

# 디스플레이 효율 향상을 위한 반도체 양자막대 발광 구조의 설계와 응용

## Design Strategies and Applications of Semiconductor Nanorod Emitters for High-Efficiency Displays

김영준 · 김다흰 | Young Jun Kim · Dahin Kim

Department of Chemical Engineering, Center for Innovative Chemical Processes, Institute of Engineering, University of Seoul, Seoul 02504, Korea  
E-mail: dhkim23@uos.ac.kr

### 1. 서론

콜로이드 반도체 나노결정은 조절 가능한 발광 파장, 높은 발광 양자효율, 그리고 용액 공정 가능성으로 인해 현대 디스플레이의 핵심 발광 소재로 자리 잡고 있다.<sup>1-3</sup> 특히 0차원 양자점(QD)은 QD 향상 필름과 LED 발광층 등 다양한 디스플레이 기술에 성공적으로 적용되어 왔다. 그러나 구형 구조에 기인한 등방성 발광 특성은 LED에서의 낮은 광추출 효율과 LCD에서의 편광 손실이라는 본질적인 한계를 동반한다.<sup>4,5</sup>

이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로, 1차원 콜로이드 반도체 양자막대(NR)는 비등방성 발광 특성을 갖는 차세대 디스플레이 발광 플랫폼으로 주목받고 있다.<sup>6,7</sup> 양자막대의 길쭉한 형상은 전이 쌍극자를 장축 방향으로 정렬시키며, 이를 통해 LED에서의 광추출 효율 향상과 LCD에서의 편광 손실 저감을 가능하게 한다(그림 1).

최근에는 코어/셸 이중구조,<sup>8,9</sup> 조성 구배 합금 셸 설계,<sup>10-12</sup> 그리고 이중접합 기반 밴드 구조 공학<sup>13-15</sup>을 통해 양자막대의 발광 비등방성, 전하 수송, 비복사 재결합 억제, 그리고 소자 안정성을 정밀하게 제어함으로써, 고효율·고효율 양자막대 기반 디스플레이 구현을 가능하게 하는 핵심 설계 전략으로 자리잡고 있다. 이와 더불어, 양자막대의 방향성 발광 특성을 실제 소자 성능으로 효과적으로 연결하기 위해서는 전이 쌍극자의 배열을 제어하는 정렬 기술이 필수적이다.<sup>16,17</sup>

본 특집에서는 NR-LCD 및 NR-LED에서의 고효율 구현 메커니즘을 개괄하고, 디스플레이용 이중구조 양자막대의 구조 설계 전략과 정렬 및 패터닝 기술을 체계적으로 정리하여, 편광 LED를 포함한 차세대 디스플레이 응용으로의 확장 가능성을 조망하고자 한다.

### 2. 본론

#### 2.1 양자막대 기반 디스플레이의 구동원리

최근 디스플레이용 발광 소재 분야에서는 고효율과 높은 색 재현율을 달성하기 위해 광추출 효율 향상이 핵심 과제로 부상하고 있다. 기존의 구형 양자점은 등방성 발광 특성으로 인해 LCD나 LED 소자에 적용 시 광 손실이 불가피하였다.<sup>5</sup> 반면, 코어/셸 양자막대는 이방성 셸 구조로 인해 코어가 축방향과 횡방향으로 서로 다른 구속력과 응력을 받는다. 이로 인해 가전자대 밴드갭 에너지 상태인  $p_z$ 와  $p_{xy}$ 가 분리되며, 장축 방향

Author



**김영준**  
2025 서울시립대학교 화학공학과 (학사)  
2025-현재 서울시립대학교 화학공학과 (석사과정)



**김다흰**  
2012 한양대학교 화학공학과 (학사)  
2014 한국과학기술원 생명화학공학과 (석사)  
2018 한국과학기술원 생명화학공학과 (박사)  
2019-2020 MIT (Post-Doc.)  
2020-2023 Univ. Pennsylvania (Post-Doc.)  
2023-현재 서울시립대학교 화학공학과 조교수

편광 발광을 담당하는  $p_z$  상태가 우세하게 점유된다(그림 2a).<sup>8,18</sup> 이러한 구조적 특성은 디스플레이 소자에 적용되어 광추출 효율을 향상시키고 광학적 손실을 효과적으로 저감할 수 있다.

### 2.1.1 NR-LCD

LCD는 백라이트 유닛(BLU)에서 방출된 무편광의 빛이 편광판, 액정층, 색 필터, 그리고 애널라이저를 차례로 통과하면서 영상이 형성되는 구조를 갖는다(그림 2b).<sup>19</sup> 이 과정에서 첫 번째 편광판에서 50% 이상의 편광 손실이 발생하며, 이후 색 필터와 애널라이저를 거치면서 추가적인 광손실이 누적되어 생성된 광 중 일부만이 실제 화면 형성에 기여하게 된다. 이러한 구조적 특성은 LCD의 근본적인 광효율 한계를 초래한다.

양자막대 기반 광변환 필름은 BLU와 확산판 사이에 삽입되어 LCD의 광추출 한계를 개선하기 위한 대표적인 전략으로

활용되고 있다. 양자막대를 장축 방향으로 정렬할 경우 대면적에서 정렬 방향을 따라 선형 편광된 발광이 유도되기 때문에 편광판 투과율이 크게 향상된다. Abhishek K. Srivastava 교수 연구팀은 양자막대 기반 광변환 필름을 도입하여 첫 번째 편광판에서의 광 손실 비율을 약 55%에서 30% 수준으로 감소시키고, 최종 화면 휘도를 약 60% 이상 향상시킬 수 있음을 보고하였다. 또한 양자막대를 색 필터로 적용한 NR-LCD 구조에서도 유사한 수준의 밝기 향상이 확인되었다.<sup>20,21</sup>

### 2.1.2 NR-LED

전형적인 NR-LED는 투명 양극(ITO), 정공 주입·수송층(HIL/HTL), 양자막대 발광층(EML), 전자 수송층(ETL), 그리고 금속 음극으로 구성된 수직 적층 구조를 갖는다. 소자 구동 시 전극으로부터 주입된 전자와 정공은 양자막대 발광층에서 재결합하여 발광하며, 이때 각 기능층의 에너지 준위를 정렬하여 전하 주입 균형과 엑시톤 구속을 확보하는

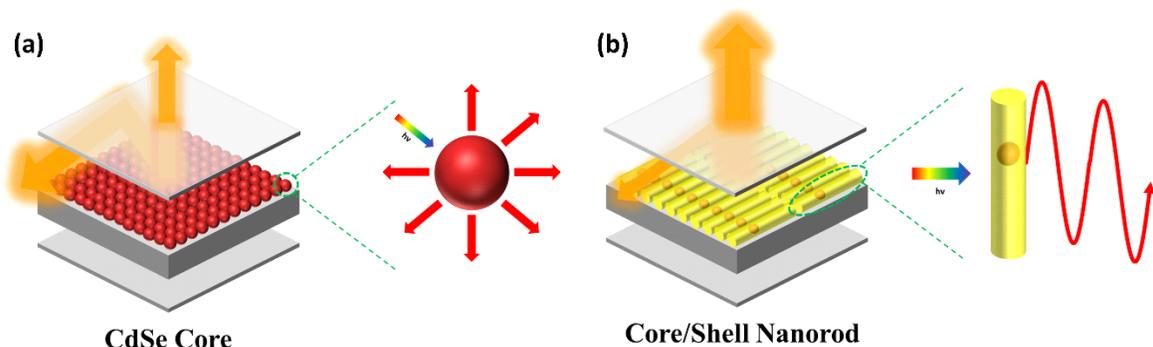


그림 1. (a) 구형 CdSe QD의 등방성 발광과 (b) 코어/셸 양자막대의 선형 편광 발광.

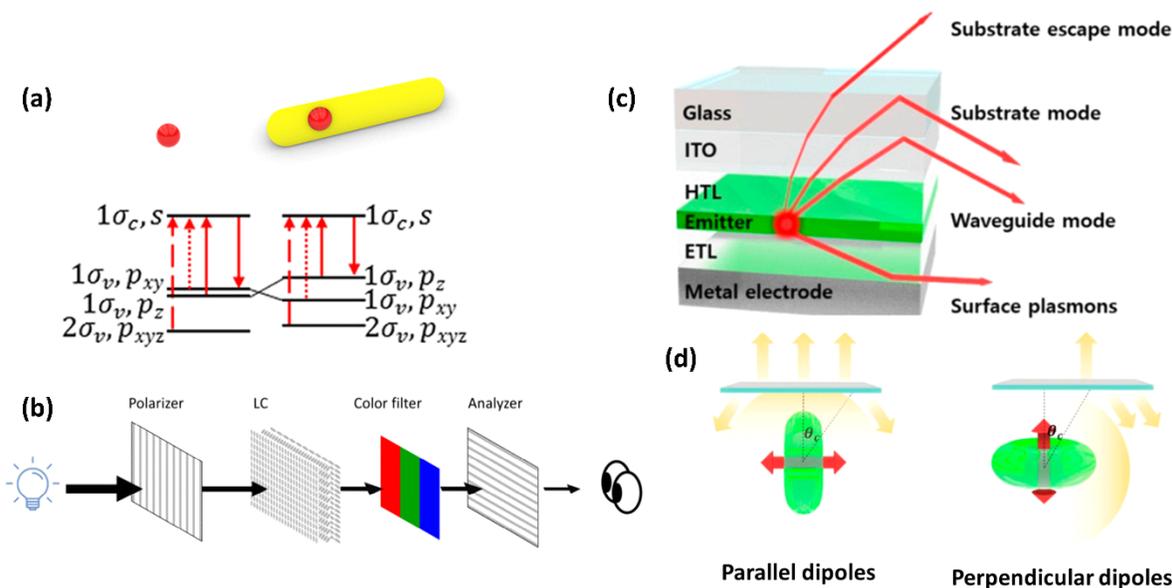


그림 2. (a) 구형 CdSe QD 코어와 코어/셸 양자막대의 밴드 엮기 미시 전자구조.<sup>8</sup> (b) NR-LCD의 광 진행 경로.<sup>19</sup> (c) LED 소자 내부의 다양한 광 손실 경로. (d) 쌍극자 배향 방향에 따른 발광 패턴 비교.<sup>16</sup>

것이 핵심이다. 양자막대 발광층은 PEDOT:PSS와 ZnO와 같은 수송층 사이에 1~3층 두께로 적층되어 효율적인 수직 전하 수송과 안정적인 발광원을 형성한다.<sup>12</sup>

QD는 무작위 배향된 전이 쌍극자에 의해 등방성 발광을 보이므로, 생성된 광자의 상당 부분이 웨이브가이드 모드, 기관 유도 모드, 금속 전극 계면의 표면 플라즈몬 모드와 같은 내부 손실 경로로 소모되어 광추출 효율이 제한된다(그림 2c).<sup>16</sup> 반면, 양자막대는 장축 방향으로 정렬된 전이 쌍극자를 갖는 비등방 발광체로서, 기관과 평행하게 배열될 경우 발광이 표면 법선 방향으로 집중되어 기관 탈출 모드의 결합이 크게 증가한다(그림 2d).<sup>16</sup> 이로 인해 내부 손실 모드의 결합이 억제되고, 별도의 광학 구조 없이도 광추출 효율을 효과적으로 향상시킬 수 있다. 이러한 결과는 NR-LED가 기존 QD 기반 LED 대비 본질적으로 우수한 광추출 특성을 갖는 발광 플랫폼임을 보여준다.<sup>22</sup>

## 2.2 반도체 양자막대 구조 설계

### 2.2.1 CdSe/CdS 코어/셸 양자막대

CdSe/CdS 계열의 코어/셸 양자막대는 코어의 형태와 위치, 그리고 셸의 구조에 따라 서로 다른 광학 특성을 보이며, 대표적인 구조로 Dot-in-Rod(DIR)과 Rod-in-Rod(RIR)가 있다.<sup>23,24</sup> DIR 구조는 구형 CdSe 코어에 막대형 CdS 셸이 성장한 형태로, 셸의 장축 방향 이방성 성장에 의해 코어가 비등방 압축 응력을 받아 장축 방향의 편광 발광을 나타낸다. 반면 RIR 구조는 코어 자체가 막대 형태로 성장한 뒤 셸이

형성되기 때문에, 코어 단계에서부터 강한 이방성을 가지며 DIR보다 높은 편광 특성을 보인다.

이러한 구조적 차이는 그림 3a에 제시된 전자구조 모식도를 통해 확인할 수 있다.<sup>8</sup> DIR 구조에서는 셸에 의해 인가되는 장축방향 압축응력으로 인해 구형 코어의 전자 준위가 분리되며, 그 결과  $p_z$  전이 성분이 상대적으로 강화된다. 반면 RIR 구조에서는 막대형 코어 고유의 전자구조에서 이미  $p_z$  성분이 우세하며, 이후 성장한 CdS 셸은 이러한 이방성을 더욱 강화한다. 이러한 차이는 밴드갭에서 측정된 형광 비등방성 값에서도 명확히 나타나며, RIR 구조가 DIR 대비 더 높은 편광도를 보이는 근거가 된다.

### 2.2.2 CdZnS 기반 조성 구배 합금 셸 성장

CdSe/CdS 양자막대는 구조적 설계를 통해 우수한 광학 특성을 구현할 수 있으나, 제한적인 밴드 정렬로 인해 전하 구속 및 편광 특성 향상에 한계가 존재한다. 이를 극복하기 위해 CdSe/Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>S/ZnS로 구성된 조성 구배 합금(graded alloy) 셸 구조가 제안되었다. 해당 구조에서는 CdSe 코어 주변에 Cd 함량이 높은 CdZnS 셸이 먼저 형성된 후, Zn 함량이 점진적으로 증가하는 CdZnS 및 ZnS 바깥 셸이 순차적으로 성장한다. 그림 3b와 3c에 나타난 바와 같이, 조성 구배 셸은 DIR 및 RIR 구조로 구현될 수 있으며, Cd 함량이 높은 CdZnS 셸은 CdSe 코어와의 격자 정합을 개선해 계면 장벽을 완만하게 만든다.<sup>10,11</sup> 반면 Zn 함량이 높은 바깥쪽 셸은 우수한 표면 패시베이션 효과를 제공하여 전하의 표면 손실을 억제하고,

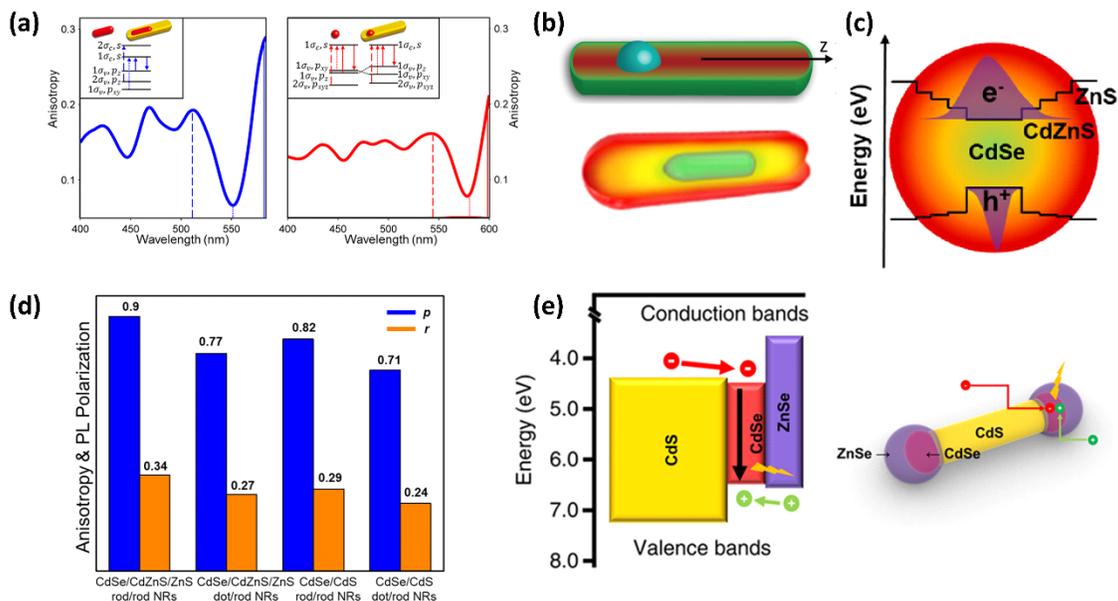


그림 3. (a) CdSe/CdS 코어/셸 구조에서 코어의 형태(좌: 막대형, 우: 구형)에 따라 달라지는 전자적 특성과 형광 비등방성 그래프.<sup>8</sup> (b) CdSe/CdZnS/ZnS 코어/셸 구조에서 코어의 형태에 따른 양자막대 구조. (c) CdSe/CdZnS/ZnS 구조에서 형성되는 전자-정공 구속 구조.<sup>10,11</sup> (d) 다양한 양자막대 구조의 선형 편광도(p) 및 밴드 갭 형광 비등방성 값(r).<sup>19</sup> (e) CdS/CdSe/ZnSe 이종접합 양자막대 구조에서의 비대칭 밴드 정렬과 선택적 전하 이동 경로 모식도.<sup>25</sup>

전자와 정공을 코어 방향으로 더욱 강하게 구속한다. 이러한 조성 구배는 전자 확산을 억제하고  $p_v$  성분이 우세한 전자구조를 강화함으로써 형광 비등방성 값( $r$ )과 선형 편광도( $p$ )를 모두 향상시킨다(그림 3d).<sup>18,19</sup> CdSe/Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>S/ZnS 양자막대는 CdSe/CdS 대비 두 지표가 모두 증가하며, 특히 RIR 구조에서 막대형 코어의 고유한 이방성과 조성 구배 효과가 결합되어 더 높은 편광 특성이 나타난다.

### 2.2.3 이종접합 양자막대

이종접합 양자막대는 전하 주입 효율과 발광 효율을 동시에 향상시키기 위해 설계된 구조이다. 일반적인 Type-1 코어/셸 구조는 높은 방사 재결합 효율을 가지지만 전하 주입에 한계가 있으며, Type-2 구조는 전하 분리에는 유리하나 광효율이 낮다는 문제가 있다. 이종접합 양자막대 구조는 CdSe/CdS, CdSe/ZnSe 이종접합을 하나의 양자막대에 통합함으로써 이러한 한계를 극복한다. 그림 3e에 나타난 바와 같이, 막대 내부의 비대칭 밴드 정렬은 CdS 측에서 전자, ZnSe 측에서 정공이 각각 CdSe 코어로 선택적으로 주입되도록 유도하여 효율적인 전하 분리와 재결합을 동시에 가능하게 한다. 이러한 선택적 전하 이동 경로는 기존 코어/셸 구조에서는 구현하기 어려운 특징이다.<sup>14,25</sup>

이종접합 양자막대의 광효율과 전하 주입 특성은 CdS 막대 길이, CdSe/CdS 계면의 전도대 정렬 차이, 그리고 ZnSe 성장 과정에서의 온도 상승 속도에 의해 크게 좌우된다.<sup>15</sup> CdS 막대가 짧을수록 전하가 CdSe 인근에 국소화되어 방사 재결합이 촉진되며, 큰 CdSe/CdS 전도대 정렬 차이 또한 전자 구속을 강화해 높은 양자효율을 유도한다. ZnSe 성장 중 빠른 온도 상승은 CdSe 재핵화를 억제하고 계면 결함을 감소시켜 비방사 손실을 효과적으로 줄인다.<sup>26</sup>

## 2.3 양자막대의 정렬 및 패터닝 전략

### 2.3.1 LCD용 양자막대 정렬 및 패터닝 기술

LCD에서 양자막대의 정렬은 편광 손실을 최소화하기 위해 필수적이며, 공정 호환성, 대면적 균일성, 패터닝 가능성을 동시에 만족하는 정렬 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>21,30-32</sup> 이 가운데 그림 4a에 제시된 azo dye(SD1) 기반 광배향 기술은 LCD용 양자막대 정렬에 유용한 방법으로 주목받고 있다.<sup>20</sup> SD1 분자는 광이성질화에 의해 편광 방향에 수직인 방향으로 재배향되며, 형성된 배향층 위에 스핀코팅된 액정 고분자(LCP)와 양자막대 혼합물은 SD1의 배향을 따라 정렬된다. 이후 광중합을 통해 균일한 배향성을 갖는 양자막대 고분자 필름이 형성된다.

광배향 기술은 빛의 편광 방향과 조사 영역을 제어함으로써 양자막대의 정렬 방향을 선택적으로 부여할 수 있다는 장점을 가진다. 그림 4b와 같이 포토마스크를 이용한 두 단계의 편광 조사 공정을 통해 서로 다른 방향을 갖는 이방성 정렬 패턴을 구현할 수 있으며, 광중합 이후 픽셀 단위에서 정렬 방향이 조절된 양자막대 패턴이 안정적으로 형성된다.<sup>27</sup> Andrey Rogach 교수 연구팀은 본 기술을 이용해 1D 및 2D 마이크로 패턴에서 양자막대의 정렬을 구현하였으며, 수  $\mu\text{m}$  수준의 미세 도메인에서도 우수한 정렬 유지와 뚜렷한 편광 대비 특성을 보고하였다. 이러한 결과는 광배향 기반 정렬 기술이 LCD용 고해상도 양자막대 패터닝에 높은 잠재력을 지님을 보여준다.

### 2.3.2 LED용 양자막대 정렬 및 패터닝 기술

LED에서는 LCD와 달리 편광판이 필수 구성 요소가 아니므로, 양자막대의 한 방향 정렬이 기본적인 구동 조건은 아니다. 양자막대가 기판과 평행하게 배열되어 누워있기만 해도

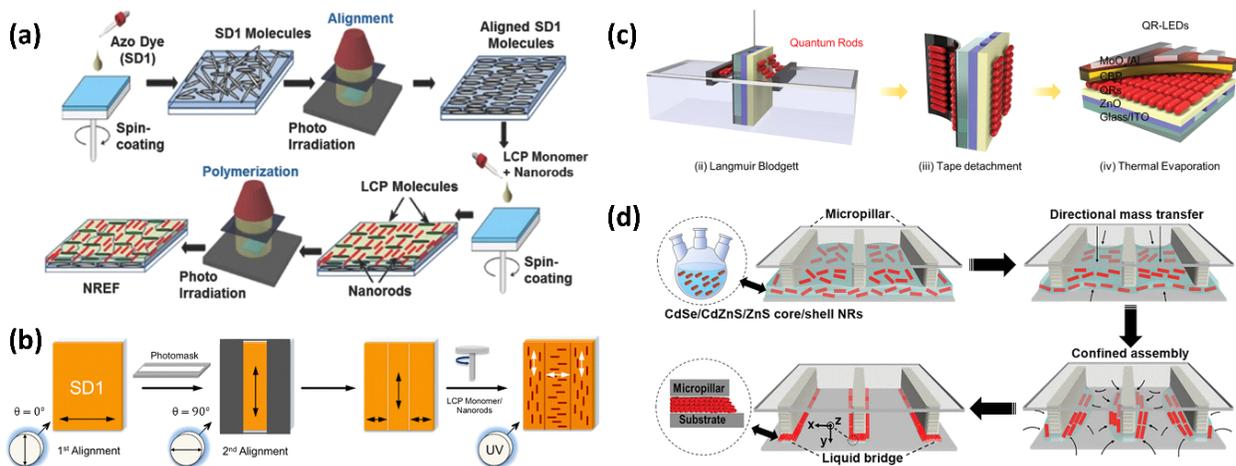


그림 4. (a) Azo dye(SD1) 광배향을 기반으로 한 양자막대 정렬 방법.<sup>20</sup> (b) 포토마스크와 편광 제어를 이용한 영역별 패턴 형성방법.<sup>27</sup> (c) Langmuir-Blodgett 정렬 방법을 통한 고정렬 필름과 NR-LED 제작방법.<sup>28</sup> (d) 마이크로 구조와 모세관 효과를 활용한 제한 공간 조립 기반 미세 정렬 패터닝 방법.<sup>29</sup>

전이 쌍극자가 평면 내에 정렬되어 평면의 법선 방향 광추출 효율을 크게 향상시킬 수 있다.<sup>16</sup>

한편, 양자막대를 한 방향으로 정렬된 발광층으로 구현할 경우, 장축 방향으로 정렬된 전이 쌍극자에 의해 광추출 효율 향상과 동시에 대면적 선형 편광 발광이 가능해진다. 이러한 편광 발광은 발광의 방향과 위상을 정밀하게 제어할 수 있어, 투명 디스플레이, 홀로그램 디스플레이, 그리고 AR/VR과 같은 차세대 공간 광학 시스템에서 핵심 광원 플랫폼으로 적극적으로 활용될 수 있다.<sup>33,34</sup> 이러한 정렬 구조는 절연 매트릭스와 같이 전기적 연결을 저해할 수 있는 매질의 도움 없이 구현될 수 있어야 한다는 점이 필수적인 요구 조건으로 제시되고 있다.

Langmuir-Blodgett(LB) 정렬은 물-공기 계면에서 형성된 양자막대 단층을 기판으로 전사하는 방식으로, 단층 수준의 두께 제어와 높은 정렬도를 구현할 수 있다(그림 4c).<sup>28</sup> 노정균 교수 연구팀은 LB 공정을 이용해 고정렬 양자막대 필름을 제작하고 이를 NR-LED 발광층에 적용하여, 전계발광에서 뚜렷한 편광 특성을 확인하였다. 이는 LB 정렬 기술이 고효율 NR-LED 구현에 효과적인 전략임을 보여준다.

이와 더불어, 오프센터 스핀 코팅 기반 전단 유도 정렬 기법은 회전 중심에서 벗어난 기판 위치에서 발생하는 전단 흐름을 이용해 양자막대의 장축을 일정 방향으로 유도하는 방법이다. 특히, 용액 공정만으로도 다층 양자막대 발광층에서 높은 정렬도를 확보할 수 있어 대면적 공정 호환성과 적층 확장성이 우수한 대안적 접근법으로 주목받고 있다.<sup>35</sup>

한편, NR-LED의 픽셀 구현을 위해서는 정렬과 함께 공간적 패터닝 기술이 요구된다. 그림 4d에 제시된 마이크로 필러 사이의 제한 공간 조립 방식은 증발 유도 흐름과 모세관 효과를 이용하여, 양자막대를 제한된 공간 내에서 자발적으로 정렬시키는 방법이다.<sup>29,36</sup> Hongbo Li 교수 연구팀은 이 방식을 통해 다양한 형태의 마이크로 도메인에서 균일한 양자막대 정렬 패턴을 구현하였으며, 이는 NR-LED에 적합한 미세 패터닝 전략으로 평가된다.

### 3. 결론

본 특집에서는 디스플레이 소자의 효율 향상을 위한 반도체 양자막대 발광체의 구조 설계 원리와 연구 동향을 고찰하였다. 구형 양자점의 등방성 발광 한계를 극복하기 위한 대안으로서, 양자막대의 구조적 이방성과 편광 발광 특성이 LCD 및 LED 소자에서 광추출 효율을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 확인하였다. DIR, RIR, 조성 구배 합금 셀 구조 및 이중접합 양자막대와 같은 구조 설계 전략은 전자구조와 전하 구속 특성을 제어함으로써 광학적 비등방성과 발광 효율을 동시에 향상시키는 핵심 요소로 작용한다. 또한

양자막대의 정렬과 패터닝 기술은 LCD의 편광 손실 저감과 LED의 광추출 효율 및 발광 패턴 제어를 가능하게 하여, 실제 디스플레이 소자에 적용을 위한 중요한 공정 기반을 제공한다. 향후 대면적 공정 안정성 확보 및 장시간 구동 신뢰성 향상, 친환경 소재의 활용, 청색 발광으로의 확장이 병행된다면, 양자막대 기반 발광 구조는 차세대 고효율 디스플레이 기술로서 높은 활용 가능성을 가질 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. Y. Shirasaki, G. J. Supran, M. G. Bawendi, and V. Bulović, *Nat. Photonics*, **7**, 13 (2013).
2. P. O. Anikeeva, J. E. Halpert, M. G. Bawendi, and V. Bulović, *Nano Lett.*, **9**, 2532 (2009).
3. B. S. Mashford, M. Stevenson, Z. Popovic, C. Hamilton, Z. Zhou, C. Breen, J. Steckel, V. Bulović, M. Bawendi, and S. Coe-Sullivan, *Nat. Photonics*, **7**, 407 (2013).
4. H. Xu, J. Song, P. Zhou, Y. Song, J. Xu, H. Shen, S. Fang, Y. Gao, Z. Zuo, and J. M. Pina, *Nat. Photonics*, **18**, 186 (2024).
5. R. Zhu, Z. Luo, and S.-T. Wu, *Opt. Express*, **22**, A1783 (2014).
6. S. K. Gupta, M. F. Prodanov, W. Zhang, V. V. Vashchenko, T. Dudka, A. L. Rogach, and A. K. Srivastava, *Nanoscale*, **11**, 20837 (2019).
7. M. F. Prodanov, C. Kang, S. K. Gupta, V. V. Vashchenko, Y. Li, M. Qin, X. Lu, and A. K. Srivastava, *Nano Res.*, **15**, 5392 (2022).
8. I. Hadar, G. B. Hitin, A. Sitt, A. Faust, and U. Banin, *J. Phys. Chem. Lett.*, **4**, 502 (2013).
9. L. Carbone, C. Nobile, M. De Giorgi, F. D. Sala, G. Morello, P. Pompa, M. Hytch, E. Snoeck, A. Fiore, and R. Franchini, *Nano Lett.*, **7**, 2942 (2007).
10. I. Hadar, J. P. Philbin, Y. E. Panfil, S. Neyshtadt, I. Lieberman, H. Eshet, S. Lazar, E. Rabani, and U. Banin, *Nano Lett.*, **17**, 2524 (2017).
11. Y. Zeng, S. Ma, F. Cao, W. Chen, Q. Wang, G. Jin, J. Wei, F. Liu, L. Manna, and X. Yang, *Nano Lett.*, **24**, 5647 (2024).
12. Y. Zeng, X. Liu, Y. Liu, W. Chen, F. Liu, and H. Li, *Adv. Mater.*, **36**, 2310705 (2024).
13. N. Oh, S. Nam, Y. Zhai, K. Deshpande, P. Trefonas, and M. Shim, *Nat. Commun.*, **5**, 3642 (2014).
14. N. Oh, B. H. Kim, S.-Y. Cho, S. Nam, S. P. Rogers, Y. Jiang, J. C. Flanagan, Y. Zhai, J.-H. Kim, and M. Shim, *Science*, **355**, 616 (2017).
15. G. A. Drake, J. C. Flanagan, and M. Shim, *J. Chem. Phys.*, **151**, 134701 (2019).
16. W. D. Kim, D. Kim, D.-E. Yoon, H. Lee, J. Lim, W. K. Bae, and D. C. Lee, *Chem. Mater.*, **31**, 3066 (2019).
17. W. Brütting, J. Frischeisen, T. D. Schmidt, B. J. Scholz, and C. Mayr, *Phys. Status Solidi A*, **210**, 44 (2013).
18. J. Planelles, F. Rajadell, and J. I. Climente, *J. Phys. Chem.*

- C*, **120**, 27724 (2016).
19. Y. J. Kim, Y. Lee, and D. Kim, *ACS Appl. Eng. Mater.*, **3**, 3690 (2025).
  20. A. K. Srivastava, W. Zhang, J. Schneider, A. L. Rogach, V. G. Chigrinov, and H.-S. Kwok, *Adv. Mater.*, **29**, 1701091 (2017).
  21. J. Song, M. F. Prodanov, Y. Gao, C. Kang, D. Bhadra, Y. Cheng, Z. Liao, K. Mallem, V. Swaminathan, and V. V. Vashchenko, *Adv. Sci.*, **12**, 2414316 (2025).
  22. G. Gomard, J. B. Preinfalk, A. Egel, and U. Lemmer, *J. Photonics Energy*, **6**, 030901 (2016).
  23. A. Sitt, F. D. Sala, G. Menagen, and U. Banin, *Nano Lett.*, **9**, 3470 (2009).
  24. K. Wu, L. J. Hill, J. Chen, J. R. McBride, N. G. Pavlopoulos, N. E. Richey, J. Pyun, and T. Lian, *ACS Nano*, **9**, 4591 (2015).
  25. Y. Jiang, N. Oh, and M. Shim, *ACS Photonics*, **3**, 1862 (2016).
  26. N. Oh and M. Shim, *J. Am. Chem. Soc.*, **138**, 10444 (2016).
  27. J. Schneider, W. Zhang, A. K. Srivastava, V. G. Chigrinov, H.-S. Kwok, and A. L. Rogach, *Nano Lett.*, **17**, 3133 (2017).
  28. S. Rhee, D. Jung, D. Kim, D. C. Lee, C. Lee, and J. Roh, *Small*, **17**, 2101204 (2021).
  29. Y. Zeng, H. Su, Y. Liu, W. Chen, F. Liu, H. Gao, Y. Wu, L. Manna, and H. Li, *Adv. Funct. Mater.*, **33**, 2306091 (2023).
  30. P. D. Cunningham, J. B. Souza Jr., I. Fedin, C. She, B. Lee, and D. V. Talapin, *ACS Nano*, **10**, 5769 (2016).
  31. M. Hasegawa and Y. Hirayama, *J. Soc. Inf. Display*, **24**, 286 (2016).
  32. L. Hartmann, D. Djurado, I. Florea, J.-F. Legrand, A. Fiore, P. Reiss, S. Doyle, A. Vorobiev, S. Pouget, and F. Chandezon, *Macromolecules*, **46**, 6177 (2013).
  33. D. Wang, Y.-L. Li, X.-R. Zheng, R.-N. Ji, X. Xie, K. Song, F.-C. Lin, N.-N. Li, Z. Jiang, and C. Liu, *Nat. Commun.*, **15**, 8242 (2024).
  34. Y. Ding, Y. Gu, Q. Yang, Z. Yang, Y. Huang, Y. Weng, Y. Zhang, and S.-T. Wu, *Light Sci. Appl.*, **13**, 185 (2024).
  35. H. Jang, D. Kim, J. Y. Woo, Y. K. Lee, W. K. Bae, J. Kim, Y.-S. Park, and D. C. Lee, *Appl. Surf. Sci.*, **614**, 156160 (2023).
  36. J. Zhang, X. Li, Y. Liu, J. Feng, J. Zhao, Y. Geng, H. Gao, T. Wang, W. Yang, and L. Jiang, *Adv. Mater.*, **34**, 2202119 (2022).