



# 탠덤 양자점 발광소자를 위한 전하 생성층 설계 동향

정의창<sup>1</sup>, 최문기<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup>울산과학기술원 반도체소재부품대학원

<sup>2</sup>울산과학기술원 신소재공학과

## Recent Advances in Charge Generation Layer Design for Tandem Quantum Dot Light-Emitting Diodes

Eui Chang Jung<sup>1</sup> and Moon Kee Choi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Semiconductor Materials and Devices Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan 44919, Korea

<sup>2</sup> Department of Materials Science and Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan 44919, Korea

(Received September 6, 2025; Revised October 23, 2025; Accepted October 24, 2025)

**Abstract:** Quantum dots (QDs) offer size-dependent tunability across the infrared to ultraviolet range with narrow emission linewidths and high color purity, making them highly attractive for next-generation light-emitting devices. Quantum dot light-emitting diodes (QLEDs) further combine precise spectral control with scalable, low-cost solution processing, positioning them as strong candidates for wearable, stretchable, and AR/VR display technologies. However, conventional single-emission QLEDs suffer from charge imbalance, efficiency roll-off, and limited operational lifetime, necessitating new device architectures. Tandem QLEDs, which vertically stack multiple emissive layers (EMLs) connected by charge generation layers (CGLs), provide a compelling solution by enabling higher luminance, improved charge balance, and longer lifetime at equivalent current density. The CGL serves as the interfacial region mediating charge injection and generation between adjacent EMLs, directly determining device efficiency and stability. This review highlights recent progress in CGL engineering, categorizing representative designs into planar heterojunction, inorganic-based, and dipole-based configurations. Comparative analysis of their formation mechanisms, material systems, and process compatibilities reveals evolving charge-control strategies that extend beyond material selection. These insights establish design principles for next-generation tandem QLEDs with enhanced efficiency, durability, and manufacturability.

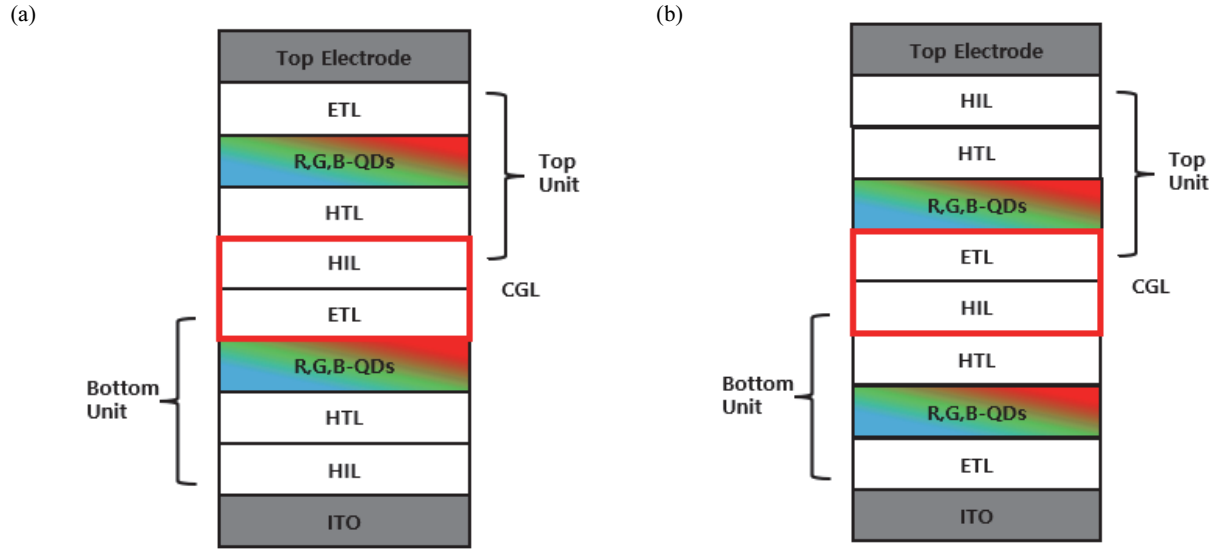
**Keywords:** Tandem quantum-dot light-emitting diodes, Charge generation layer, Quantum dot light-emitting diodes, Quantum dots, Display

### 1. 서론

✉ Moon Kee Choi; [mkchoi@unist.ac.kr](mailto:mkchoi@unist.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.

양자점(quantum dot, QD)은 양자점 크기를 조절함에 따라 적외선/가시광선/자외선 영역에서 자유롭게 파장대 조절이 가능하며 좁은 반치폭을 가지고 있어 차세대 발광



**Fig .1.** (a) Two-unit tandem QLED with standard structure and (b) two-unit tandem QLED with inverted structure.

소재로 각광받고 있다 [1-7]. 또한 양자점 발광 다이오드 (quantum light emitting diode, QLED)는 우수한 색 순도, 정밀한 파장 조절, 용액 공정을 통한 저비용·대량 제조 가능성 등의 장점을 바탕으로, 유기 발광 다이오드 (organic light emitting diode, OLED)에 비해 공정 단순화와 대면적 확장이 용이하다는 특징을 지닌다 [8-16]. 이러한 이유로 QLED는 웨어러블, AR/VR, 스트레처블 등 차세대 디스플레이 소자로 주목받고 있다 [17-22]. 그러나 일반적인 QLED는 고휘도 구동 시 발생하는 전하 불균형, 효율 저하, 제한적인 수명 등 구조적 한계를 지니며, 이를 극복하기 위한 새로운 구조적 접근이 필요하다.

이러한 배경 속에서 최근 활발히 연구되고 있는 대안이 바로 다층 발광 구조의 탠덤 QLED이다 [23-25]. 탠덤 QLED는 두 개 이상의 발광층(emissive layer, EML)을 직렬 적층하여 동일한 전류 밀도에서 더 높은 휘도와 전류 효율, 외부 양자 효율(external quantum efficiency, EQE)을 달성할 수 있다. 또한 전하 균형 및 발열 제어가 용이해 단일 구조 대비 훨씬 긴 수명을 확보할 수 있다는 장점이 있다. 탠덤 QLED에서 핵심적인 역할을 담당하는 요소는 발광층 사이에 위치한 전하 생성층(charge generation layer, CGL)이다. CGL은 상·하부 유닛 간 전하 주입과 생성을 매개하는 계면으로, 그 구성 방식에 따라 휘도·효율 뿐 아니라 공정 호환성, 계면 안정성, 전하 생성 효율(charge generation efficiency, CGE) 등 소자의 성능 전반에 영향을 미친다. 따라서 CGL의 설계는 탠덤 QLED의 성능을 좌우하는 핵심 요인이라 할 수 있다.

본 리뷰에서는 탠덤 QLED 내 CGL의 중요성을 중심으로, Standard 구조와 Inverted 구조에서 요구되는 CGL의 역할과 설계 전략을 고찰한다. 이어서 전자·정공 주입 메커니즘에 따른 평면형 이종접합, 무기 기반 계면 구조, 쌍극자 기반 구조 등으로 CGL의 유형을 분류하고, 각 구조에서 사용되는 재료, 형성 메커니즘, 용액 공정 및 열 증착 적합성, 그리고 남아 있는 기술적 과제를 비교·분석한다. 이를 통해 고성능 탠덤 QLED 구현을 위한 CGL 설계의 방향성과 향후 발전 가능성을 제시하고자 한다.

## 2. 탠덤 QLED 구조

탠덤 QLED는 복수의 발광층을 수직으로 적층하고, 그 사이를 전하 생성층으로 직렬 연결하여 구성된다 [26-32]. 상하부 소자는 독립적인 EML, 정공 및 전자 수송층과 주입층으로 구성되며, 전류가 단일 경로에서 다수의 발광층을 거쳐 발광을 일으킨다. 이러한 구조적 특성은 단일 QLED와는 다른 발광 거동을 유도하며, 여러 가지 이점을 제공한다. 첫째, 동일한 전류 밀도에서 더 높은 휘도와 효율을 구현할 수 있다. 각 EML에서 발생한 발광이 누적되어 더 높은 광출력이 가능하며, 이는 곧 외부 양자 효율의 향상으로 이어진다. 둘째, 전류가 복수의 EML로 분산되므로 특정 발광층에 집중되는 전류 밀도가 낮아져 발열과 같은 전기적·열적 스트레스가 완화되고, 결과적으로 소자의 안정성과 수명이 향상된다. 셋째, 적/녹/청 등 서로 다른

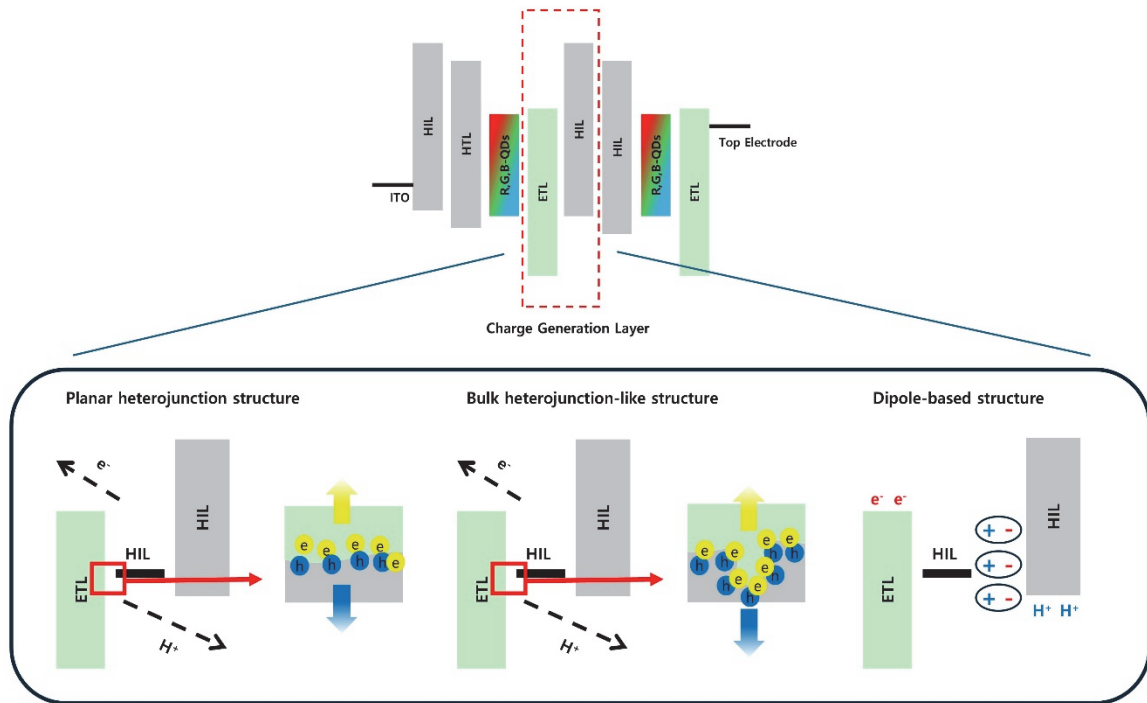


Fig. 2. CGL structures classified by formation mechanisms.

파장의 양자점(quantum dots, QDs)을 사용하면 다색 발광 구현이 가능하여 차세대 디스플레이 응용에 유리하다.

그러나 탠덤 QLED의 안정적 성능 확보를 위해서는 핵심 계면인 CGL의 정밀한 설계가 필수적이다. CGL은 단순히 하·상부 EML을 접합하는 층이 아니라, 전하 생성 및 주입을 담당하고 계면 안정성까지 결정하는 핵심 기능을 수행한다. 구체적으로 CGL은 하부 EML에서 전자와 정공이 재결합하지 않도록 차단하고, 동시에 상부 EML에 새로운 전자·정공을 생성·주입해야 한다. 이를 위해 CGL은 높은 전하 생성 효율, 양방향 에너지 준위 정렬, 우수한 광 투과도, 공정 안정성 등을 동시에 만족해야 한다. 또한 수십 나노미터 이하의 정밀한 두께 제어가 요구되며, 상·하부 층의 공정 조건과 양립 가능해야 한다.

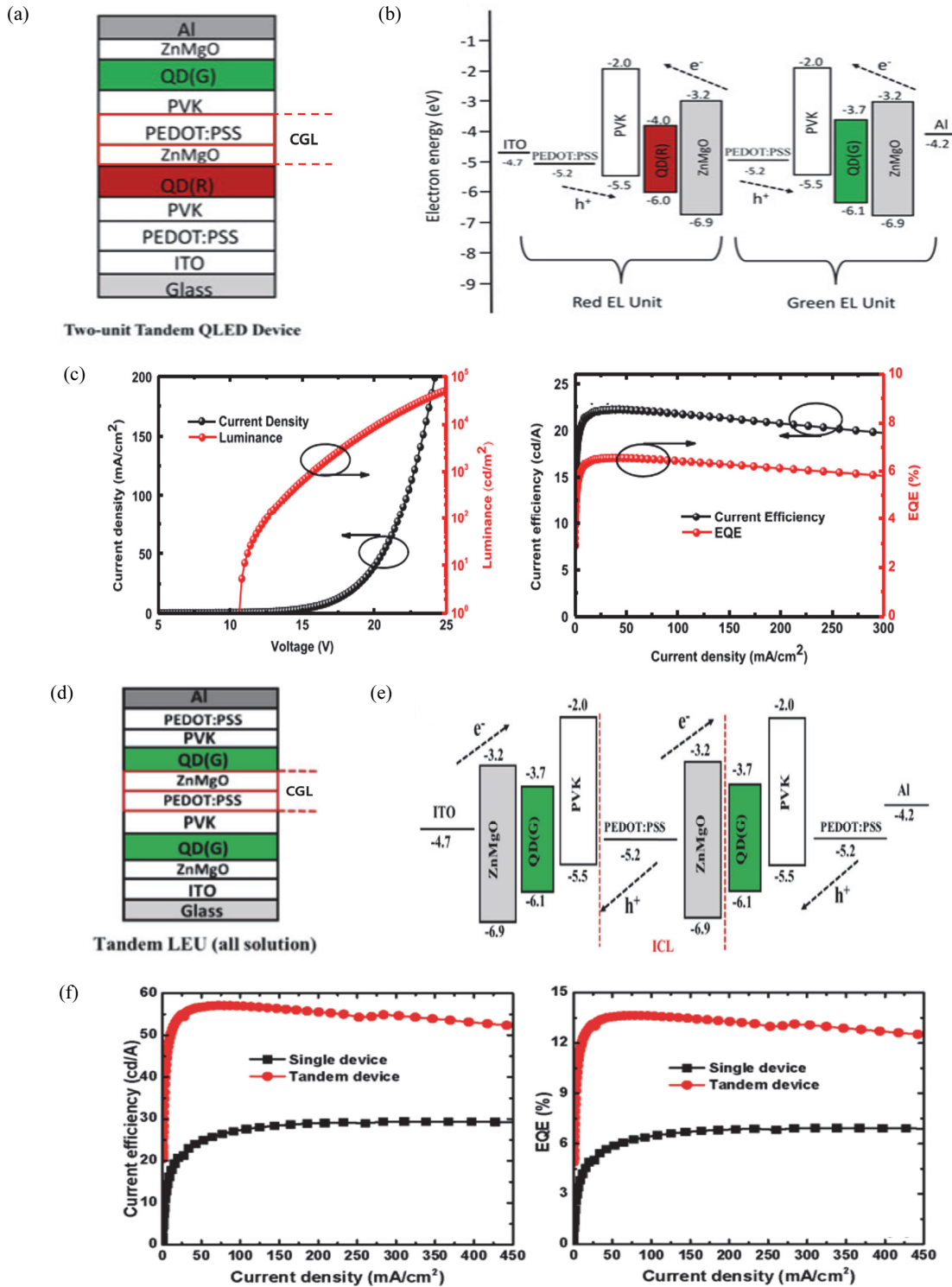
탠덤 QLED는 전하 흐름의 방향에 따라 Standard 구조와 Inverted 구조로 구분된다(그림 1). Standard 구조는 단일 QLED의 기본 형태와 유사하게, 하부 ITO 전극에서 정공이, 상부 금속 전극(예: Al, Ag)에서 전자가 주입된다. PEDOT:PSS, TFB 등 정공 주입에 최적화된 유기 재료들을 활용할 수 있어 발광 효율 확보에 유리하다. 또한 상부 CGL 형성 시 용액 공정 적용이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 용액 공정에서는 QDs 손상, 계면 거칠기 증가, 전기적 단락과 같은 문제가 발생할 수 있다.

Inverted 구조는 반대로, 하부 ITO 전극에서 전자가 주

입되고 상부 금속 전극에서 정공이 주입된다. ZnO, ZnO/PEIE와 같은 안정성이 우수한 무기 기반 전자 수송층을 도입할 수 있어 하부 전극 안정성이 우수하며, 상부 정공 주입층은 열 증착이나 무기 재료로 형성되어 용매 손상 문제가 적다. 그러나 이 구조는 용액 공정 활용이 제한적이며, 전자 이동 속도 대비 정공 이동 속도가 느려 전하 균형 확보가 어려운 단점이 있다.

따라서 동일한 재료 조합이라도 구조에 따라 전하 거동, 계면 안정성, 광학적 간섭 효과 등이 달라지므로, CGL 설계는 소자의 구조적 특성에 맞춘 전략이 필요하다. Standard 구조에서는 용액 안정성이 높은 재료와 계면 보호 특성이 요구되며, 상부 전자의 효율적 주입을 위한 에너지 정렬이 중요하다. 반면 Inverted 구조에서는 정공 주입 보완 및 전하 균형 확보가 핵심 과제가 된다.

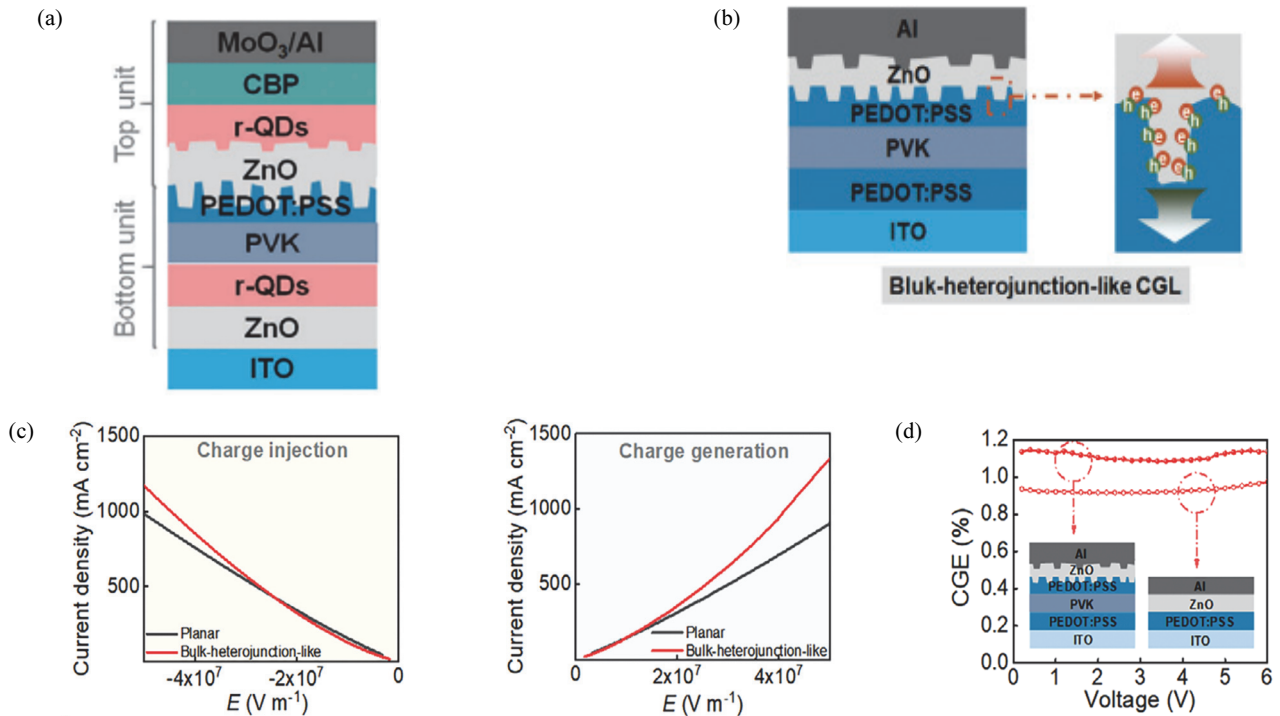
본 리뷰에서는 탠덤 QLED의 성능을 좌우하는 핵심 요소인 CGL에 대해 구조적 특성에 따른 요구 조건과 구현 전략을 체계적으로 고찰한다. 그림 2에 보인 바와 같이, CGL은 형성 메커니즘에 따라 평면형 이종접합, 무기 기반 계면 구조, 쌍극자 기반 계면 구조로 분류될 수 있다. 이후 각 구조에서 보고된 다양한 구현 전략과 성능 변화를 분석하고, EQE·수명·공정 적합성 측면에서의 장단점을 비교함으로써, 고성능 탠덤 QLED 구현을 위한 CGL 설계 방향과 향후 기술적 과제를 제시하고자 한다.



**Fig. 3.** (a) Planar heterojunction CGL (ZnMgO/PEDOT:PSS/PVK) with standard structure, (b) energy band diagram of the standard planar heterojunction CGL, (c)  $J-V-L$  and  $CE-J-EQE$  characteristics of the tandem QLED employing the planar heterojunction CGL (ZnMgO/PEDOT:PSS/PVK), (d) planar heterojunction CGL (PVK/PEDOT:PSS/ZnMgO) with inverted structure, (e) energy band diagram of the inverted planar heterojunction CGL, and (f)  $CE-J$  and  $EQE-J$  characteristics of the tandem QLED employing the planar heterojunction CGL (PVK/PEDOT:PSS/ZnMgO).

**Table 1.** Performance of tandem and single QLEDs with an inverted CGL (PVK/PEDOT:PSS/ZnMgO) structure.

Device	Turn on Voltage	Current Efficiency(Cd/A)		EQE(%)	
		500/5000/50000 [Cd/m <sup>2</sup> ]	Max	500/5000/50000 [Cd/m <sup>2</sup> ]	Max
Single QLED	3.7V	12.45/20.83/28.97	29.68	2.94/4.91/6.83	7.00%
Tandem QLED	7.3V	31.54/50.48/56.97	57.06	7.54/12.07/13.63	13.65%



**Fig. 4** (a) Inverted-type bulk heterojunction-like CGL (PVK/PEDOT:PSS/ZnO), (b) bulk heterojunction-like only-CGL device, (c) *J-E* characteristics of planar heterojunction and bulk heterojunction-like CGLs, and (d) CGE characteristics of planar heterojunction and bulk heterojunction-like CGLs.

### 3. 전하 생성층 (CGL)의 구조 및 작동 메커니즘

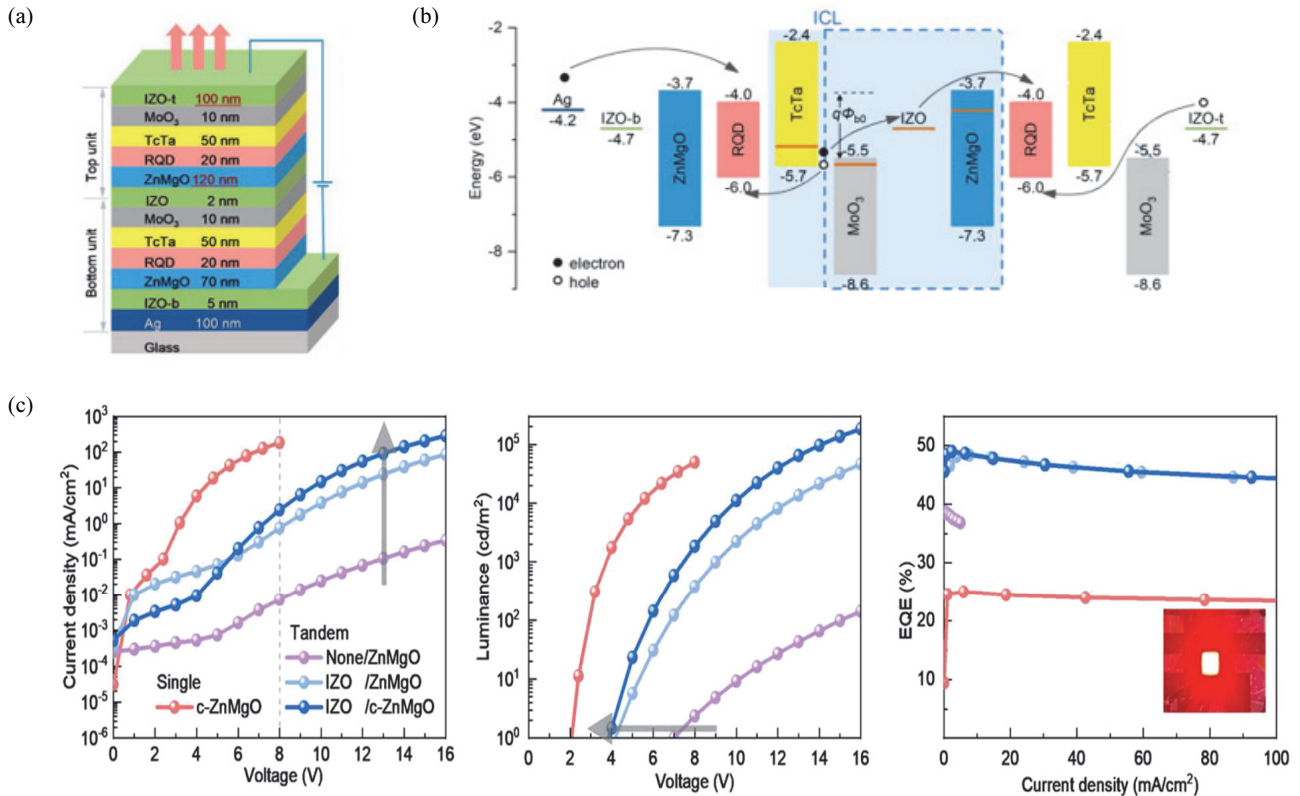
CGL은 다양한 구조적 구현 방식이 존재하지만, 기본적인 작동 원리는 유사하다. 즉, 전자 수송층(ETL)과 정공 수송층(HTL)의 계면에서 전자-정공 쌍이 생성되고, 생성된 전하는 상·하부 EML로 주입되어 방사성 재결합(radiative recombination)을 유도한다. 이 과정에서 전하 이동 방향은 소자 구조에 따라 달라지며, 각 EML은 독립적으로 발광한다. 따라서 탠덤 QLED는 복수의 단일 QLED가 직렬 연결된 것과 유사한 발광 특성을 보인다.

본 리뷰에서는 CGL 구조를 크게 세 가지로 분류한다: (i) 평면형 이종접합 구조, (ii) 무기 계면 기반 구조, (iii) 쌍극

자 기반 구조. 각 구조는 Standard 및 Inverted 탠덤 QLED에서 다른 재료 조합을 통해 고유한 에너지 정렬, 계면 안정성, 공정 호환성을 보인다. 이어지는 절에서는 각 구조적 특성과 구현 사례를 고찰하고, 이들이 소자의 EQE, 수명, 공정 적합성 향상에 어떻게 기여하는지를 분석한다.

#### 3.1 평면형 이종접합 구조

평면형 이종접합 구조는 가장 기본적이고 널리 연구된 CGL 방식으로, P-형 HTL과 N-형 ETL이 맞닿는 계면에서 전하가 생성된다. 대표적인 조합으로 PEDOT:PSS/ZnO(ZnMgO), TFB/ZnMgO, MoO<sub>3</sub>/ZnMgO 등이 있으



**Fig. 5.** (a) Inverted inorganic interface-based CGL (MoO<sub>3</sub>/IZO/ZnMgO), (b) energy band diagram of the inverted inorganic interface-based CGL, and (c)  $J-V$ ,  $L-V$ , and  $EQE-J$  characteristics of the tandem QLED employing the inorganic interface-based CGL (MoO<sub>3</sub>/IZO/ZnMgO).

며, 용액 공정을 통한 구현이 비교적 간단하고 계면 제어가 용이하다는 장점이 있다. 그러나 전하 생성 면적이 제한적이고, 에너지 정렬 불균형 시 전하 생성 효율(CGE)이 저하될 수 있다. 이에 따라 에너지 준위 차이, 전도도, 계면 접촉성 등을 정밀하게 조절하는 것이 중요하다. 최근에는 LiF, PEIE 등 계면 조정제를 도입해 계면 균일도를 향상시키고, 커피링 효과 억제 및 발광 균일도 개선을 통해 소자 성능과 수명을 향상시키는 연구가 보고되고 있다.

### 3.1.1 Standard 구조

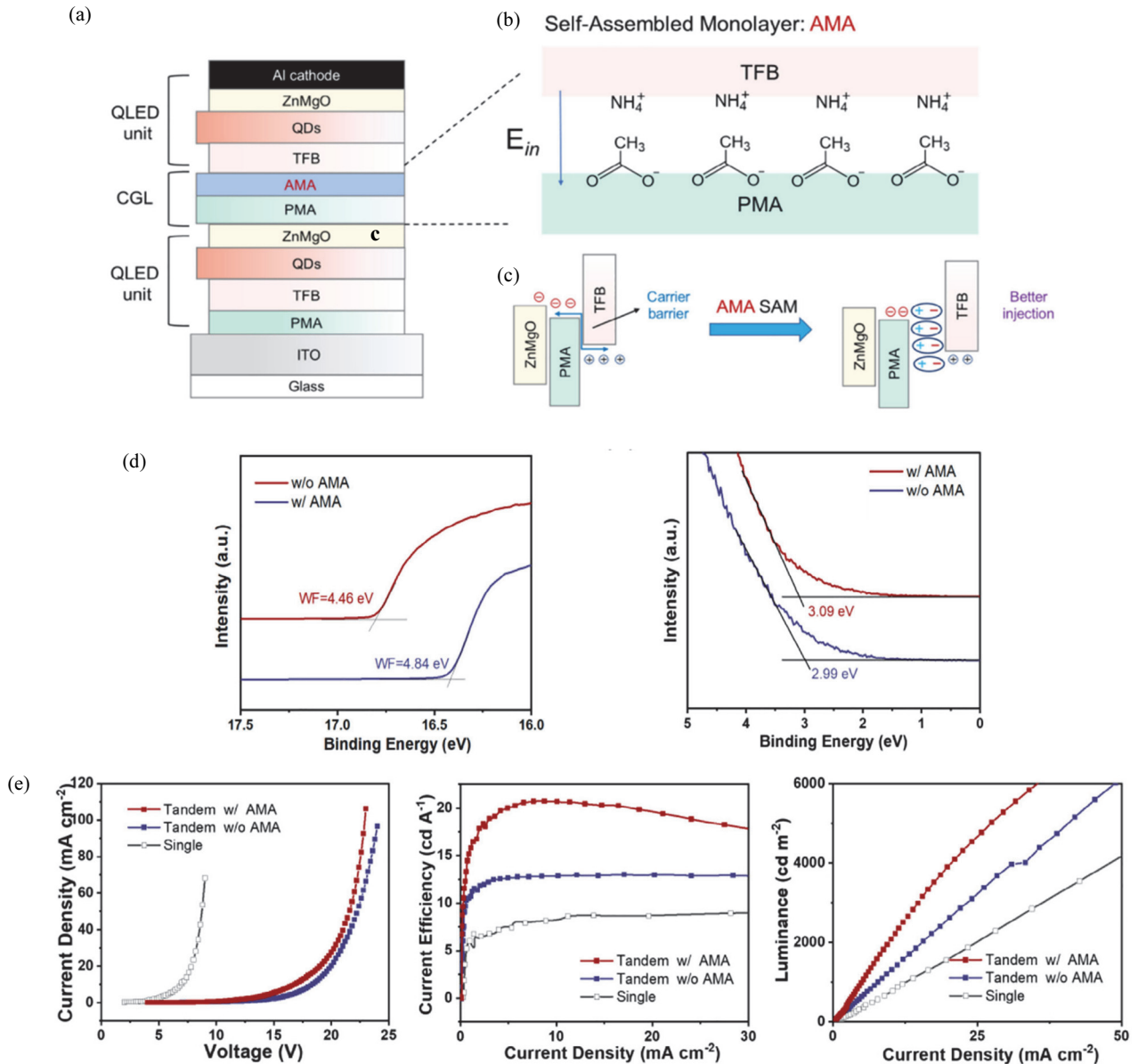
Standard 구조에서는 하부 ITO 전극에서 정공이, 상부 금속 전극에서 전자가 주입된다. 대표적인 예는 ZnO (ZnMgO)/PEDOT:PSS 구조로, PEDOT:PSS가 HTL, ZnO(ZnMgO)가 ETL 역할을 수행한다 [26]. 전위차에 의해 계면에서 전하가 생성되며, CGL 형성이 전량 용액 공정으로 가능하다는 점에서 공정 호환성이 높다 [그림 3(a)-3(c)].

### 3.1.2 Inverted 구조

Inverted 구조에서는 전자가 하부 ITO에서, 정공이 상

부 전극에서 주입된다. PVK/PEDOT:PSS/ZnMgO 구조가 대표적이며, 그림 3(e)-3(f) 및 표 1에서 해당 구조의 모식도와 소자 성능을 확인할 수 있다.[27]

기존 평면형 구조의 한계는 전하 생성이 좁은 계면에 국한된다는 점이다. 이를 극복하기 위해 PEDOT:PSS/ZnO 이중층의 미세 요철을 이용해 넓고 비정형적인 계면을 형성하는 방식이 보고되었으며, 이는 기존의 공정과 동일하게 Spin Coating 공정을 사용하여 증착이 이루어진다 [그림 4(a), 4(b)] [28]. 이 경우 표면의 미세 요철이 ETL 입자에 의해 부분적으로 채워지며 자발적으로 HTL과 ETL 계면에서 미세 구조화된 계면을 형성하기에 전하 생성 면적이 확장되고 CGE가 100%를 초과하는 높은 수치를 보이는데, 누설 전자를 다른 발광층에서 재활용하는 메커니즘을 통해 효율 손실을 억제할 수 있기 때문이다 [그림 4(c), 4(d)]. 또한 열 증착 공정을 이용하여 LiF를 도입하면 PVK 표면의 습윤성 향상, PEDOT:PSS의 커피링 억제, CGL 균일성 확보가 가능하며, 소자의 효율과 재현성이 크게 개선된다 [그림 4(e)].



**Fig. 6.** (a) Standard-structure dipole-based CGL (ZnMgO/PMA/AMA/TFB), (b) formation mechanism of the PMA/AMA interface, (c) interfacial charge generation mechanism in the dipole-based CGL (ZnMgO/PMA/AMA/TFB), (d) secondary electron cutoff region in the UPS spectrum, and (e)  $J$ - $V$ ,  $CE$ - $J$ , and  $L$ - $J$  characteristics of single QLED and dipole-based CGL tandem QLEDs.

### 3.2 무기 계면 기반 구조

무기 계면 기반 구조는 PEDOT:PSS/ZnO와 같은 유기 계면 CGL의 단점을 보완하기 위해 제안되었다 [29]. 유기 계면 구조는 공정이 단순하나, 수분 민감성·계면 불균일성·장기 안정성 저하가 문제로 지적된다. 반면 MoO<sub>3</sub>, IZO, ZnMgO, Al, Ag 등 무기 재료는 열적·화학적 안정성이 우수하고, 진공 증착이나 스퍼터링을 통한 정밀 두께 제어 및

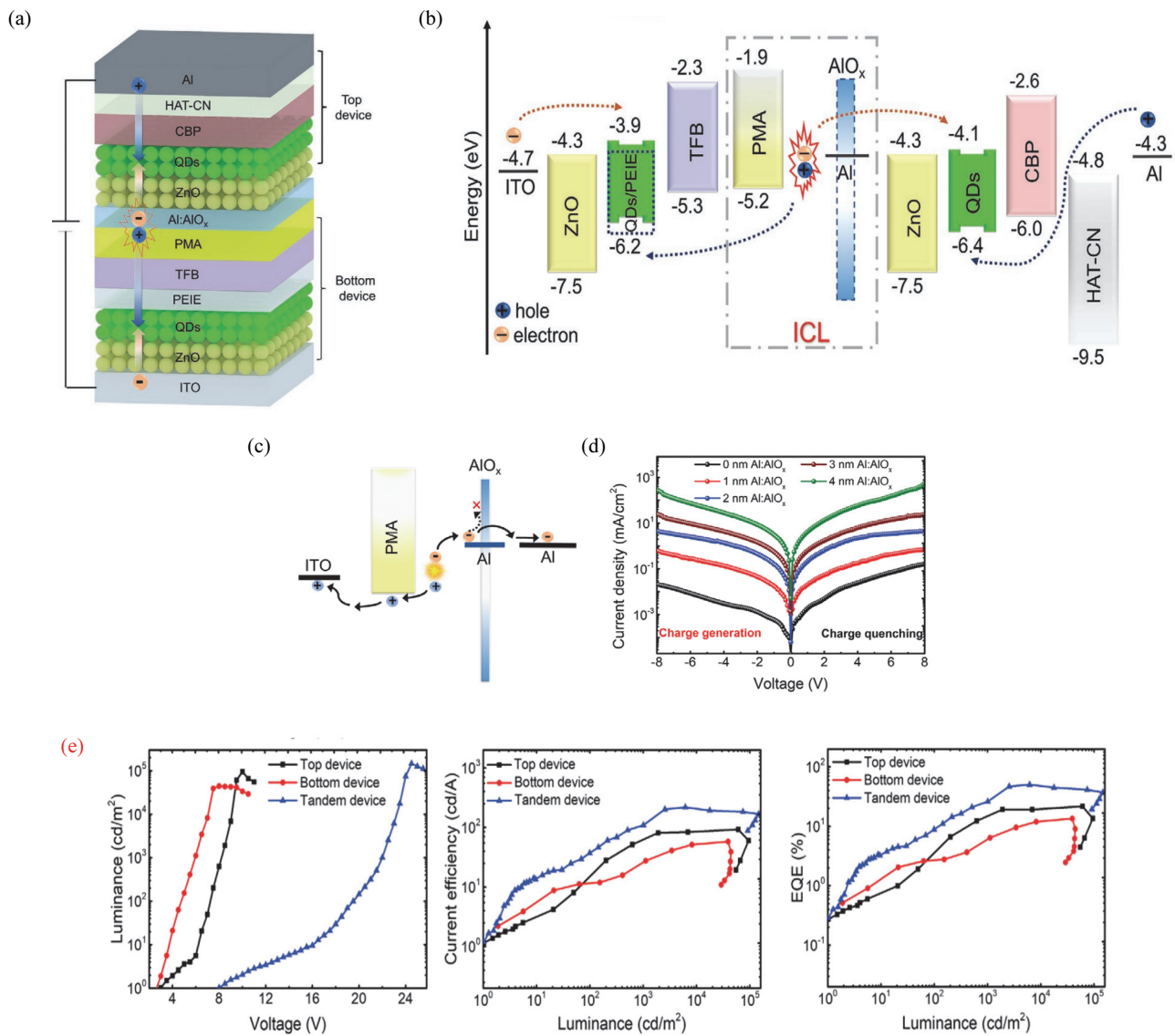
밴드 정렬 조절이 가능하다. 이러한 건식 공정 기반 CGL은 하부 층 손상을 최소화하고, 다층 구조의 정합성을 높인다.

#### 3.2.1 Inverted 구조

대표적 사례로는 MoO<sub>3</sub>/IZO/c-ZnMgO 조합이 보고되었다 [그림 5(a), 5(b)]. 여기서 MoO<sub>3</sub>는 높은 일함수(work function, WF)를 통해 정공 주입을 촉진하며, IZO는 상부

**Table 2.** Performance of single QLEDs and tandem QLEDs with and without AMA.

Device	Turn on Voltage	Luminance @10mA/cm <sup>2</sup> (Cd/m <sup>2</sup> )	Current Efficiency @10mA/cm <sup>2</sup> (Cd/A)	T <sub>50</sub> @5,000Cd/m <sup>2</sup> (h)
Single QLED	≈ 2.5V	—	8.3	—
Tandem QLED w/o AMA	≈ 5.0V	1308	12.86	0.16
Tandem QLED w/ AMA	≈ 4.5V	2216	20.7	2.2



**Fig. 7.** (a) Inverted-type dipole-based CGL (TFB/PMA/Al:AlO<sub>x</sub>/ZnO), (b) energy band diagram of the inverted dipole-based CGL, (c) interfacial charge generation principle at the PMA/Al:AlO<sub>x</sub> interface, (d) charge injection and generation behavior as a function of Al:AlO<sub>x</sub> thickness, and (e) *L-V*, *CE-L*, and *EQE-L* characteristics of single QLED and dipole-based CGL tandem QLEDs.

**Table 3.** Performance of tandem and single QLEDs with an inverted dipole-based CGL (TFB/PMA/Al:AlOx/ZnO) structure.

Device	Turn on Voltage	Current Efficiency(Cd/A)		Luminance(Cd/m <sup>2</sup> ) Max @90 mA/cm <sup>2</sup>	EQE(%)	
		400/4000/40000 [Cd/m <sup>2</sup> ]	Max		400/4000/40000 [Cd/m <sup>2</sup> ]	Max
Top Device	3.0	40.5/82.2/89.7	92.5	94,700	9.9/19.0/20.4	21.7
Bottom Device	3.0	15.7/42.2/56.1	57.9	44,290	3.7/9.8/12.9	13.5
Tandem QLED	7.8	78.1/209.3/18	217.5	146,100	18.4/48.6/43	50.3

유닛의 전극 역할과 동시에 MoO<sub>3</sub>와 ZnMgO 간 전하 흐름을 매끄럽게 연결하는 브릿지 역할을 수행한다 [29]. 이러한 무기 계면 기반 CGL은 탠덤 QLED 구조에서 두 발광 유닛 사이의 전하 재생성을 유도하여 전하 정체와 누설을 억제하고, 주입 균형과 광 추출 효율을 향상시킨다. 실제 소자 [그림 5(c)]에서도 균일한 발광과 높은 휘도가 확인되어, MoO<sub>3</sub>/IZO/c-ZnMgO 계면이 탠덤 소자의 안정적 전하 주입·생성에 효과적으로 기여함을 보여준다.

### 3.3 쌍극자 기반 구조

쌍극자 기반 CGL은 전하 생성 계면에 전기적 쌍극자를 도입하여 전하 생성 및 주입을 유도하는 구조이다. 이는 P-N 접합에 의존하는 평면형 이종접합 구조와 달리, 계면에서의 전하 재분포 및 정전기적 장벽 완화를 통해 전하 분리를 실현한다 [30,31]. 따라서 밴드 정렬이 완벽하지 않아도 효율적인 전하 주입이 가능하다는 장점이 있다. 또한 두께가 수 nm 수준으로 매우 얇아 전체 소자 두께를 최소화할 수 있으며, 용액 공정 및 자연 산화와 같은 간단한 방식으로 제작할 수 있어 공정 호환성 및 재료 선택의 유연성이 크다. 이로 인해 계면 열화 문제를 줄이면서 안정적인 성능 확보가 가능하다.

#### 3.3.1 Standard 구조

Standard 구조에서는 HTL과 ETL 사이에 쌍극자를 형성하는 중간층이 삽입된다. 대표적인 예로 ZnMgO/PMA/AMA/TFB 구조가 있으며 [그림 6(a), 6(c)], PEDOT:PSS의 산성도 및 직교 용해성 문제를 대체하기 위해 PMA(phosphomolybdic acid)가 활용된다 [30]. 그러나 PMA는 낮은 일함수와 산화 취약성 때문에 단독 사용이 어렵다. 이를 보완하기 위해 AMA(ammonium acetate)를 도입하면, PMA의 산소 원자와 AMA의 암모늄 이온 간 정전기적 상호작용으로 강한 쌍극자 층이 형성된다 [그림 6(b)]. 이

과정에서 PMA의 WF가 증가하고 정공 주입 능력이 향상되며, AMA는 에너지 준위를 하향 이동시켜 전기장을 증폭하고 CGE를 개선한다. 그 결과, 발광 효율 및 소자 성능이 크게 향상되며, 이는 그림 6(d), 6(e) 및 표 2에서 확인할 수 있다.

#### 3.3.2 Inverted 구조

Inverted 구조에서의 대표적 쌍극자 기반 CGL은 Al:AlOx 및 PEIE/ZnO 구조이다.[31] Al:AlOx 기반 구조에서는 PMA 위에 Al을 증착한 뒤 자연 산화시켜 Al:AlOx 층을 형성한다 [그림 7(a)]. 이 구조에서는 PMA-Al 계면에서 전하가 생성되고, 생성된 전하는 AlOx를 통해 상·하부 층으로 전달된다 [그림 7(b)]. AlOx는 절연 특성을 가져 과도한 전자 주입을 억제하고, 터널링을 통해 전하를 효율적으로 전달하여 전하 균형과 발광 효율을 개선한다 [그림 7(c)]. 또한 Al:AlOx는 보호층 역할을 수행해 계면 손상을 방지하고, 스핀코팅 공정에서 발생할 수 있는 문제를 최소화한다. 이 구조의 성능 지표는 표 3에 제시되어 있으며, Inverted 탠덤 QLED에서 차세대 CGL로 주목받고 있다.

## 4. 향후 CGL 설계의 방향성과 기술 과제

탠덤 QLED의 성능은 EML 간 전하 흐름을 매개하는 CGL의 설계에 크게 좌우된다. 지금까지 다양한 구조의 CGL이 제안되었으나, 상용화를 위해서는 단순한 전하 생성 기능을 넘어 구조적 장점을 극대화하고, 아직 해결되지 않은 여러 기술적 과제를 극복할 필요가 있다.

우선, 전하 생성 효율의 향상과 전하 균형 확보가 핵심 과제이다. 단순히 전자와 정공을 생성하는 것만으로는 부족하며, 상·하부 EML 간 주입 비율이 균형을 이루어야 효율적인 방사성 재결합이 가능하다. 이를 위해서는 정밀한 에너지 정렬, 계면 호환성 확보, 비대칭 전하 주입 억제가

필수적이다.

둘째, 공정 호환성과 계면 안정성이 중요한 도전 과제이다. 용액 공정 기반의 소자는 상부 공정에서 사용되는 용매가 하부 층을 손상시킬 수 있으며, 열처리 과정에서도 계면 변형이나 확산이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 보호층 도입, 표면 개질, 용매 간섭 억제 전략이 요구되며, 특히 유·무기 계면에서의 층간 확산 최소화가 필요하다.

셋째, 광학적 특성 최적화도 필수적이다. 탠덤 QLED에서는 상·하부 EML이 모두 발광하므로, CGL은 높은 광 투과도를 유지해야 하며, 내부 간섭이나 반사로 인한 광 손실을 억제해야 한다. 따라서 굴절률 제어 및 두께 최적화가 병행되어야 한다.

마지막으로, 상용화를 위한 안정성과 재현성 확보가 필요하다. 높은 효율을 갖춘 CGL 구조라도 소자 간 편차가 크거나 장기 안정성이 확보되지 않으면 실질적 응용이 어렵다. 이에 따라 균일한 박막 형성이 가능한 공정 기술, 대면적·대량 생산 시 일관된 성능을 유지할 수 있는 재료와 제조 시스템이 요구된다.

현재 CGL은 단순한 전하 생성층을 넘어, 계면 보호·광 투과 향상·공정 안정성 확보 등 다기능 계면으로 진화하고 있다. 향후 CGL 설계는 단일 기능적 접근을 넘어서, 전기적·광학적·공정적·안정성을 통합한 전략으로 발전해야 하며, 이러한 다각적 접근은 고성능·장수명 탠덤 QLED 구현과 상용화를 앞당길 것으로 기대된다.

## ORCID

Moon Kee Choi

<https://orcid.org/0000-0003-4536-3393>

## 감사의 글

This work was supported by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) grant funded by the Korean Government (MOTIE) (RS-2025-16064125).

## REFERENCES

- [1] S. Coe, W. K. Woo, M. Bawendi, and V. Bulović, *Nature*, **420**, 800 (2002).  
doi: <https://doi.org/10.1038/nature01217>
- [2] K. Kim, D. R. Kim, D. Kim, H. H. Song, S. Lee, Y. Choi, K. Lee, G. H. Lee, J. Lee, H. H. Kim, E. Ahn, J. H. Jang, Y. Kim, H. C. Lee, Y. Kim, S. I. Park, J. Yoo, Y. Lee, J. Park, D. H. Kim, M. K. Choi, and J. Yang, *Adv. Mater.*, **37**, 2420633 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202420633>
- [3] S. Li, J. H. Jang, W. Chung, H. Seung, S. I. Park, H. Ma, W. J. Pyo, C. Choi, D. S. Chung, D. H. Kim, M. K. Choi, and J. Yang, *ACS Nano*, **17**, 20013 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c05178>
- [4] D. Kim and M. K. Choi, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **35**, 547 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.6.2>
- [5] H. Jo and M. S. Kang, *Korean J. Chem. Eng.*, **41**, 3431 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s11814-024-00235-w>
- [6] A. Ali, S. Oh, W. Kim, and S. J. Oh, *Korean J. Chem. Eng.*, **41**, 3545 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s11814-024-00251-w>
- [7] J. Yang, J. Yoo, W. S. Yu, and M. K. Choi, *Macromol. Res.*, **29**, 391 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s13233-021-9055-y>
- [8] J. Yoo, K. Lee, U. J. Yang, H. H. Song, J. H. Jang, G. H. Lee, M. S. Bootharaju, J. H. Kim, K. Kim, S. I. Park, J. D. Seo, S. Li, W. S. Yu, J. I. Kwon, M. H. Song, T. Hyeon, J. Yang, and M. K. Choi, *Nature Photonics*, **18**, 1105 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41566-024-01496-x>
- [9] T. Lee, B. J. Kim, H. Lee, D. Hahm, W. K. Bae, J. Lim, and J. Kwak, *Adv. Mater.*, **34**, 2106276 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202106276>
- [10] D. C. Kim, H. Seung, J. Yoo, J. Kim, H. H. Song, J. S. Kim, Y. Kim, K. Lee, C. Choi, D. Jung, C. Park, H. Heo, J. Yang, T. Hyeon, M. K. Choi, and D. H. Kim, *Nat. Electron.*, **7**, 365 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41928-024-01152-w>
- [11] S. Chang, J. H. Koo, J. Yoo, M. S. Kim, M. K. Choi, D. H. Kim, and Y. M. Song, *Chem. Rev.*, **124**, 768 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00548>
- [12] W. Koh and M. K. Choi, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 537 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.6.1>
- [13] Y. Kim, J. Yang, and M. K. Choi, *Korean J. Chem. Eng.*, **41**, 3469 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s11814-024-00301-3>
- [14] J. Yoo, S. Ha, G. H. Lee, Y. Kim, and M. K. Choi, *Adv. Funct. Mater.*, **33**, 2302473 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202302473>
- [15] M. Lee, H. Seung, J. I. Kwon, M. K. Choi, D. H. Kim, and C. Choi, *ACS Omega*, **8**, 5209 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00440>
- [16] K. Lee, Y. Kim, E. Ahn, J. I. Kwon, H. Ma, J. H. Jang, S. Li, H. C. Lee, G. H. Lee, S. Lee, K. Kim, N. J. Sung, D. Kim, M. H. Song, M. K. Choi, and J. Yang, *Mater. Today*, **75**, 2 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2024.03.008>
- [17] D. C. Kim, M. Karl, K. Lee, D. Ko, D. H. Kim, J. Yang, and M.

- K. Choi, *Small*, **21**, e05099 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.1002/smll.202505099>
- [18] K. Kim, M. Kim, and J. Yang, *Korean J. Chem. Eng.*, **41**, 3501 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s11814-024-00179-1>
- [19] D. C. Kim, M. K. Choi, D. H. Kim, and J. Yang, *npj Flex. Electron.*, **9**, 50 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41528-025-00427-2>
- [20] L. K. Bae and M. K. Choi, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **38**, 21 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2025.38.1.3>
- [21] J. Kim, B. Lee, G. M. Kim, I. Lee, S. Y. Lee, K. R. Choi, and D. C. Lee, *Korean J. Chem. Eng.*, **41**, 3593 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s11814-024-00225-y>
- [22] J. H. Jang, S. Li, D. H. Kim, J. Yang, and M. K. Choi, *Adv. Electron. Mater.*, **9**, 2201271 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1002/aelm.202201271>
- [23] Q. Su, H. Zhang, and S. Chen, *npj Flex. Electron.*, **5**, 8 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41528-021-00106-y>
- [24] H. B. Ren, W. S. Shen, Y. K. Wang, and L. S. Liao, *Adv. Funct. Mater.*, e06771 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202506771>
- [25] H. Li, J. Wang, and S. Chen, *Light Sci. Appl.*, **14**, 171 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41377-025-01835-9>
- [26] H. Zhang, S. Wang, X. Sun, and S. Chen, *J. Soc. Inf. Disp.*, **25**, 143 (2017).  
doi: <https://doi.org/10.1002/jsid.541>
- [27] H. Zhang, X. Sun, and S. Chen, *Adv. Funct. Mater.*, **27**, 1700610 (2017).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201700610>
- [28] T. Zhou, T. Wang, J. Bai, S. Liu, H. Zhang, W. Xie, and W. Ji, *Adv. Mater.*, **36**, 2313888 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202313888>
- [29] C. Yuan, Z. Chen, F. Tian, and S. Chen, *Nano Lett.*, **24**, 7541 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.4c02021>
- [30] S. G. Meng, Y. Wang, J. Z. Xu, W. Z. Liu, W. S. Shen, D. Y. Zhou, and L. S. Liao, *Adv. Electron. Mater.*, **11**, 2500180 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.1002/aelm.202500180>
- [31] Q. Wu, X. Gong, D. Zhao, Y. B. Zhao, F. Cao, H. Wang, S. Wang, J. Zhang, R. Quintero-Bermudez, E. H. Sargent, and X. Yang, *Adv. Mater.*, **34**, 2108150 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202108150>
- [32] J. Wu, J. Xia, and W. Lei, *Org. Electron.*, **67**, 116 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2019.01.015>