


고효율 백색 LED를 위한 양자점 직접 증착 기반 세라믹 형광체 플레이트

홍지우^{1,2}, 김성훈^{1,2} 

¹ 동의대학교 응용화학과

² 동의대학교 Brain Busan 21 Plus 센터

Quantum Dot Direct Deposition-Based Ceramic Phosphor Plates for High-Efficiency White LEDs

Jiwoo Hong^{1,2} and Sunghoon Kim^{1,2}

¹ Department of Applied Chemistry, Dong-Eui University, Busan 47340, Korea

² Center for Brain Busan 21 Plus Program, Dong-Eui University, Busan 47340, Korea

(Received December 23, 2024; Revised December 27, 2024; Accepted December 30, 2024)

Abstract: This study explores the realization of high-efficiency white LED lighting by applying cyan-emitting quantum dot (C-QD) and red-emitting quantum dot (R-QD) deposition without any host matrix onto a yellow-emitting phosphor-in-glass (Y-PIG) substrate using an aerosol-assisted deposition (AAD) process. The AAD process facilitates the direct formation of densely packed QD-deposited layers on the substrate, effectively addressing challenges such as optical efficiency loss and degradation typically associated with organic host matrices. C-QD and R-QD coatings, deposited with thicknesses of 0.84 μm and 0.77 μm on the upper and lower Y-PIG substrate, exhibited robust color conversion properties. These films achieved a luminous efficacy of 77 lm/W and a high color rendering index (CRI) of 96.8 under blue light excitation. The dual-layer structure produced high-quality light closely resembling natural daylight, as confirmed through real image. Consequently, the research suggests the potential of AAD-based QD deposition to achieve superior performance without relying on host matrices, offering a viable solution for high-efficiency lighting applications. Further optimization of deposition parameters and exploration of diverse substrates and QD material combinations are expected to expand the applicability of this technique in future research.

Keywords: Phosphor-in-glass, Aerosol-assisted deposition, Quantum dot, Down-conversion, White LED

1. 서론

고출력 청색 LED 기반으로 한 실 내외 조명, 특수 조명 및 자동차 조명 등에 적용가능한 색 변환 소재와 공정 기술

✉ Sunghoon Kim; hoon@deu.ac.kr

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.

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.

은 지속적으로 연구되고 있다 [1,2]. 현재 백색 LED 구현에 주로 사용되는 색 변환 소재 및 제조 기술은 무기 형광체를 실리콘 수지에 혼합하거나, 세라믹 모재를 활용한 phosphor-in-glass (PIG) 형태의 세라믹 형광체 플레이트를 포함한다. PIG는 저 융점 유리 와 무기 형광체를 혼합하여 소결하는 방식으로 형광체가 유리 매트릭스 안에 분산되어 기존의 실리콘 수지 기반의 형광체 봉지재에서 발생하는 수분 및 열 변색으로 인한 휘도 감소(thermal

quenching) 문제를 효과적으로 해결할 수 있다 [3-5]. 또한, PIG는 저온 소결 공정을 통해 대량생산이 가능하고, 다양한 형광체 조합을 통해 넓은 색 구현 범위를 제공할 수 있어 조명 및 디스플레이 산업에서 그 응용범위가 점차 확대되고 있다 [6,7].

한편, 콜로이드 양자점(quantum dot, QD)은 우수한 발광 효율과 좁은 발광 스펙트럼 반치폭(full width at half maximum, FWHM)을 통해 높은 색 순도를 구현할 수 있다 [8]. 또한 QD의 조성 및 크기 제어를 통해 발광 파장 대역을 세밀하게 조절할 수 있어 효율적인 컬러 엔지니어링을 가능하게 하는 차세대 광 변환 소재로 주목받고 있다 [8]. QD를 색 변환 부품으로 가공하는 기존에 보고된 대표적인 방법으로는 고분자 수지를 호스트 매트릭스(host matrix)로 사용하여 QD를 수지 내에 고르게 분산시켜 가교 과정을 통해 필름 형태로 제작하는 방식이 있다. 최근에는 QD 잉크를 제조하여 잉크젯 프린팅(ink jet printing) 공정을 통해 색변환이 필요한 위치에 직접 도포하는 방법도 활발히 연구되고 있다 [9,10]. 특히 고분자 수지 기반 매트릭스는 스핀 코팅, 드롭 코팅, 슬롯 다이 코팅과 같은 저비용 공정에 활용될 수 있어 산업적 응용 가능성이 높다. 또한, 높은 투명성을 가진 고분자 소재를 사용하면 광원의 투과율이 증가시켜 발광 효율을 극대화할 수 있다 [11].

그러나, QD를 수지 매트릭스에 분산시키는 방식은 몇 가지 한계를 가진다. 선행연구에 따르면, 실리콘 수지에 분산된 QD 필름의 경우, QD표면의 리간드가 분리되면서 실리콘 수지의 경화과정에 영향을 미칠 수 있으며, QD표면 결합이 증가함에 따라 수지 가교를 위한 금속 촉매와의 표면 반응으로 인해 발광 효율 저하될 수 있다 [12]. 이러한 문제는 QD/고분자 수지 복합체의 불안정성에서 비롯된 구조적 화학적 변성으로 이어져 QD의 광 성능 저하를 초래할 수 있다. 결과적으로, QD와 상용성이 높은 고분자 수지 소재의 선택이 제한적일 수 있다. 또한, QD/고분자 수지 복합 필름의 두께가 증가하면 광원의 투과율이 감소하고, 이는 광 변환 효율의 감소로 직결된다. 스핀 코팅과 드롭 코팅과 같은 기존 공정에서는 필름 두께에 따라 성능 저하가 보고된 바 있으며, 이에 따라 QD필름 개발에서는 발광 특성을 유지하면서 안정적인 필름 구조를 확보해야 하는 상충관계가 존재한다 [13].

따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해 전통적 코팅 공정 방식 외에 새로운 필름 제조 기술의 필요성이 제기되고 있다. 본 연구에서는 호스트 매트릭스를 사용하지 않고 콜로이드 상태의 QD를 직접 증착 하는 방식인 aerosol-assisted deposition (AAD)공정을 도입하였다. 이를 통해서 매트릭스와 QD 간의 불안정성 문제를 근본적

으로 해결하면서, 수 마이크로미터(μm) 수준의 얇은 코팅 두께로도 원하는 색 변환 특성을 구현할 수 있음을 확인하였다 [14]. 이 공정은 QD의 고유한 발광 특성을 보존하면서, 기존 QD/고분자 수지 복합체 필름 대비 훨씬 얇은 증착 두께로 광 변환 효율을 크게 개선할 수 있는 공정의 장점을 시사한다.

또한, PIG를 AAD 기판으로 사용하여 QD를 증착한 QD/PIG 하이브리드 구조를 기반으로 백색 발광 다이오드(wLED)를 구현하였다. Yellow-emitting PIG (Y-PIG) 위에 red-emitting QD (R-QD)를 AAD공정으로 증착하여 remote-type LED 패키지를 제작하였으며, 추가적으로, cyan-emitting QD (C-QD)를 함께 도입하여 양면 증착 방식을 적용하였다. 이 방법을 통해서 청색 LED 광원 조사 시 QD 증착 층에서 발생할 수 있는 자체 광흡수(self-absorption) 문제를 최소화하고 광 경로를 최적화함으로써 태양광에 가까운 높은 연색지수를 구현하였다.

본 연구를 통해 AAD 공정을 활용한 QD 증착 필름은 기존의 QD/고분자 수지 복합체 필름의 문제점 개선을 통해 광변환 효율과 연색지수를 효과적으로 강화하였으며, 이는 청색 LED기반 고성능 발광 소자 제조에 새로운 방향을 제시할 수 있다고 판단된다. 향후 본 연구의 결과는 고 신뢰성이 요구되는 차량 조명, 고연색지수가 필수적인 특수 조명 등 다양한 실내외 조명 응용 분야에서 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 실험 방법

2.1 Yellow-PIG 제작

Glass frit과 LuAG ($\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)은 각각 1.5, 2.0, 2.5, 4.5 wt% 함량을 조절하여 혼합하였다. 혼합은 알루미늄 유발을 사용해서 균일하게 이루어졌으며, 혼합된 분말은 일축 가압 성형기를 통해 약 3분간 성형되었다. 성형된 시료는 625°C 로 설정된 전기로에서 10분간 열처리를 통해 소결하였다. 소결 후, PIG 플레이트는 균일한 두께와 매끄러운 표면을 확보하기 위해 폴리싱 과정을 거쳤으며, 최종적으로 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 크기의 디스크 형태의 세라믹 시료로 제작하였다.

2.2 Red-emitting QD 합성

적색 CdZnSe/ZnS QD는 [15]에 따라 CdO와 zinc acetate를 1-octadecene (ODE) 및 OA와 함께 Cd:Zn 비

을 1:2로 혼합한 후, 110°C에서 90분간 진공 탈기 과정을 거쳤다. 혼합물은 불활성 질소 분위기에서 300°C까지 가열하여 투명한 용액을 형성하였다. 이후, Se를 TOP에 용해한 용액을 첨가하여 코어 성장을 진행하였으며, dodecanethiol (DDT)을 투입하여 성장을 추가로 조절하였다. S를 포함한 용액을 첨가한 뒤, shell의 성장은 총 10분간 수행되었으며, 마지막으로 DDT를 추가하여 성장을 최적화하였다.

2.3 Cyan-emitting QD 합성

[16]에서 보고된 방법을 기반으로 하였으며, 일부 조건을 수정하여 최적화하였다. 청색 CdSe-based core/gradient alloy shell/shell (CGASS) 합성을 위해 CdO (0.4 mmol)와 zinc stearate (8 mmol)를 1-octadecene (ODE, 10 mL) 및 oleic acid (OA, 33.6 mmol)와 함께 혼합하였다. 이때 Cd와 Zn의 비율은 1:20으로 설정하였다. 혼합물은 140°C에서 20분간 진공 탈기 과정을 거친 후, 초고순도 질소(N₂) 분위기를 유지하며 300°C까지 가열하여 투명한 용액을 형성하였다. 이후, Se (0.4 mmol)과 S (8 mmol)을 trioctylphosphine (TOP, 4 mL)에 용해한 용액(Se와 S의 비율 1:20)을 용액에 순간적으로 첨가하였다. Shell의 성장은 280°C에서 수행하였다.

2.4 PIG 기판에 양자점 증착 및 양면 증착 방법 (AAD 공정)

QD 증착은 PIG 기판 위에서 AAD 공정을 통해 수행하고, 양면 코팅 방식이 적용하였다. 코팅 과정에서 톨루엔에 분산된 R-QD 및 C-QD 용액이 사용되었으며, 실험은

그림 1(c)에 나타난 진공 상온 분사 공정 장비를 이용하여 진행하였다. 공정 가스로는 질소 가스를 선택하였다. 가스 유량을 5,000 mL/min으로 실험을 진행하고, 사이즈 0.6 mm 인 슬릿(slit) 노즐을 사용하여 25 × 25 mm²의 면적을 코팅하였으며, 노즐과 기판과의 거리는 3 mm, 기판의 이동 속도는 20 mm/s 로 각각 고정하였다. 증착 챔버 내의 압력이 0.08 Torr 일 때 증착을 시작하였고, 진공도는 1.2 torr를 유지하였다.

2.5 시료 분석

증착 된 QD 코팅층의 광학적 특성은 3V, 120 mA로 작동하는 InGaN 청색 칩 광원 아래에서 평가하였다. 측정은 Integrating Sphere (LMS-120, Nanomaterials & Application Lab, 동의대학교)를 사용하여 수행하였다. 증착층의 구조는 field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM, JSM-IT800, Converging Materials Core Facility, 동의대학교)를 통해 분석하였으며, 양자점의 입자 크기는 high-resolution transmission electron microscopy (HR-TEM, JEM-2100F, Korea Advanced Nano Fab Center)를 이용하여 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1(a)는 lutetium aluminum garnet (LuAG) 형광체와 저용점 glass frit (GF)를 혼합하여 압력을 가해 고밀도의 성형체를 제작한 후, 소결 공정을 통해 Y-PIG를 제작하는 과정을 보여준다. 이를 통해 형광체와 유리 매트릭스

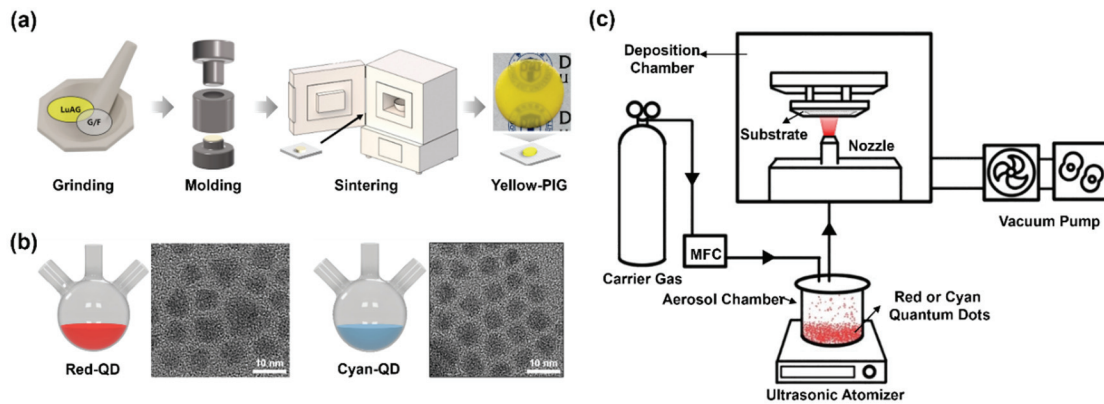


Fig. 1. Schematic diagrams and TEM images: (a) The fabrication process for ceramic composite phosphor, including mixing of LuAG and phosphor materials, pellet formation by pressing, sintering in a furnace, and producing the sintered ceramic phosphor, (b) TEM images of synthesized QD through solution processing, showing R-QD and C-QD, and (c) the AAD system for QD layer deposition.

의 균일한 혼합과 치밀한 구조 형성을 통해 높은 발광효율을 갖는 Y-PIG가 제작된다. 그림 1(b)는 콜로이드 합성법으로 제작된 CdZnSe/ZnS core/shell QD (R-QD)와 CGASS QD (C-QD) 나노 결정의 TEM 이미지를 나타낸다. 합성 방법에 대한 세부 사항은 실험 방법 부분에서 기술하였다. TEM 분석결과, 합성된 R-QD와 C-QD의 입자 직경은 각각 약 7 nm와 5 nm로 이는 앞서 보고된 결과와 유사한 크기를 가졌다 [16,17]. 그림 1(c)는 AAD 공정을 통해 합성된 QD를 Y-PIG 기판에 증착하는 과정을 모식도로 나타낸 것이다. 에어로졸 챔버에서는 초음파 아토마이저(ultrasonic atomizer)를 통해 QD 용액 표면에 고주파 진동을 가해 QD 에어로졸을 형성시킨다. 생성된 QD 에어로졸은 운반 가스를 통해 약 0.01 Torr의 진공 환경이 유지되는 증착 챔버로 이동되며, 노즐을 통해 Y-PIG 기판 위에 빠르게 분사된다. 이러한 증착 과정에서 QD 에어로졸은 고속 분사에 의한 운동 에너지를 통해 밀도 높고 균일한 얇은 필름을 형성한다. 더불어, QD 층과 기판 사이에 충분한 접착력을 유도하여 견고한 박막 구조를 구현할 수 있었다. 이는 기존 aerosol deposition (AD) 공정과 다른 차별성을 갖는다. AD 공정은 운동 에너지 기반의 기계적 상호작용으로, 분체가 에어로졸화되고 고속으로 이동하여 초기 입자가 기판에 충돌하여 형성된 코팅층, 후속 입자 간의 충돌 및 변형에 의해 증착막이 형성된다. 이 과정에서 분체의 각 입자는 운동에너지를 통해 압축(compression), 분

쇄(fracture) 및 소성변형(plastic deformation) 과정을 거치며 기판 및 분체 입자 간의 상호작용을 통해 치밀한 후막을 형성한다 [17-20]. 반면, AAD 공정은 나노입자가 분산된 액체를 시작 원료로 사용하는 점에서 차별된다. 이 공정은 증착 과정 중 용매 증발이 진행되며, 이는 입자 간의 거리가 줄어들고 응집현상으로 인해 입자 간 결합력이 강화되어 plastic deformation과 같은 기계적 변형 메커니즘 없이 치밀한 박막을 형성할 수 있다. 또한 기판 표면에 빈틈없이 코팅이 가능하며, 기판과의 높은 흡착력을 제공할 수 있다.

그림 2(a), (b)는 합성된 R-QD 및 C-QD의 광학적 특성을 보여준다. R-QD는 617 nm에서 PL peak와 그에 따른 흡수 스펙트럼이 관찰된다. 삽입된 이미지에서 확인할 수 있듯이 선명한 적색 발광을 나타냈고, 양자 효율은 약 90%로 평가되었다. 한편, C-QD는 488 nm에서 PL peak와 해당하는 흡수 스펙트럼이 관찰되며, 청록색 발광 특성과 함께 양자 효율은 약 50%로 확인되었다. 그림 2(c)는 R-QD와 C-QD를 이용하여 PIG 기판의 상·하 양면에 증착하는 과정과 증착된 QD필름의 발광 이미지를 보여준다. 양면 증착 방식은 R-QD와 C-QD의 혼합 용액을 에어로졸화 하여 단일 증착막을 형성하는 방식과 달리, QD 간의 자체 광 흡수 문제를 효과적으로 해결하는 전략이다. 자체 광 흡수는 광원에 의해 발광된 빛이 인접한 QD에 다시 흡수되는 재 흡수 현상으로, 이는 광 출력 감소와 효율 저하를 유발하는

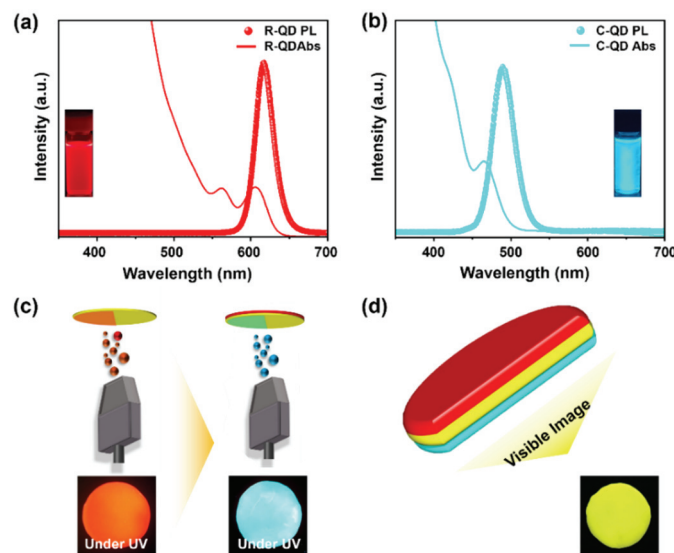


Fig. 2. (a,b) Photoluminescence (PL) and absorption spectra of R-QD and C-QD (inset images: under UV excitation) (c) Schematic illustration of QD-deposited layers via AAD, showing R-QD and C-QD deposited films under UV light, and (d) Visualization of the R-QD/Y-PIG/C-QD structure under visible light.

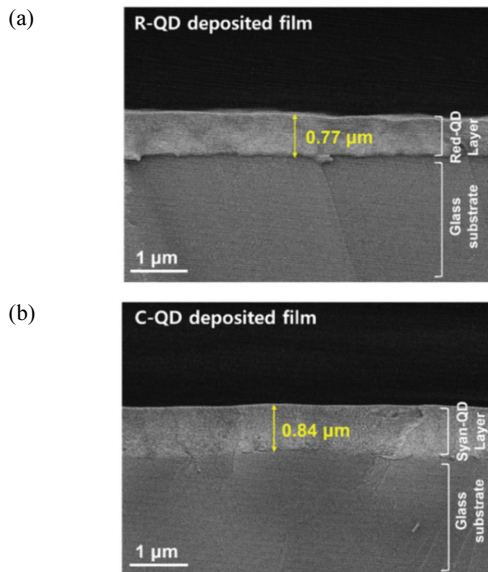


Fig. 3. Cross-sectional SEM images of QD-deposited layers through the AAD process: (a) C-QD and (b) R-QD.

주요 원인 중 하나이다. 양면 증착 방식을 도입함으로써 QD는 Y-PIG 기판의 상·하 양면에 고르게 증착되며 광 경로를 개선하여 재흡수 가능성을 감소시킬 수 있다. 결과적으로 양면 증착 방식은 효율적인 광 변환과 높은 발광 균일성을 동시에 달성할 수 있는 구조를 제공한다. 그림 2(d)는 양면 증착된 PIG 기판의 모식도와 실제 이미지를 나타낸다. 육안으로 관찰했을 때, Y-PIG는 노란색에 가깝게 보이며 QD 증착 전과 육안 상 색 차이가 크게 없는 것은 QD 증착막의 두께가 매우 얇기 때문으로 판단된다. 그림 3(a), (b)는 두께를 정량적으로 평가하기 위해 SEM 분석을 진행하였으며, QD 증착막의 두께는 각각 0.77 μm, 0.84 μm 이하로 확인되었다.

그림 4(a)는 청색 LED를 광원으로 사용하여 QD가 양면 증착된 Y-PIG를 통해 구현된 백색 조명 장치의 컨셉 이미지를 보여준다. 기존의 QD/고분자 수지 복합체 필름을 이용해 백색 LED를 구현할 경우, 필름 두께가 수십에서 수백 마이크로미터 수준의 필름 두께가 필요하다 [21,22]. 반면, AAD 공정을 통해 증착된 QD 필름은 각각 0.77 μm, 0.84 μm 이하 두께로도 충분한 백색광 변환 특성을 확보할 수 있었다. 이는 호스트 매트릭스 없이 직접 증착된 QD 성막이 상당히 치밀한 구조를 형성하였음을 입증한다. 결과적으로, 청색 광원이 조사되어 C-QD, Y-PIG, R-PIG 층을 순차적으로 거치며 흡수, 변환, 방출 과정이 일어나며 이러한 다중 광학 경로를 통해 높은 광 추출 효율을 갖는 백색 LED가 구현되었다.

그림 4(b)는 청색 LED와 Y-PIG만으로 LuAG 형광체 함량이 변화함에 따라 CIE 색좌표 상에서 색 좌표가 이동하는 모습을 나타낸다. 초기 LuAG 함량이 낮은 경우, 파장 변환이 불충분하여 색 좌표는 청색광 영역에 치우쳐 나타난다. 그러나 LUAG 함량이 증가함에 따라 파장 변환 비율이 점진적으로 개선되며 색 좌표는 (0.3264, 0.2987)의 백색광 영역에 가까워지게 된다. 이 결과는 LUAG의 형광체 농도가 백색광 구현에 중요한 변수임을 시사한다. 그림 4(c)는 양면 증착된 QD-PIG 필름에서 LuAG 함량 조절에 따른 CIE 색좌표 변화를 보여준다. 4.5wt% LuAG의 경우 좌표는 (0.3388, 0.3622)로 나타났으며, 이는 백색 영역 내에 위치한다. LuAG 함량 변화에 따른 CIE 색좌표의 미미한 이동은, 전체 발광에서 청색, 적색 및 노란색의 세 가지의 색은 백색광 구현에서 지배적인 영향 때문이라고 해석된다. 이는 LuAG가 발광 스펙트럼의 기여에 미치는 영향이 제한적인 반면, 삼원색의 강도와 조합 비율이 백색광 형성을 균일하게 유지하기 때문이다.

그림 4(d-f)는 Blue LED를 광원으로 사용하여 Y-PIG, Y-PIG/R-QD, 및 C-QD/Y-PIG/R-QD 구조로 제작하여 각 구조에 따른 백색광에서 연색지수(CRI)와 광 효율(lm/W) 변화를 평가한 결과를 보여준다. 연색성과 광 효율은 일반적으로 상호 보완적인 특성을 갖고 있다. 그림 4(a)에서 Y-PIG 구조는 시감 곡선(luminous efficiency function) 상에서 노란색 영역(555 nm)의 효율이 가장 높기 때문에, PIG를 통한 파장 변환이 주요 가시광선 영역에서 높은 120.0 lm/W을 보이거나, 상대적으로 낮은 CRI 75.4가 나타났다. Y-PIG에 R-QD를 증착했을 때, 적색광이 보완됨으로써 약 CRI 92와 100 lm/W 수준으로 기존에 보고된 PIG 기반 조명 장치에 비교하여 높은 성능을 나타냈고, Y-PIG에 C-QD와 R-QD를 양면 증착한 시료는 청록색 영역이 추가 보완되면서, 태양광과 유사한 스펙트럼 균형이 더욱 향상되어 CRI 97 수준으로 최대치에 가깝게 도달하였다. 그러나 시감 곡선 상에서 청록색 및 적색 영역의 효율이 낮고, 다중 QD 층의 광학적 손실과 재흡수로 인해 광 효율은 77 lm/W로 감소하였다.

청색 LED 광원과 함께 Y-PIG와 Y-PIG에 R/C-QD를 양면 증착한 C-QD/Y-PIG/C-QD 구조의 PIG를 각각 적용하여 그림 4(a)와 같은 조명 장치를 제작하였다. 그림 5(a), (b)는 각각의 조명 장치를 실제 물체에 조사했을 때, 물체의 색감이 어떻게 표현되는지 상대적으로 비교한 결과를 보여준다. Y-PIG만 사용한 조명장치 대비 R/C-QD를 양면 증착한 Y-PIG를 적용하여 연색성이 개선된 조명 장치에서 물체의 색감이 더욱 선명하게 나타나는 이미지를 보여준다. 따라서, QD가 증착된 PIG를 통해 청색광의

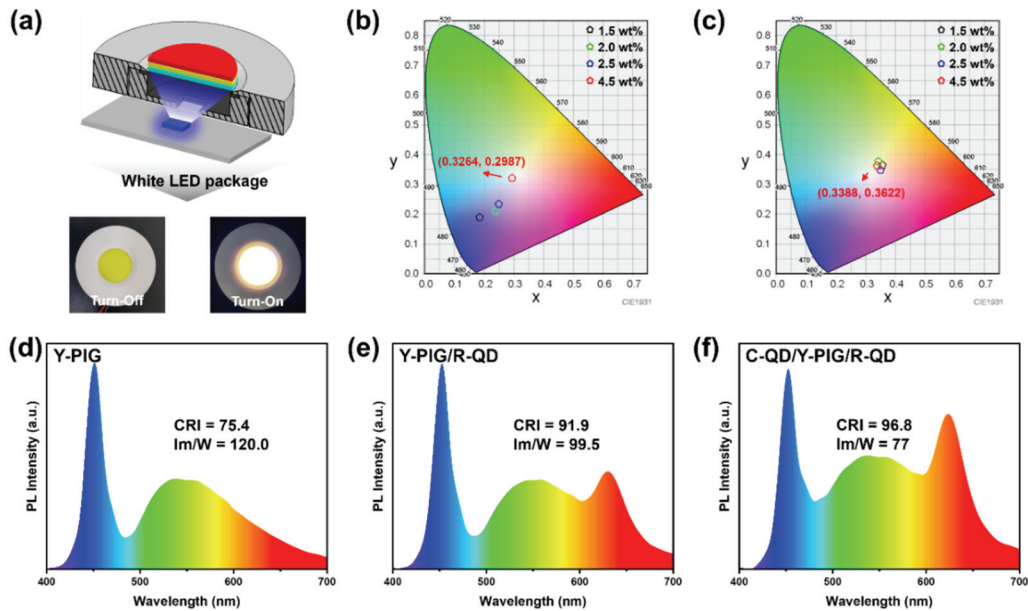


Fig. 4. (a) Schematic of the remote-type white LED package and the images with C-QD/Y-PIG/R-QD multi-layers(turn-on/off). CIE 1931 chromaticity diagrams representing the color coordinate changes with varying LuAG contents: (b) Y-PIG and (c) C-QD/Y-PIG/R-QD. Emission spectra of White LEDs with different configurations of fluorescent materials: (d) Y-PIG, (e) Y-PIG/R-QD, and (f) C-QD/Y-PIG/R-QD, exhibiting their CRI and luminous efficacy (lm/W).

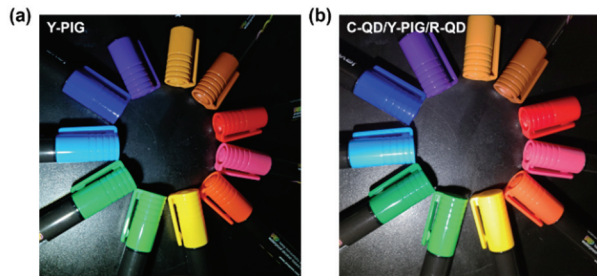


Fig. 5. Comparison of color rendering properties: (a) Y-PIG and (b) C-QD/Y-PIG/R-QD.

효율적인 파장 변환이 가능했으며, 변환된 스펙트럼이 균형을 이루면서 자연광에 가까운 광 품질을 구현됨을 확인하였다.

4. 결론

본 연구는 호스트 매트릭스 없이 C-QD 및 R-QD를 각각 $0.77 \mu\text{m}$ 와 $0.84 \mu\text{m}$ 의 얇은 두께로 증착하여 기존 QD/고분자 수지 기반 필름 대비 약 10배 이상 얇은 두께로 동등수준 이상의 광학적 성능을 달성한 결과이다. 특히, 양

면 증착 방식을 통해 QD 간의 자체 광 흡수 문제를 효과적으로 완화하고, QD 층을 Y-PIG 기판의 상·하 양면에 배치하여 광 경로를 최적화함으로써 발광 균일성과 효율을 동시에 확보하였다. 이와 같은 결과는 매트릭스를 배제하여 QD의 본래 발광 특성을 유지하면서도, 기존 고분자 수지 기반 기술에서 발생하는 열화와 두께 제한 문제를 효과적으로 극복한 AAD 공정에서 비롯되었다. 본 공정은 QD 기반 필름 제조의 효율성과 공정 안정성 개선을 실현하였으며, 고성능 조명 기술 개발에 새로운 가능성을 제시한다. QD 기반 조명 기술은 에너지 효율 향상의 장점을 제공할 뿐만 아니라, 다양한 조명기술 응용 분야에서 상업적 경쟁력을 갖고 있다. 이러한 기술 확장을 위해서는 QD 증착 필름에서 열과 빛에 대한 안정성을 향상시킬 필요가 있으며, 향후 연구에서 QD 표면의 리간드 설계와 세라믹 복합체 매트릭스 도입 등을 통해 이를 개선하여 조명 기술의 응용 범위를 확장하는데 중요한 기반을 제공할 것이다.

ORCID

Sunghoon Kim

<https://orcid.org/0000-0003-2098-5962>

감사의 글

이 논문은 2024학년도 동의대학교 교내연구비(202401350001) 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2022R1F1A1074914, RS-2024-00415922).

REFERENCES

- [1] Z. Xia and Q. Liu, *Prog. Mater. Sci.*, **84**, 59 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.09.007>
- [2] Y. Peng, H. Liu, X. Wang, and L. Zhang, *J. Adv. Ceram.*, **11**, 1889 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1007/s40145-022-0654-7>
- [3] K. Han, S. Choi, and J. H. Kim, *J. Non-Cryst. Solids*, **445**, 77 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2016.05.011>
- [4] S. Fujita, A. Sakamoto, and S. Tanabe, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **14**, 1387 (2008).
doi: <http://doi.org/10.1109/JSTQE.2008.920285>
- [5] Y. Huang, H. Zhang, L. Li, and K. Wang, *Polym. Adv. Technol.*, **30**, 1818 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1002/pat.4614>
- [6] L. Wang, X. Chen, and Z. Wang, *J. Mater. Chem. C*, **8**, 1746 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1039/C9TC05807A>
- [7] R. Xiang, Y. Huang, and M. Zhang, *Ceram. Int.*, **42**, 19276 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.094>
- [8] H. Moon, S. Jang, and Y. Choi, *Adv. Mater.*, **31**, 1804294 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201804294>
- [9] P. Yang, J. Lee, and K. Kim, *Adv. Opt. Mater.*, **8**, 1901429 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1002/adom.201901429>
- [10] C. Xiang, Y. Zhou, and L. Zhang, *Nat. Commun.*, **11**, 15481 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15481-9>
- [11] X. Wu, H. Zhao, and Y. Zhang, *J. Mater. Sci.*, **56**, 428 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05235-9>
- [12] L. Birchall, D. Shaw, and F. Perez, *Sens. Actuators A Phys.*, **347**, 113977 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113977>
- [13] J. He, M. Liu, and Q. Lin, *Opt. Express*, **25**, 12915 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1364/OE.25.012915>
- [14] S. Kim, J. Choi, and H. Park, *Adv. Mater. Interfaces*, **6**, 1900359 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1002/admi.201900359>
- [15] X. Jin, Y. Li, and Z. Zhao, *J. Lumin.*, **229**, 117670 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117670>
- [16] D. Roy, S. Lee, and M. Park, *J. Phys. Chem. C*, **120**, 510051 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b10051>
- [17] P. Sarobol, J. Zhang, and K. Park, *J. Therm. Spray Technol.*, **25**, 82 (2016).
doi: <http://doi.org/10.1007/s11666-015-0295-2>
- [18] J. Exner, L. Kim, and Y. Wang, *Adv. Powder Technol.*, **26**, 1143 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2015.05.016>
- [19] I. S. Kim, J. W. Yoon, and H. J. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **34**, 314 (2021).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2021.34.5.314>
- [20] I. S. Kim, Y. K. Choi, and K. Lim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **33**, 219 (2020).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2020.33.3.219>
- [21] S. Baek, D. Choi, and J. Park, *Adv. Opt. Mater.*, **6**, 1800295 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1002/adom.201800295>
- [22] Q. Zhou, H. Zhao, and J. Lee, *Adv. Mater.*, **28**, 9163 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201602651>