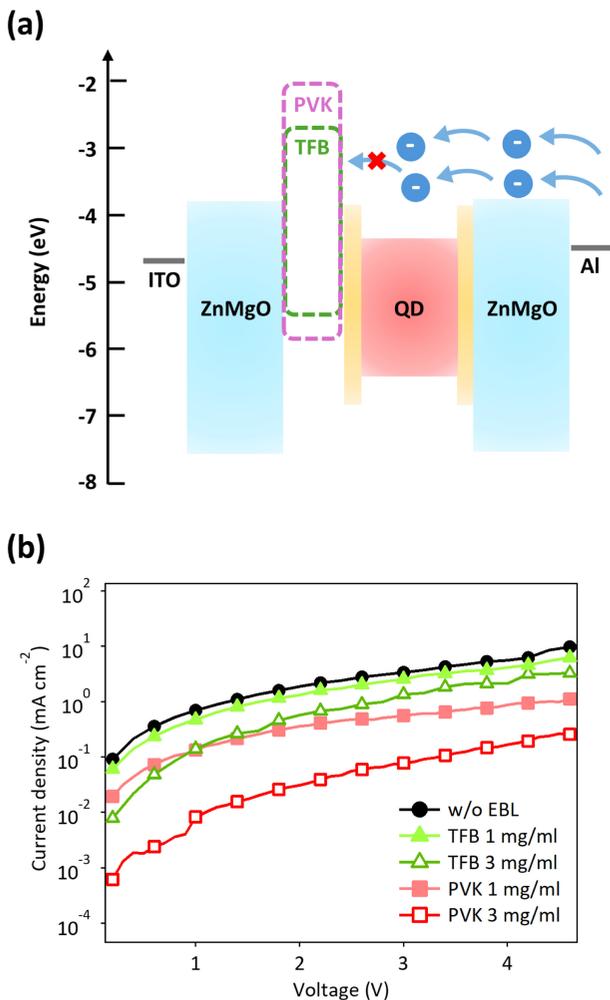


Fig. 2. (a) Schematic illustration of energy band diagram and (b) J - V characteristics of the EODs with TFB and PVK interlayers.

족함을 보여준다. 하지만 PVK (1 mg/ml) 소자는 낮은 농도에도 불구하고 1 V 이상에서는 TFB (3 mg/ml) 소자보다도 낮은 전류 밀도를 흘려주며 전자를 효과적으로 차단할 수 있음을 보여준다.

PVK가 TFB 대비 우수한 전자차단층이라는 것과 1 mg/ml의 낮은 농도로도 QD 층으로부터의 전자를 성공적으로 제어한다는 사실을 EOD 실험을 통해 도출하였다.

3.2 HOD를 통한 정공 주입 특성 분석

앞선 EOD 실험을 통해 전자차단층으로써 PVK의 성능은 입증되었지만 TFB 대비 낮은 정공 이동도로 인하여 정공 주입을 방해할 수 있다. PVK로 인한 정공 주입 특성 변화를 확인하기 위해 Fig. 3 (a)와 같은 구성으로 HOD를 제작하였다.

Fig. 3 (b)의 전압에 따른 전류 밀도를 보았을 때, PVK 층을 삽입하지 않은 소자 대비 3 mg/ml 농도의 PVK를 삽입한 소자는 0 V에서 10 V까지 모든 구간에서 낮은 전류 밀도를 보이며 QD 층으로의 정공 주입을 크게 억제함을 보여주었다. 반면, 1 mg/ml 농도의 PVK를 삽입한 소자에서는 PVK를 삽입하지 않은 소자 대비 근사한 전류 밀도를 흘리며 정공 주입에 장애가 되지 않음을 알 수 있었다.

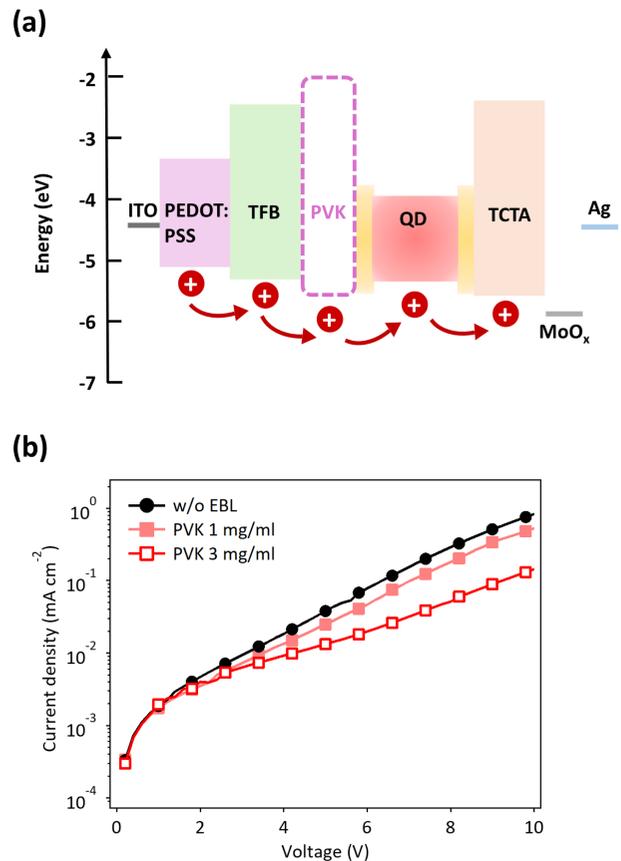


Fig. 3. (a) Schematic illustration of energy band diagram and (b) J - V characteristics of the HODs with the PVK EBL with different concentrations.

1 mg/ml의 낮은 농도로 PVK 박막을 형성하면 얇은 두께의 박막이 형성되어 QD 층으로의 정공 주입을 방해하지 않는다는 결론을 HOD 소자들을 통해 밝혀내었다. EOD 실험의 결과와 함께 보자면 PVK (1 mg/ml)는 전자를 효과적으로 차단함과 동시에 정공 주입 특성 또한 유지시키는 전자차단층으로 동작할 것임을 알 수 있다.

3.3 양자점 발광다이오드 소자 성능 분석

PVK가 전자차단층으로 기능할 때에 소자 성능 향상에 기여하는 양자점 발광다이오드 제작을 통해 알아보았다. Fig. 4 (a)를 보았을 때, PVK (1 mg/ml, 3 mg/ml)를 전자차단층으로 삽입한 소자들이 삽입하지 않은 소자 대비 낮은 전류 밀도를 보였다. 특히 turn-on 이전인 2 V 이하에서 매우 낮은 전류를 흘리며 우수한 off-current 특성을 보였다. Fig. 4 (b)를 통해 QD 층에서 TFB 층으로 넘어가는 전자로 인한 누설전류를 막아준 PVK (1 mg/ml, 3 mg/ml) 삽입 소자들의 효율이 크게 상승하였음을 볼 수 있다. 눈 여겨 보아야 할 것은 PVK 소자(1 mg/ml)의 효율은 고전압에서도 떨어지지 않고 유지된다. PVK (3 mg/ml) 소자는 고전압으로

Table 1. Device characteristics of all-solution-processed inverted InP QD-LEDs with various PVK concentrations.

	V_{on}^a (V)	L_{max}^b ($cd\ m^{-2}$)	EQE_{max}^c (%)	Op. V^d (V)
w/o EBL	1.8	9,223	0.44	1.8
PVK 3 mg/ml	2.0	9,438	0.61	2.0
PVK 1 mg/ml	2.0	13,885	0.69	1.8

- a. Measured voltage when luminance was $1\ cd\ m^{-2}$
- b. Maximum luminance
- c. Maximum external quantum efficiency
- d. Measured voltage when current density was $5\ mA\ cm^{-2}$

로 갈수록 효율이 빠르게 감소하는 것을 볼 수 있는데, 두꺼운 PVK 전자차단층으로 인하여 정공의 주입이 원활히 되지 않아 발광층에서의 전하 균형(charge balance)이 맞춰지지 않았기 때문이다. PVK (1 mg/ml) 소자는 HOD 실험에서 확인하였듯 정공 주입의 속도가 PVK (3 mg/ml) 소자 대비 빨라 발광층에서의 전하 균형을 달성하여 고전압에서까지 발광효율을 유지할 수 있었다.

QD 발광층에서 TFB 정공수송층으로 누설되는 전자를 막고, QD 층으로 주입되는 정공의 주입을 방해하지 않은 결과, Table 1에서 볼 수 있듯이 PVK (1 mg/ml)를 전자차단층으로 쓴 소자의 최대 휘도가 $13,885\ cd\ m^{-2}$ 를 기록하며 전자차단층이 없는 소자 대비 1.5배 상승하였다.

4. 결 론

본 연구는 용액공정 기반 역구조 InP QD-LEDs에서 발광층에서 정공수송층으로 넘어가는 전자로 인해 생기는 누설 전류를 막고자 전자차단층을 도입하였다. EOD를 제작하여 전자차단층으로 쓰인 PVK가 TFB 대비 전자 차단 능력이 우수함을 검증하였다. 또한, 낮은 농도로 PVK 박막을 QD 층 위에 형성하는 것이 정공 주입을 방해하지 않는다는 것을 HOD 실험을 통해 확인하였다. 앞의 실험들을 토대로 PVK 전자차단층을 삽입한 양자점 발광다이오드를 제작하였을 때, 고전압에서도 안정적인 효율을 유지함과 동시에 최대 휘도 $13,885\ cd\ m^{-2}$ 를 기록하여 전자차단층이 없는 소자 대비 최대 휘도가 1.5배 상승하였다. 본 연구에서 도입된 전하차단층은 역구조 InP 양자점 발광다이오드 뿐만 아니라 전체 용액공정으로 제작되는 광전소자 성능향상에 다양하게 활용 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

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

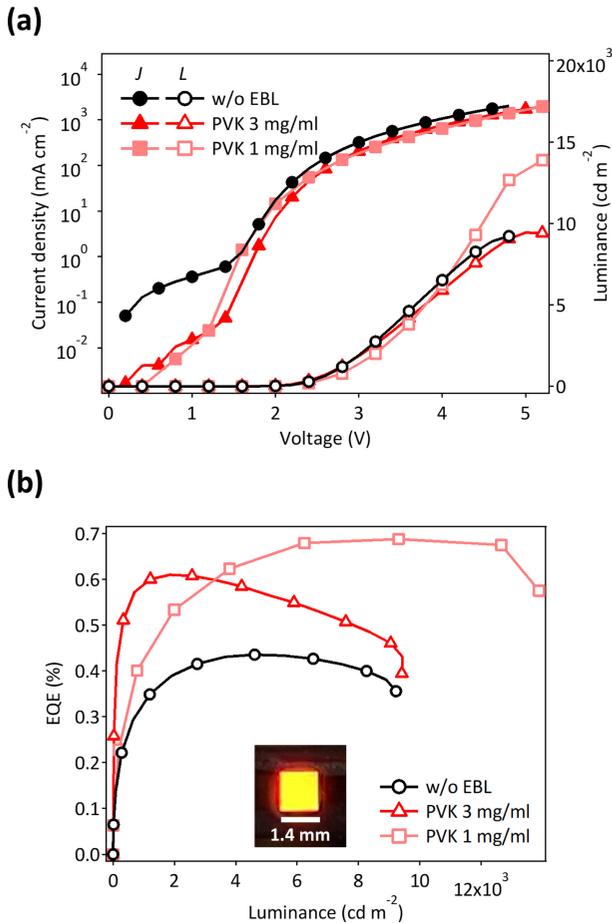


Fig. 4. Device characteristics of QD-LEDs. (a) J-V-L, (b) EQE-L characteristics of the devices.

REFERENCES

- [1] J. Kim, J. Roh, M. Park, and C. Lee, "Recent Advances and Challenges of Colloidal Quantum Dot Light-Emitting Diodes for Display Applications", *Adv. Mater.*, Vol. 36, No. 20, p. 2212220, 2023.
- [2] J. Lee, H. Jo, M. Choi, S. Park, J. Oh, K. Lee, Y. Bae, S. Rhee, and J. Roh, "Recent Progress on Quantum Dot Patterning Technologies for Commercialization of QD-LEDs: Current Status, Future Prospects, and Exploratory Approaches", *Small Methods*, Vol. 8, No. 7, p. 2301224, 2024.
- [3] S. Jia, H. Tang, J. Ma, S. Ding, X. Qu, B. Xu, Z. Wu, G. Li, P. Liu, and K. Wang, "High performance inkjet-printed quantum-dot light-emitting diodes with high operational stability", *Adv. Opt. Mater.*, Vol. 9, No. 22, p. 2101069, 2021.
- [4] H. Yoshida, S. Nakatani, T. Inoue, Y. Usui, and F. Ohtsuka, "Mura-free G8. 5 220ppi inkjet printing technology for OLED and QLED display panels", *J. Soc. Inf. Disp.*, Vol. 32, No. 5, pp. 255-266, 2024.
- [5] J. F. Wager, "TFT technology: Advancements and opportunities for improvement", *Inf. Disp.*, Vol. 36, No. 2, pp. 9-13, 2020.
- [6] C. Y. Lee, N. Naik Mude, R. Lampande, K. J. Eun, J. E. Yeom, H. S. Choi, S. H. Sohn, J. M. Yoo, and J. H. Kwon, "Efficient cadmium-free inverted red quantum dot light-emitting diodes", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 11, No. 40, pp. 36917-36924, 2019.
- [7] I. Jang, J. Kim, C. Ippen, T. Greco, M. S. Oh, J. Lee, W. K. Kim, A. Wedel, C. J. Han, and S. K. Park, "Inverted InP quantum dot light-emitting diodes using low-temperature solution-processed metal-oxide as an electron transport layer", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 54, No. 2S, p. 02BC01, 2014.
- [8] Y. Lee, D.-Y. Jo, T. Kim, J.-H. Jo, J. Park, H. Yang, and D. Kim, "Effectual interface and defect engineering for auger recombination suppression in bright InP/ZnSeS/ZnS quantum dots", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 14, No. 10, pp. 12479-12487, 2022.
- [9] Y. Sun, Y. Jiang, H. Peng, J. Wei, S. Zhang, and S. Chen, "Efficient quantum dot light-emitting diodes with a Zn_{0.85}Mg_{0.15}O interfacial modification layer", *Nanoscale*, Vol. 9, No. 26, pp. 8962-8969, 2017.
- [10] M. Chrzanowski, G. Zatyrb, P. Sitarek, and A. Podhoro-decki, "Effect of air exposure of ZnMgO nanoparticle electron transport layer on efficiency of quantum-dot light-emitting diodes", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 13, No. 17, pp. 20305-20312, 2021.
- [11] P. Gao, Z. Chen, and S. Chen, "Electron-Induced Degradation in Blue Quantum-Dot Light-Emitting Diodes", *Adv. Mater.*, Vol. 36, No. 7, p. 2309123, 2024.
- [12] X. Xue, J. Dong, S. Wang, H. Zhang, H. Zhang, J. Zhao, and W. Ji, "Degradation of quantum dot light emitting diodes, the case under a low driving level", *J. Mater. Chem. C*, Vol. 8, No. 6, pp. 2014-2018, 2020.
- [13] Z. Liu, L. Wu, J. Qian, J. Peng, R. Liu, Y. Xu, X. Shi, C. Qi, and S. Ye, "Tuned transport behavior of the IPA-treated PEDOT: PSS flexible temperature sensor via screen printing", *J. Electron. Mater.*, Vol. 50, pp. 2356-2364, 2021.
- [14] L. Wang, T. Chen, Q. Lin, H. Shen, A. Wang, H. Wang, C. Li, and L. S. Li, "High-performance azure blue quantum dot light-emitting diodes via doping PVK in emitting layer", *Org. Electron.*, Vol. 37, pp. 280-286, 2016.
- [15] J. Jeong, J. Lee, H. Lee, G. Hyun, S. Park, Y. Yi, S. W. Cho, and H. Lee, "Energy level alignment and hole injection property of poly (9-vinylcarbazole)/indium tin oxide interface", *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 706, pp. 317-322, 2018.