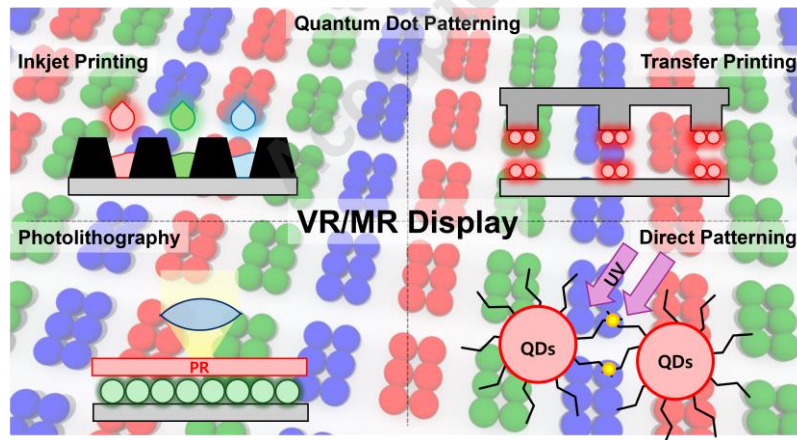


REVIEW

초고해상도 AR/VR 디스플레이를 위한 양자점 패터닝 기술

박준혁¹, 오승주^{1*}¹ 고려대학교 신소재공학과

Quantum Dot Patterning Techniques for High-Resolution AR/VR Displays

Junhyeok Park¹, Soong Ju Oh^{1*}¹Department of Material Science and Engineering, Korea University, Seoul, Korea*Correspondence: sjoh1982@korea.ac.kr

ABSTRACT

Quantum dots (QDs) have emerged as promising emissive materials for next-generation displays owing to their narrow emission bandwidth, high color purity, and solution processability. However, achieving non-destructive, high-resolution patterning of QDs—defined as patterning process that preserve the intrinsic optical and electrical properties of QDs—at the sub-micrometer scale remains a major challenge for realizing advanced QD light-emitting diodes (QLEDs). To address this, diverse patterning strategies, including inkjet printing, transfer printing, photolithography, and direct patterning, have been developed to combine chemical stability with precise spatial control. These techniques aim to preserve the intrinsic optical and electrical properties of QDs while enabling high-resolution arrays. Such progress is pivotal for next-generation displays, particularly in augmented and virtual reality (AR/VR) devices, which demand ultra-fine pixelation, high efficiency, and wide color gamut. This review summarizes recent advances in QD patterning and discusses further directions toward scalable, high-performance display technologies.

Key Words: Quantum Dots (QDs), Patterning, Non-destructive, Display, AR/VR

1. 서론

양자점(Quantum Dot, QD)은 우수한 광학적 및 전기적 특성으로 인해 차세대 광반도체 소재로 각광받고 있다¹⁻³. 수 나노미터(nm) 크기의 반도체 결정으로 구성된 QD는 양자 구속 효과(Quantum Confinement Effect)에 의해 크기 조절을 통해 발광 파장을 정밀하게 제어할 수 있으며, 높은 휘도, 우수한 색순도를 나타낸다^{4,5}. 이러한 특성으로 QDs는 컬러필터, 백라이트 유닛, 발광층 등 다양한 디스플레이 구조에 적용되고 있으며, 차세대 자발광 물질로 주목받고 있다.

최근 연구는 전계발광(Electroluminescent) 기반 QD 발광다이오드(Quantum Dot Light-Emitting Diode, QLED)로 확장되고 있다. QLED는 QD를 발광층으로 직접 활용하여 고효율, 고색순도의 디스플레이 구현이 가능하다. 특히 정밀한 에너지 밴드 정렬을 통해 전자 및 정공 주입을 효율적으로 조절할 수 있으며, 외부 양자 효율(External Quantum Efficiency, EQE)이 25%에 근접하는 등 높은 수준의 성능이 보고되고 있다⁶⁻⁸. 현재 연구자들은 전하 주입 균형, 표면 결함 억제, 계면 안정화 등 소자 안정성 향상을 위한 재료 및 공정 기술 개발에 집중하고 있다⁹⁻¹¹.

차세대 디스플레이 시장, 특히 증강현실(Augmented Reality, AR), 가상현실(Virtual Reality, VR)과 같은 몰입형 기기에서는 초고해상도, 정밀한 색 재현력, 넓은 시야각(Field of View, FOV), 고성능, 그리고 색 균일도가 필수적으로 요구된다¹²⁻¹⁵. AR/VR 기기는 사용자의 눈과 디스플레이 간 거리가 짧기 때문에, 픽셀 밀도(Pixel Per Inch, PPI)와 시야당 픽셀 수(Pixel Per Degree, PPD)가 낮을 경우 픽셀 경계가 보이는 스크린 도어 효과가 발생한다. 이러한 현상을 방지하기 위해서는 4,000-10,000 PPI 수준의 초고해상도가 필요하다. 따라서 정밀한

QD 패터닝을 통한 초고해상도 QLED 구조의 구현이 필수적이다^{14,15}.

이에 따라 최근에는 QD의 광학적 및 전기적 물성 열화를 최소화하면서, 마이크로미터 이하의 고정밀 패턴을 구현할 수 있는 새로운 패터닝 기술이 활발히 개발되고 있다. 본 논문에서는 QD 기반 자발광 디스플레이의 고해상도 구현을 위한 최신 패터닝 기술의 연구 동향을 종합적으로 분석하고, 각 기술의 장단점 및 향후 발전 가능성을 논의하고자 한다. 이를 통해 QLED 및 차세대 마이크로 디스플레이 구현을 위한 QD 패터닝 기술의 방향성을 제시한다.

2. 양자점 패터닝 기술 종류

고해상도 디스플레이 구현에서 있어 핵심적인 기술적 과제는 QD를 미세한 픽셀 단위로 정밀하게 패터닝하는 것이다. QD는 표면 리간드에 의해 안정화된 나노입자이기 때문에, 기존 포토리소그래피(Photolithography) 공정에서 용매나 포토레지스트, 열, 광 반응 등에 의해 광학적 특성과 발광 효율이 손상되기 쉽다. 따라서, QD의 고유 특성을 유지하면서도 마이크로미터 이하 수준의 고해상도 패터닝 공정을 개발하는 것이 여전히 중요한 기술적 도전 과제로 남아 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 최근에는 잉크젯 프린팅(Inkjet Printing), 전사 프린팅(Transfer Printing), QD 적합형 포토리소그래피(QD-compatible photolithography), 다이렉트 패터닝(Direct Patterning) 등 다양한 접근 방식이 제안되고 있으며, 각 기술은 해상도, 공정 호환성, 화학적 안정성 측면에서 서로 다른 장점을 보이고 있다.

2.1. 잉크젯 프린팅(Ink-jet printing)

잉크젯 프린팅은 QD 잉크를 미세한 액적으로 분사하여 원하는 위치에 픽셀 패턴을 형성하는

비접촉식 인쇄 기술이다¹⁶⁻²⁴. 본 공정은 별도의 마스크 제작이 필요하지 않으며, 설계 유연성과 비용 효율성이 높다는 장점을 갖는다. 그러나 잉크젯 프린팅은 액적의 정확한 분사 제어기가 어렵고, 액적 내 미세한 증발 속도로 인해 내부 유체 흐름이 가장자리 방향으로 유도되어 QD가 가장자리에 집중되는 커피링(coffee-ring) 현상이 발생하기 쉽다. 이로 인해 균일한 박막 형성이 어려워지는 한계가 존재한다.

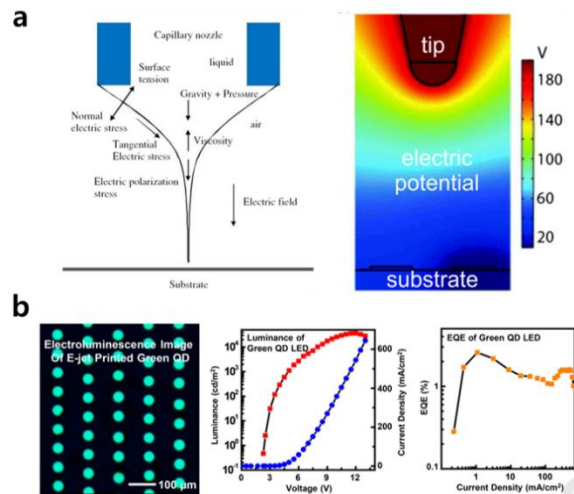


Fig. 1. (a) Schematic illustration of EHD printing and the spatial distribution of the electrical potential during EHD operation around the tip. (b) Optical image of electroluminescence of green QLED and the plots of current density-voltage-luminance, and the EQE. (a) Reproduced with permission²². Copyright 2022, Wiley-VCH. (b) Reproduced with permission²⁴. Copyright 2015, American Chemical Society.

본 문제를 해결하기 위해 QD 잉크 설계 측면에서 혼합 용매의 사용에 대한 연구가 진행되어 왔다¹⁷⁻²¹. Fushan group은 끓는점과 점도가 높은 도데케인(dodecane)을 첨가하여 n-옥테인/n-도데케인 혼합 용매 기반의 QD 잉크를 설계하였다²¹. 이들은 액적의 유체 거동을 동적(dynamic)으로 분석하여 커피링 현상은 억제하였으며, 유기 정공수송층 상부의 बैं크 내부에 표면 거칠기 1.79 nm의 균일한 박막을 형성하였다. 해당 공정을 통해 최대 휘도 17,559

cd m⁻², EQE 8.1%의 InP QD 기반 QLED를 구현하였다.

또한, 전통적인 압전 방식의 액적 분사와 달리 전기유체역학(EHD, Electrohydrodynamic) 기반 프린팅은 전기장을 이용하여 전도성 노즐로부터 잉크를 분사하므로, 더 높은 해상도와 넓은 점도 범위의 잉크 적용이 가능하다(Fig. 1(a))²²⁻²⁴. Rogers group은 EHD 프린팅을 통해 coffee-ring 현상을 제어하고 균일한 양자점 박막을 형성하였으며, 상기 방법으로 단색 QLED EQE 2.5% 내외의 QLED를 구현하였다(Fig. 1(b))²⁴.

잉크젯 프린팅 기술은 해상도 측면에서 지속적인 발전을 이루어 왔으나, QLED의 EQE는 여전히 낮은 수준에 머물러 있다. 이는 용액 공정 기반의 스핀코팅 방식에 비해 전하 주입 및 필름 균일도 측면에서 한계가 존재하며, 이를 개선하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

2.2. 전사 프린팅 (Transfer printing)

전사 프린팅은 QD를 도너(donor) 기판으로부터 목표 기판으로 물리적으로 전사하는 기술로, 용매를 사용하지 않아 화학적 손상을 최소화할 수 있다는 장점을 가진다. 그러나 기판 간 접촉 및 분리 과정에서 발생하는 응력(stress) 집중 및 불균일한 접착력으로 인해 물리적 손상이 발생할 수 있으며, 이를 해결하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다²⁵⁻³².

전사 과정에서 QD가 도너 기판에서 목표 기판으로 완전히 옮겨지지 않는 문제를 해결하기 위해 도너 기판의 표면 개질 연구가 이루어졌다²⁵⁻²⁸. Kim group은 도너 기판 표면을 옥타데실트라이클로로실란(ODTS) 자가조립단분자(Self-Assembled Monolayer, SAM)로 처리하여 QD 박막과 도너 기판 간 상호작용을 약화시킴

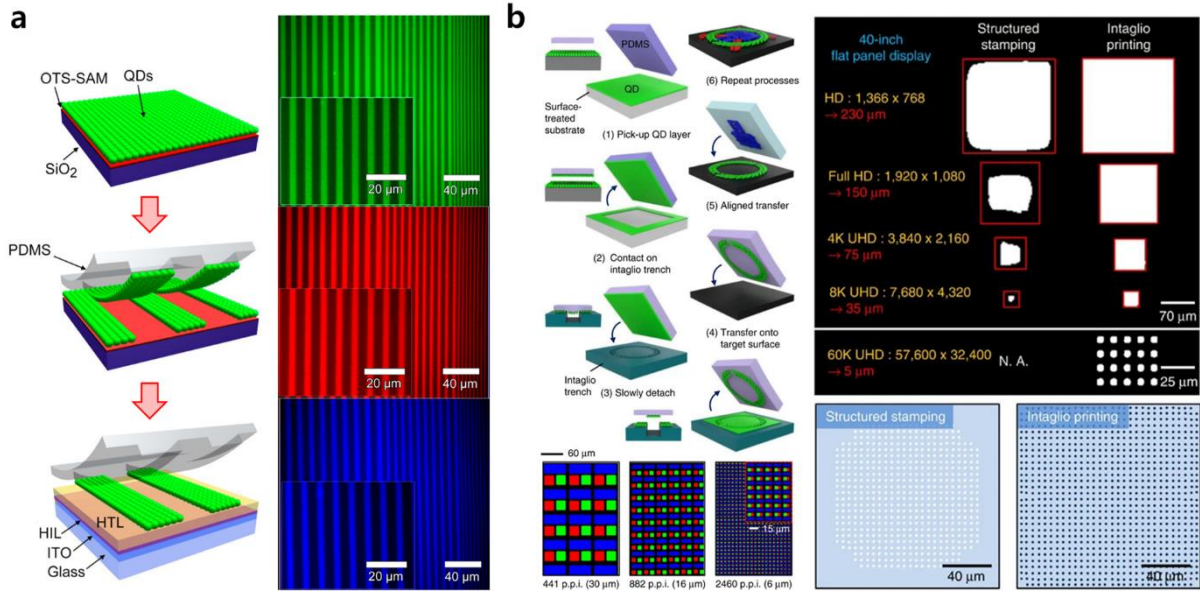


Fig. 2. (a) Schematic illustration of the QD transfer printing with the donor substrate treated with ODTS. Optical images of green, red, blue QD arrays. (b) Schematic illustration of the intaglio transfer printing process. The PL images of red, green, blue QD patterns. Pattern size scaling in the structured stamping and intaglio transfer printing. (a) Reproduced with permission [11]. Copyright 2015, American Chemical Society. (b) Reproduced with permission [14]. Copyright 2015, Springer Nature.

으로써 전사 효율을 향상시켰다²⁷. 또한, ODTS SAM 처리된 도너 기판 위에 수용성 PVA(polyvinyl alcohol) 층을 삽입하여, 수용액에서 용해시켜 완전한 QD 탈착을 실현하였다²⁸.

Choi group 은 인타글리오 (intaglio) 전사 프린팅을 도입하여 공정 중 발생하는 응력을 제어하였다^{29,30}. 본 인타글리오 프린팅을 통해 연구진은 100% 전사 효율로 2,460 PPI 해상도의 RGB 삼색 QD 어레이를 구현하였다(Fig. 2(b))²⁹. 이후 기판 간 흡착력의 차이를 분석하여 QD 층과 ZnO 나노입자 (Nanoparticles, NPs) 전자 수송층을 동시에 전사하는 전사 기술을 제시하였다³⁰. 인타글리오 프린팅을 기반으로 약 20,526 PPI 초고해상도 RGB 삼색 QD 어레이를 구현하였다. 또한, 전사 프린팅을 기반으로 제작된 QLED 는 최대 EQE 23.3%를 달성하였으며, 스�핀코팅 기반 QLED 대비 향상된 효율을 보였다. 이 현상은 전사 과정 중 인가된 압력에 의해 ZnO NPs 간 거리가 감소함으로써 누

설 전류(leakage current) 억제되고 전하 주입 효율이 개선된 결과로 분석되었다.

Jung group 은 열역학적으로 구동되는 침지 전사 프린팅 (immersion Transfer Printing, iTP) 기술을 제안하였으며, 본 기술을 통해 14,063 PPI 해상도의 RGB 삼색 QD 어레이를 구현하였다³¹. Qian group 은 란드뮤어-블로젯 (Langmuir-Blodgett) 전사 기술을 기반으로 단색 QD 어레이에서 25,400 PPI 의 해상도를 달성하였다³². 이와 같이, 전사 프린팅은 1 μm 이하의 초고해상도 RGB 삼색 QD 패턴 구현이 가능하며, VR/AR 디스플레이 등 초고밀도 소자 제작에 적합한 기술로 평가된다.

2.3. QD 적합형 포토리소그래피

기존 포토리소그래피는 감광성 고분자 (Photoresist, PR)를 자외선(UV)으로 선택적으로 노광하여, 현상 과정을 통해 미세 패턴을 형성하는 공정이다. 마스크를 통해 선택적으로 노광된 영역은 PR 종류에 따라 제거되거나 잔류

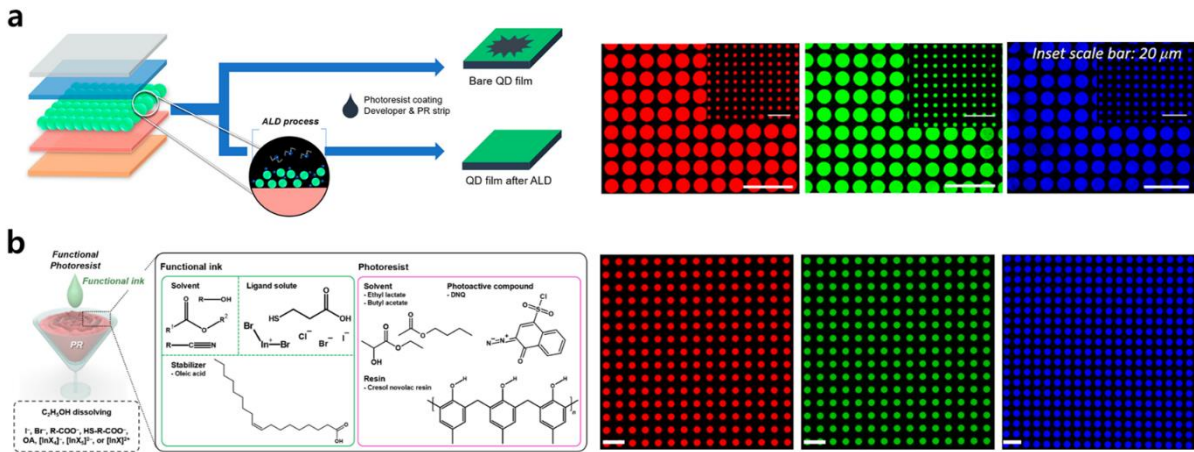


Fig. 3. PR-based QD photolithography (a) Schematic illustration of the photolithography of QDs stabilized via ZnO ALD deposition. (b) Schematic illustration of transfer printing with the donor substrate treated with ODTs. Optical images of green, red, blue QD arrays. (b) Chemical composition of the F-PR. Confocal images of patterned red, green, blue QDs (4,200 PPI). (a) Reproduced with permission [19]. Copyright 2021, American Chemical Society. (b) Reproduced with permission [22]. Copyright 2025, Elsevier.

하게 되며, 이후 기판 하부가 노출되어 식각 (etching) 혹은 증착(deposition)을 통한 정밀한 구조를 제작할 수 있다. PR을 이용한 리소그래피는 널리 알려진 패터닝 기술 중 하나로, 기존 반도체 공정 장비를 그대로 활용할 수 있어 공정 호환성이 높고 수십 마이크로미터 수준의 고해상도 패턴 구현이 가능하다. 그러나 QD 표면의 유기 리간드는 PR 및 현상액 (developer)과 반응하여 표면 결함과 광학적 물성 저하를 유발할 수 있으며, 이는 전하 수송과 QLED 효율 저하로 이어진다. 따라서 리소그래피 공정 중 QD의 물성 열화를 억제하기 위한 접근이 필요하다.

Cho group은 원자층 증착 (Atomic Layer Deposition, ALD)을 이용해 포토리소그래피 공정 중 QD의 성능 저하를 방지하는 전략을 제시하였다³³⁻³⁵. 2021년 Cho group은 Cd 기반 QD 박막에 디에틸아연(diethylzinc, DEZ)을 ALD 전구체로 사용하여 ZnO 보호층을 증착하였다(Fig. 3(a))³⁴. 형성된 ZnO 보호층을 통해 QD 박막의 내화학적 안정성을 향상시켜, 리소그래피 공정 중 화학적 손상을 억제하였다. 이를 통해 연구진은 최대 3,600 PPI 단색 QD 어레이와 800 PPI 해상도의 RGB 삼색 패턴을 구현하였

다. ALD 공정을 적용한 QLED는 기존 소자 대비 향상된 EQE를 보였으며, 포토리소그래피 공정 이후에도 EQE 저감율이 낮음을 확인하였다. 2023년 Cho group은 ALD 기반 포토리소그래피를 친환경 InP QD에 적용하였다³⁵. 공정 중 ZnO 보호층을 ALD로 증착하여, 광반응 물질 (Photoactive compounds, PACs)과 용매에 의한 화학적 손상을 근본적으로 억제하였으며, InP QD의 광학적 물성을 유지한 채 2,000 PPI 이상의 고해상도 QD 패턴을 구현하였다. 또한 반복적인 공정을 통해 적색 녹색 InP QD를 병렬 및 적층 구조로 배열하여 다중 색상 QD 어레이를 제작하였다.

Oh group은 표면 안정화 리간드를 도입하여 저손상 포토리소그래피 공정을 개발하였다^{36,37}. 2022년 Oh group은 이중 작용기 리간드 (bifunctional ligand)를 활용한 포토리소그래피 전략을 제시하였다³⁶. Cd 기반 QD 표면에 MPA 리간드를 결합시켜, 카복실기 (-COOH)는 알칼리성 현상액과 반응해 노광된 PR과 함께 제거되고, 티올기(-SH)는 QD 표면을 안정화하였다. 본 공정을 통해 별도의 식각 과정 없이 폭 10 μm(약 2,540 PPI)의 QD 패턴을 구현했

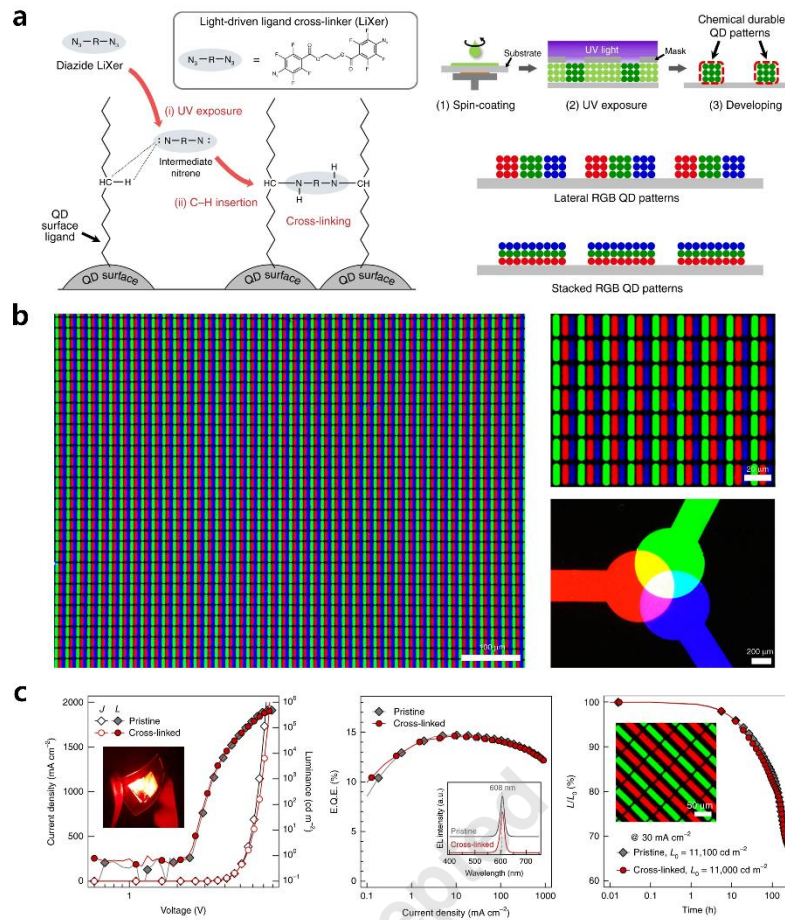


Fig. 4. (a) Schematic illustration of the direct patterning process based on the C-H insertion reaction of the nitrene moiety of LiXer. (b) Fluorescence microscopic images of red, green, blue QD patterns. (c) Performance of QLEDs demonstrating the non-destructive direct patterning. (a)–(c) Reproduced with permission [25]. Copyright 2020, Springer Nature.

으며, QLED 성능이 패터닝 전과 유사하게 유지됨을 확인하였다. 2025년 Oh group은 QD 표면 안정화 기능을 갖는 PR을 개발했다(Fig. 3(b))³⁷. 연구진은 포토리소그래피 공정 중 PR 내 PAC가 QD 물성 저하 원인을 규명하였으며, PAC와 QD 간 상호작용을 차단하기 위해 표면 안정제를 도입한 기능성 PR (F-PR, Functional PR)을 설계하였다. F-PR 공정을 통해 QD 표면 개질과 포토리소그래피를 동시에 수행할 수 있었으며, QD 물성 열화 없이 4,200 PPI 해상도의 QD 어레이를 구현하였다. F-PR을 이용해 제작된 QLED는 198,576 cd m⁻²의 휘도와 21.58%의 EQE를 달성하였고, 패터닝을 거치지 않은 기존 소자 (휘도: 204,163 cd m⁻², EQE: 23.9%) 대비 90% 이상의 성능을 유지하였다. 이를 통해 QD 표면 안정화를 통한 PR

기반 포토리소그래피 공정의 손상 억제 가능성을 입증하였다.

2.4. 다이렉트 패터닝(Direct Patterning)

다이렉트 패터닝은 PR 없이 QD 자체 광반응성 물질로 활용하여, 자외선 조사에 따라 용해도 및 가교도가 변하는 원리를 이용해 미세 패턴을 형성하는 기술이다. 본 공정은 기존 PR 기반 포토리소그래피에서 발생하는 화학적 손상과 계면 불안정성을 제거하면서, 고해상도 패턴 구현이 가능하다는 장점이 있다.

이 기술은 Talpin group에 의해 처음 제시된 DOLFIN (Direct Optical Lithography of Functional Inorganic Nanomaterials) 개념에서 비롯되었다^{38,39}. Talpin group은 광산발생제

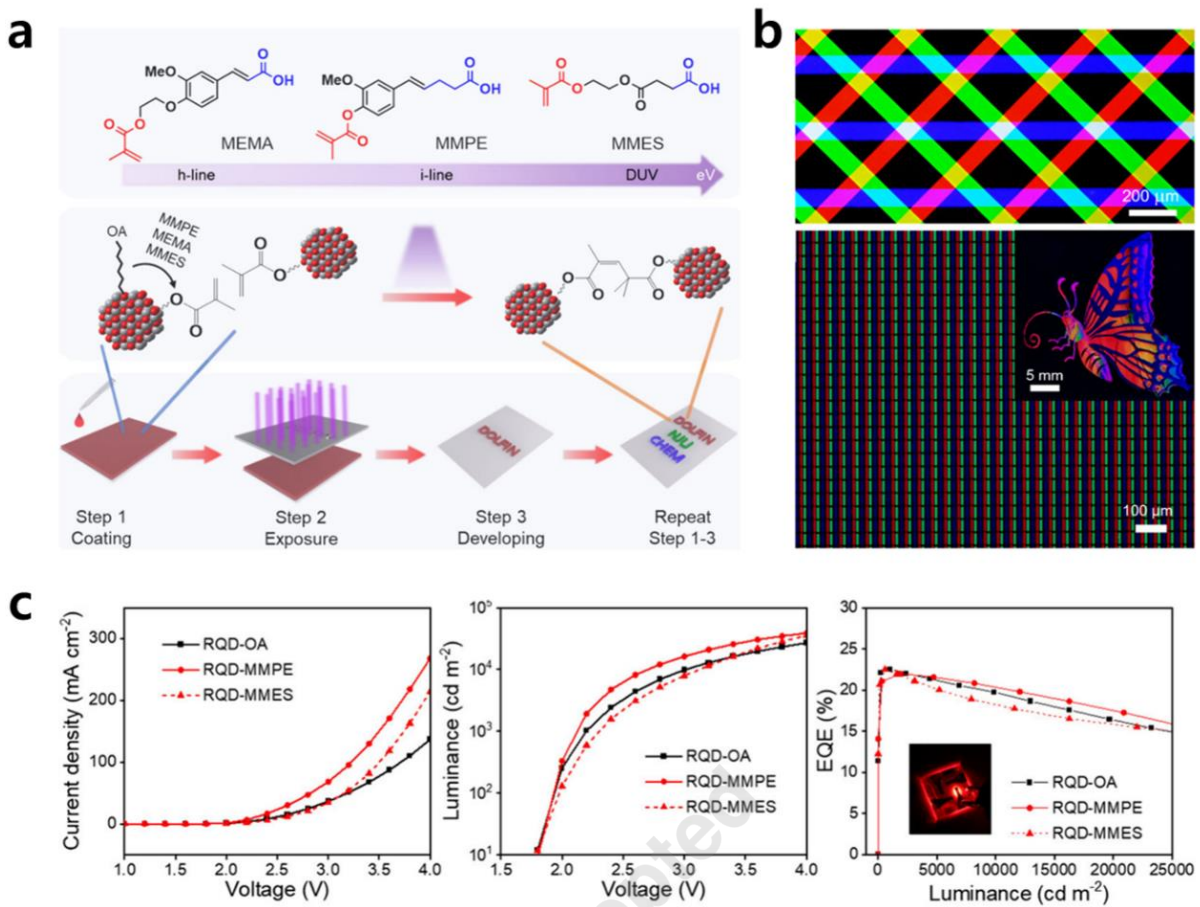


Fig. 5. (a) Schematic illustration of dual-functional ligands and patterning process. (b) Optical images of red, green, blue QD pixels patterned through sequential process. (c) Performance of QLEDs. (a)–(c) Reproduced with permission [32]. Copyright 2025, American Chemical Society.

(Photoacid generator, PAG)를 QD에 첨가하여, QD 표면의 무기 음이온과 함께 반응시키는 방법을 제시하였다³⁸. 자외선 조사 시 PAG가 산성 프로톤을 생성하여 QD 표면의 음이온과 결합함으로써, 노광 영역의 용해도 차이를 유도하였고, 이를 통해 별도의 PR 없이 선택적 패터닝이 가능함을 입증하였다. 이후 연구진은 트리아진 (triazine) 및 나프톨계 광개시제를 도입하여 QD 자체를 광반응성 발광재료로 전환하였다.³⁹

PAG 기반 접근법 외에도, 광가교성 첨가제 (crosslinkable additive) 또는 광가교성 리간드 (crosslinkable ligand)를 이용한 다양한 다이렉트 패터닝 연구가 활발히 진행되고 있다.

2.4.1. 광가교성 첨가제 기반 다이렉트 패터닝

Kang group은 아자이드 (azide) 계열의 crosslinker를 설계하여 자외선 조사 시 생성된 니트렌(nitrene) 라디칼이 인접 리간드의 C-H 결합에 삽입되어 QD 간 가교결합을 형성함을 보고하였다(Fig. 4(a))⁴⁰. 본 공정을 통해 약 1,400 PPI 해상도의 RGB 어레이를 구현하였으며(Fig. 4(b)), QLEDs 제작 이후에도 패터닝 공정에 따른 소자 성능 저감도 거의 없음을 확인하였다(Fig. 4(c)). 이후 아자이드 단위를 다수 포함한 multi-branched crosslinker를 도입하여 가교 밀도 및 기계적 안정성을 향상시킨 결과, 3,240 PPI InP QD 기반 고해상도 RGB 패턴을 구현하였다⁴¹. 이외에도, QD와 첨가제 간 thiol-ene 결합^{42–44} 및 acrylate 결합을⁴⁵ 이용

한 연구가 보고되어, 광학적 물성 유지율과 내 화학성 모두에서 우수한 결과를 보였다.

2.4.2. 광가교성 리간드 기반 다이렉트 패터닝

QD 표면을 직접 개질 하여 가교 반응이 가능한 리간드를 도입하는 전략도 제시되었다. Bae group 은 벤조페논(benzophenone) 기반의 C-H 삽입형 가교 리간드를 설계하여, UV 조사 시 벤조페논 삼중항 상태에서 인접 리간드의 C-C 결합을 형성하도록 하였다⁴⁶. 이를 통해 15,000 PPI 초고해상도의 RGB QD 패턴을 구현하였으며, 95% 이상의 광학적 물성 유지율을 확보하였다.

또한, Wang group 은 메타아크릴레이트(methacrylate)와 카복실기(carboxyl)를 동시에 포함한 dual-functional 리간드를 설계하여(Fig. 5(a)), 광흡수 영역을 조절함으로써 9,534 PPI 해상도의 QD 어레이를 구현하였다(Fig. 5(b))⁴⁷. 해당 공정으로 제작된 QLED 는 22%의 EQE 를 달성하였다(Fig. 5(c)).

최근 Oh group 은 환상 개환중합(ring-opening polymerization, ROP) 메커니즘을 도입한 새로운 QD 패터닝 전략을 제시하였다⁴⁸. 리포산(lipoic acid, LA)을 QD 표면 리간드로 도입하여, 이황화 고리 구조(cyclic disulfide ring)가 자외선 조사 시 개환중합을 유도하도록 설계되었다. 이 공정을 통해 3,788 PPI 의 RGB QD 어레이를 구현하였으며, 자가복원 및 재활용이 가능한 가역적 가교 공정임을 입증하였다.

현재까지 각 양자점 패터닝 공정은 공정 특성에 따라 최고 수준의 고해상도 픽셀 밀도를 달성했다(표 1). 초고해상도 구현과 더불어 실제 디스플레이 응용을 위해서는 패터닝 이후에도 높은 소자 성능을 안정적으로 유지하는 것이 중요하며, 이에 유리한 조건은 공정 방식에 따라 차이를 보인다. 잉크젯 프린팅의 경우, 혼

합 용매 설계 및 첨가제 도입을 통해 박막 균일성을 개선하였으나, 액적 기반 공정으로 전하 수송층과의 계면 품질이 제한되어 높은 성능 달성에는 한계가 존재한다. 전사 프린팅은 발광층을 사전에 최적화된 상태로 형성한 후 소자 구조에 전사할 수 있어, QD 표면 손상을 최소화하고 전하 주입 균형을 유지하는데 유리하며, 이에 따라 높은 EQE 를 가진 QLEDs 를 보고하였다. QD 적합형 포토리소그래피는 보호층 및 기능성 포토레지스트를 활용하여 패터닝 과정에서 발생하는 화학적 손상을 억제함으로써, 패터닝 이후에도 전하 수송 특성과 발광 효율을 안정적으로 유지함을 보고하였다. 다이렉트 패터닝은 광가교 반응에 기반하여 QD 의 표면 리간드와 계면 구조를 직접적으로 보존할 수 있으며, 높은 소자 성능을 달성하는데 유리한 전략 중 하나로 보고되고 있다.

패터닝 공정	최고 해상도 (PPI)
잉크젯 프린팅	508
전사 프린팅	20,526
QD 적합형 포토리소그래피	4,200
다이렉트 패터닝	15,875

3. 결론 및 전망

본 논문에서는 차세대 초고해상도 디스플레이 구현을 위한 QD 패터닝 기술의 최근 연구 동향을 종합적으로 고찰하였다. 잉크젯 프린팅, 전사 프린팅, QD 적합형 포토리소그래피, 및 다이렉트 패터닝 기술은 각각 공정 단순성, 고해상도 구현력, 대면적 확장성, 그리고 화학적 안정성 측면에서 장점을 보였다.

향후 연구는 단순한 패턴 형성 기술의 정교화에 그치지 않고, 전기적 물성 및 소자 구동 특성까지 고려한 통합적 연구 방향으로 확장되어야 한다. 특히 QD 패터닝 후 발생하는 계면 결함, 전하 수송 불균일성, 소자 내 전계 분포

불안정성 등이 QLED 및 마이크로 디스플레이의 효율과 수명에 직접적인 영향을 미치기 때문에, 광학적 해상도뿐 아니라 전기적 안정성을 함께 확보하는 설계가 요구된다.

한편, AR/VR 마이크로 디스플레이에서는 스크린 도어 효과를 억제하고 저전력 조건에서도 충분한 휘도를 확보하기 위해 일반적으로 3,800 PPI 이상의 초고해상도와 20% 이상의 EQE가 요구되는 것으로 보고되고 있다. 이러한 요구 조건을 고려할 때, 전사 프린팅과 다이렉트 패터닝 기술은 초고해상도 구현 측면에서 유리한 반면, QD 적합형 포토리소그래피는 공정 확장성에서 장점을 가진다. 그러나 각 패터닝 기술은 대면적 균일성 확보, 다층 소자 통합, 수율 제어 등 양산 관점에서 여전히 기술적 도전과제를 안고 있으며, 이를 해결하기 위한 공정 최적화와 공정 융합 전략이 필요하다.

나아가, QD 패터닝 기술은 단순한 발광층 제작을 넘어, 광전자 통합소자 및 AR/VR 마이크로 디스플레이 등 다양한 응용 분야로 확장되고 있다. 궁극적으로는 초고해상도 패턴 구현과 함께 전기적 안정성, 소자 신뢰성, 그리고 장기 내구성을 동시에 달성하는 것이 차세대 QD 디스플레이 상용화를 위한 핵심과제가 될 것이다. 이를 위해서 소재, 공정, 소자 물리의 유기적 연계를 기반으로 한 다학제적 연구 접근이 필수적이며, 이러한 발전은 향후 고성능, 고효율, 지속 가능한 QD 기반 광전자소자의 전환을 가속화할 것으로 기대된다.

기호설명

QDs: Quantum Dots
QLED: Quantum Dot Light-Emitting Diode
EQE: External Quantum Efficiency
AR: Augmented Reality
VR: Virtual Reality
FOV: Field of View
PPI: Pixel Per Inch
PPD: Pixel Per Degree

EHD: Electrohydrodynamic
ODTS: n-Octadecyltrichlorosilane
SAM: Self-Assembled Monolayer
NPs: Nanoparticles
iTP: Immersion Transfer Printing
PR: Photoresist
ALD: Atomic Layer Deposition
DEZ: Diethylzinc
PACs: Photoactive Compounds
PAGs: Photoacid Generators
LA: Lipoic Acid

ACKNOWLEDGEMENTS

Author Contributions

J. Park and S. J. Oh wrote the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

Funding

This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2024-00438059, RS-2024-00411892).

Declarations of Competing Interests

The authors declare that they have no competing interests.

AUTHORS



박준혁
2016 ~ 2022년: 고려대학교
신소재공학부 학사
2023 ~ 현재: 고려대학교 신소재공학부
석박통합과정
[관심분야] 양자점, 디스플레이, 패터닝



오승주
2001 ~ 2007년: 고려대학교
신소재공학부 학사
2007 ~ 2008년: 한국 과학 기술연구원
(KIST) 위촉연구원
2008 ~ 2014년: University of Pennsylvania

재료공학 박사

2014년: University of Pennsylvania 박사후 연구원

2014 ~ 2015년: University of Illinois 박사후 연구원

2015 ~ 2020년: 고려대학교 신소재공학부 조교수

2020 ~ 2025년: 고려대학교 신소재공학부 부교수

2025 ~ 현재: 고려대학교 신소재공학부 교수

[관심분야] 양자점, 나노소재, 광전소자, 유연/신축 전극

REFERENCES

- (1) Kagan, C. R.; Lifshitz, E.; Sargent, E. H.; Talapin, D. V., Building Devices from Colloidal Quantum Dots. *Science*. 2016, 353, 6302.
- (2) Jung, B. K.; Yoo, H.; Seo, B.; Choi, H. J.; Choi, Y. K.; Kim, T. H., et al. High-Affinity Ligand-Enhanced Passivation of Group III-V Colloidal Quantum Dots for Sensitive Near-Infrared Photodetection. *ACS Energy Lett.* 2024, 9 (2), 504–512.
- (3) Oh, S.; Yoon, S. Y.; Jung, B. K.; Choi, Y. K.; Ahn, J.; Park, et al., Designing a Quantum Dot Upconversion Infrared Image Sensor via a Photomultiplication Mechanism. *ACS Energy Lett.* **2024**, 5914–5923.
- (4) Boles, M. A.; Ling, D.; Hyeon, T.; Talapin, D. V. The Surface Science of Nanocrystals. *Nature Materials*. 2016, 141–153.
- (5) Shirasaki, Y.; Supran, G. J.; Bawendi, M. G.; Bulović, V. Emergence of Colloidal Quantum-Dot Light-Emitting Technologies. *Nat. Photonics*. 2013, 13–23.
- (6) Won, Y. H.; Cho, O.; Kim, T.; Chung, D. Y.; Kim, T.; Chung, H., et al. Highly Efficient and Stable InP/ZnSe/ZnS Quantum Dot Light-Emitting Diodes. *Nature* 2019, 575 (7784), 634–638.
- (7) Kim, T.; Kim, K. H.; Kim, S.; Choi, S. M.; Jang, H.; Seo, H. K., et al. Efficient and Stable Blue Quantum Dot Light-Emitting Diode. *Nature/* 2020, 586 (7829), 385–389.
- (8) Deng, Y.; Peng, F.; Lu, Y.; Zhu, X.; Jin, W.; Qiu, J., et al. Solution-Processed Green and Blue Quantum-Dot Light-Emitting Diodes with Eliminated Charge Leakage. *Nat. Photonics* 2022, 16 (7), 505–511.
- (9) Yuan, C.; Tian, F.; Chen, S. ZnSeTe Blue Top-Emitting QLEDs with Color Saturation near Rec.2020 Standards and Efficiency over 18.16%. *Nano Res.* 2023, 16 (4), 5517–5524.
- (10) Mashford, B. S.; Stevenson, M.; Popovic, Z.; Hamilton, C.; Zhou, Z.; Breen, C., et al. High-Efficiency Quantum-Dot Light-Emitting Devices with Enhanced Charge Injection. *Nat. Photonics* 2013, 7 (5), 407–412.
- (11) Lee, T.; Kim, B. J.; Lee, H.; Hahm, D.; Bae, W. K.; Lim, J., et al. Bright and Stable Quantum Dot Light-Emitting Diodes. *Adv. Mater.* 2022, 34 (4).
- (12) Xiong, J.; Hsiang, E. L.; He, Z.; Zhan, T.; Wu, S. T. Augmented Reality and Virtual Reality Displays: Emerging Technologies and Future Perspectives. *Light Sci. Appl.* 2021, 10 (1), 1–30.
- (13) Zhan, T.; Yin, K.; Xiong, J.; He, Z.; Wu, S. T. Augmented Reality and Virtual Reality Displays: Perspectives and Challenges. *iScience* 2020, 23 (8), 101397.
- (14) Park, S. J.; Keum, C.; Zhou, H.; Lee, T. W.; Choe, W.; Cho, H. Progress and Prospects of Nanoscale Emitter Technology for AR/VR Displays. *Adv. Mater. Technol.* 2023, 8 (20), 1–33.
- (15) Jang, H. J.; Lee, J. Y.; Baek, G. W.; Kwak, J.; Park, J. H. Progress in the Development of the Display Performance of AR, VR, QLED and OLED Devices in Recent Years. *J. Inf. Disp.* 2022, 23 (1), 1–17.
- (16) Ahn, J.; Jeon, S.; Woo, H. K.; Bang, J.; Lee, Y. M.; Neuhaus, S. J., et al. Ink-Lithography for Property Engineering and Patterning of Nanocrystal Thin Films. *ACS Nano* 2021, 15 (10), 15667–15675.
- (17) Park, Y.; Park, Y.; Lee, J.; Lee, C. Simulation for Forming Uniform Inkjet-Printed Quantum Dot Layer. *J. Appl. Phys.* 2019, 125 (6).
- (18) Jiang, C.; Zhong, Z.; Liu, B.; He, Z.; Zou, J.; Wang, L., et al. Coffee-Ring-Free Quantum Dot Thin Film Using Inkjet Printing from a Mixed-Solvent System on Modified ZnO Transport Layer for Light-Emitting Devices. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2016, 8 (39), 26162–26168.
- (19) Roh, H.; Ko, D.; Shin, D. Y.; Chang, J. H.; Hahm, D.; Bae, W. K., et al. Enhanced Performance of Pixelated Quantum Dot Light-Emitting Diodes by Inkjet Printing of Quantum Dot-Polymer Composites. *Adv. Opt. Mater.* 2021, 9 (11).
- (20) Yang, P.; Zhang, L.; Kang, D. J.; Strahl, R.; Kraus, T. High-Resolution Inkjet Printing of Quantum Dot Light-Emitting Microdiode Arrays. *Adv. Opt. Mater.* 2020, 8 (1).



- (21) Bai, J.; Hu, H.; Yu, Y.; Zhu, Y.; Xu, Z.; Zheng, W., et al. Achieving High Performance InP Quantum Dot Light-Emitting Devices by Using Inkjet Printing. *Org. Electron.* 2023, 113, 106705.
- (22) Mkhize, N.; Bhaskaran, H. Electrohydrodynamic Jet Printing: Introductory Concepts and Considerations. *Small Sci.* 2022, 2 (2).
- (23) Li, H.; Duan, Y.; Shao, Z.; Zhang, G.; Li, H., et al. High-Resolution Pixelated Light Emitting Diodes Based on Electrohydrodynamic Printing and Coffee-Ring-Free Quantum Dot Film. *Adv. Mater. Technol.* 2020, 5 (10).
- (24) Kim, B. H.; Onses, M. S.; Lim, J. Bin; Nam, S.; Oh, N.; Kim, H.; Yu, K. J., et al. High-Resolution Patterns of Quantum Dots Formed by Electrohydrodynamic Jet Printing for Light-Emitting Diodes. *Nano Lett.* 2015, 15 (2), 969–973.
- (25) Kim, L. A.; Anikeeva, P. O.; Coe-Sullivan, S. A.; Steckel, J. S.; Bawendi, M. G.; Bulović, V. Contact Printing of Quantum Dot Light-Emitting Devices. *Nano Lett.* 2008, 8 (12), 4513–4517.
- (26) Cho, H.; Kwak, J.; Lim, J.; Park, M.; Lee, D.; Bae, W. K., et al. Soft Contact Transplanted Nanocrystal Quantum Dots for Light-Emitting Diodes: Effect of Surface Energy on Device Performance. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2015, 7 (20), 10828–10833.
- (27) Kim, T. H.; Cho, K. S.; Lee, E. K.; Lee, S. J.; Chae, J.; Kim, J. W., et al. Full-Colour Quantum Dot Displays Fabricated by Transfer Printing. *Nat. Photonics* 2011, 5 (3), 176–182.
- (28) Kim, T. H.; Chung, D. Y.; Ku, J.; Song, I.; Sul, S.; Kim, D. H., et al. Heterogeneous Stacking of Nanodot Monolayers by Dry Pick-and-Place Transfer and Its Applications in Quantum Dot Light-Emitting Diodes. *Nat. Commun.* 2013, 4.
- (29) Choi, M. K.; Yang, J.; Kang, K.; Kim, D. C.; Choi, C.; Park, C., et al. Wearable Red-Green-Blue Quantum Dot Light-Emitting Diode Array Using High-Resolution Intaglio Transfer Printing. *Nat. Commun.* 2015, 6.
- (30) Yoo, J.; Lee, K.; Yang, U. J.; Song, H. H.; Jang, J. H.; Lee, G. H., et al. Highly Efficient Printed Quantum Dot Light-Emitting Diodes through Ultrahigh-Definition Double-Layer Transfer Printing. *Nat. Photonics* 2024, 18 (10), 1105–1112.
- (31) Nam, T. W.; Kim, M.; Wang, Y.; Kim, G. Y.; Choi, W.; Lim, H., et al. Thermodynamic-Driven Polychromatic Quantum Dot Patterning for Light-Emitting Diodes beyond Eye-Limiting Resolution. *Nat. Commun.* 2020, 11 (1), 1–11.
- (32) Meng, T.; Zheng, Y.; Zhao, D.; Hu, H.; Zhu, Y.; Xu, Z., et al. Ultrahigh-Resolution Quantum-Dot Light-Emitting Diodes. *Nat. Photonics* 2022, 16 (4), 297–303.
- (33) Lee, J. Y.; Kim, E. A.; Han, J.; Choi, Y. H.; Hahm, D.; Kang, C. J., et al. Nondestructive Direct Photolithography for Patterning Quantum Dot Films by Atomic Layer Deposition of ZnO. *Adv. Mater. Interfaces* 2022, 9 (22), 1–8.
- (34) Kim, G. H.; Lee, J.; Lee, J. Y.; Han, J.; Choi, Y.; Kang, C. J., et al. High-Resolution Colloidal Quantum Dot Film Photolithography via Atomic Layer Deposition of ZnO. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2021, 13 (36), 43075–43084.
- (35) Lee, J. Y.; Kim, E. A.; Choi, Y.; Han, J.; Hahm, D.; Shin, D., et al. High-Resolution Multicolor Patterning of InP Quantum Dot Films by Atomic Layer Deposition of ZnO. *ACS Photonics* 2023, 10 (8), 2598–2607.
- (36) Bae, J. H.; Kim, S.; Ahn, J.; Shin, C.; Jung, B. K.; Lee, Y. M., et al. Acid-Base Reaction-Assisted Quantum Dot Patterning via Ligand Engineering and Photolithography. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2022, 14 (42), 47831–47840.
- (37) Park, J.; Ahn, J.; Oh, S.; Bae, J. H.; Seo, H.; Kim, W., et al. Surface Chemistry Stabilized Photolithography for High-Resolution Quantum Dot Electronic and Optoelectronic Devices. *Mater. Today* 2025, 90, 21–30.
- (38) Wang, Y.; Fedin, I.; Zhang, H.; Talapin, D. V. Direct Optical Lithography of Functional Inorganic Nanomaterials. *Science*. 2017, 357 (6349), 385–388.
- (39) Cho, H.; Pan, J. A.; Wu, H.; Lan, X.; Coropceanu, I.; Wang, Y., et al. Direct Optical Patterning of Quantum Dot Light-Emitting Diodes via In Situ Ligand Exchange. *Adv. Mater.* 2020, 32 (46), 1–8.
- (40) Yang, J.; Hahm, D.; Kim, K.; Rhee, S.; Lee, M.; Kim, S., et al. High-Resolution Patterning of Colloidal Quantum Dots via Non-Destructive, Light-Driven Ligand Crosslinking. *Nat. Commun.* 2020, 11 (1).
- (41) Yang, J.; Lee, M.; Park, S. Y.; Park, M.; Kim, J.; Sitapure, N., et al. Nondestructive Photopatterning of Heavy-Metal-Free Quantum Dots. *Adv. Mater.* 2022, 34 (43), 1–11.
- (42) Kim, J. M.; Jeong, S. J.; Kim, H. S.; Kim, D. E.; Yu, J. H.; Lee, S. H., et al. Direct Photo-Crosslinking Patterning for High-Performance 0D–2D Hybrid Photodetectors. *Adv. Opt. Mater.* 2024, 12 (35), 1–8.
- (43) Shin, S.; Kang, K.; Jang, H.; Gwak, N.; Kim, S.; Kim, T. A., et al. Ligand-Crosslinking Strategy for Efficient Quantum Dot Light-



- Emitting Diodes via Thiol-Ene Click Chemistry. *Small Methods* 2023, 7 (9), 1–9.
- (44) Maeng, S.; Park, S. J.; Lee, J.; Lee, H.; Choi, J.; Kang, J. K., et al. Direct Photocatalytic Patterning of Colloidal Emissive Nanomaterials. *Sci. Adv.* 2023, 9 (33), 1–11.
- (45) Yuan, L.; Chen, D.; He, K.; Xu, J.; Xu, K.; Hu, J., et al. Advancing Microarray Fabrication: One-Pot Synthesis and High-Resolution Patterning of UV-Crosslinkable Perovskite Quantum Dots. *Nano Res.* 2024, 17 (9), 8600–8609.
- (46) Hahm, D.; Lim, J.; Kim, H.; Shin, J. W.; Hwang, S.; Rhee, S., et al. Direct Patterning of Colloidal Quantum Dots with Adaptable Dual-Ligand Surface. *Nat. Nanotechnol.* 2022, 17 (9), 952–958.
- (47) Xiao, P.; Ma, J.; Zhang, Z.; Zou, Y.; Luo, H.; Guan, J., et al. Ligand-Engineered Direct Optical Lithography of Nanocrystals with Industrially Compatible Solvents. *ACS Nano* 2025, 19 (14), 14509–14520.
- (48) Lee, Y.; Shin, J.; Shin, S.; Kim, E. A.; Lee, J. Y.; Gwak, N., et al. Ring-Opening Polymerization of Surface Ligands Enables Versatile Optical Patterning and Form Factor Flexibility in Quantum Dot Assemblies. *Adv. Mater.* 2025, 37 (9).

Accepted