

페로브스카이트 기반 원편광 소재 최신 연구 동향

Research Trends in Circularly Polarized Luminescence Materials Based on Perovskites

권대성 · 이승진 | Dae-Seong Kwon · Seungjin Lee

Department of Energy Engineering, Korea Institute of Energy Technology,
Rm. 210, Research Building 1, 21 KENTECH-gil, Naju-si, Jeonnam 58330, Korea
E-mail: sjlee@kentech.ac.kr

1. 서론

원편광발광(circularly polarized luminescence, CPL)은 발광 소재가 좌·우 원편광을 비대칭적으로 방출하는 현상으로, 3D 디스플레이, 증강·가상현실(AR/VR), 광정보 암호화, 스핀 광전자소자 등 차세대 광전자 응용을 위한 핵심 광학 특성으로 주목받고 있다. 기존의 CPL 구현 방식은 편광 필터나 위상 지연 소자와 같은 외부 광학 부품에 의존해 왔으나, 이는 광손실과 소자 구조 복잡성이라는 근본적인 한계를 지닌다. 이러한 배경에서 발광 소재 자체가 원편광을 직접 방출할 수 있는 재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

금속 할라이드 페로브스카이트는 높은 발광양자효율(PLQY), 조성 및 차원에 따른 밴드갭 조절 용이성, 용액 공정 기반의 우수한 제조 확장성 등의 장점으로 차세대 발광 소재로 각광받고 있다. 최근에는 이러한 페로브스카이트의 구조적·전자적 유연성을 활용하여 카이랄성(chirality)을 도입한 CPL 구현이 보고되면서 CPL 분야에서도 핵심 소재로 부상하고 있다. 특히 카이랄 유기 양이온의 도입, 표면 리간드 엔지니어링, 차원 조절에 따른 구조 비대칭성 강화 전략은 우수한 발광 효율과 높은 원편광 비대칭 계수(g_{lum})를 모두 달성하기 위한 접근법으로 보고되고 있다.^{1,2}

동시에 페로브스카이트 기반 CPL 연구는 단순한 광학 활성 발현을 넘어, 발광 효율과 원편광 세기 간의 상충 관계, 카이랄성 기원의 물리적 기작(전기·자기 쌍극자 전이 기여), 박막 및 소자 상태에서의 CPL 유지성 등 보다 근본적이면서도 응용 지향적인 문제로 연구 범위가 확장되고 있다. 특히 최근에는 용액 상태에 국한되었던 연구를 넘어 박막, 나아가 전기 구동형 원편광발광 소자로 구현이 보고되며, 산업적 활용 가능성에 대한 논의도 본격화되고 있다.

본 글에서는 최근 수년간 보고된 페로브스카이트 원편광 소재 연구의 주요 흐름을 중심으로, 카이랄성 도입 전략과 구조 설계, 원편광 성능 지표(CPL intensity, g_{lum}) 및 물리적 메커니즘, 소자 응용으로의 확장 동향을 정리하고자 한다. 이를 통해 페로브스카이트 기반 CPL 소재가 지닌 현재의 한계와 향후 연구 방향을 조망하고, 차세대 원편광 소자 개발을 위한 핵심 설계 전략을 논의하고자 한다.

2. 본론

2.1 CPL 성능 지표 및 물리적 메커니즘

원형이색성(circular dichroism, CD)은 물질이 좌·우 원형 편광 빛의 흡수 세기가 다른 현상을 나타내며, 카이랄

Author



권대성

2023 부경대학교 신소재시스템공학과 (학사)
2025 부경대학교 신소재시스템공학과 (석사)
2025-현재 한국에너지공과대학교 에너지공학부 (박사과정)



이승진

2013 울산과학기술원 신소재공학과 (학사)
2018 울산과학기술원 신소재공학과 (박사)
2019-2021 토론토대학교 (Post-Doc.)
(Supervisor: Edward H. Sargent)
2021-현재 한국에너지공과대학교 에너지공학부 조교수

광학적(chiroptical) 지표로 사용된다. CD 스펙트럼에서의 이색적 흡수 차이는 전이의 회전 강도(rotational strength)와 직접 연관되며, 구조적 비대칭성과 스핀-선택성 전이의 존재를 반영한다. CD는 흡수 상태의 비대칭성을 측정하는 반면 CPL은 발광 상태의 비대칭성을 나타낸다. CD의 최적화는 후술하는 CPL의 g_{lum} 향상과 상호 연관되어 있어, 재료 설계 시 중요한 지표로 활용된다.³

CPL의 광학적 성능은 일반적으로 원편광 발광 강도와 비대칭 계수(g_{lum})로 평가된다. g_{lum} 은 좌·우 원형 편광 발광 강도의 차이를 총 발광 강도로 정규화한 값으로 정의되며, 수식은 다음과 같다.⁴

$$g_{lum} = 2(I_L - I_R) / (I_L + I_R)$$

여기서 I_L 과 I_R 은 각각 좌·우 원형 편광 발광의 강도이다. g_{lum} 의 이론적 최대값은 ± 2 이며, ± 2 에 가까울수록 순수한 원편광이다.

아래 첨자가 PL(photoluminescence)의 경우 광발광, EL(electroluminescence)의 경우 전계발광을 의미한다. 대부분의 페로브스카이트 기반 CPL 물질은 10^{-4} 에서 10^{-3} 범위의 g_{lum} 에 머물며, 이는 소재의 비대칭성이 상대적으로 작거나 전기 다이폴 전이의 기여가 큰 경우에 나타난다. 최근 페로브스카이트 연구에서는 g_{lum} 이 10^{-3} 에서 10^{-2} 로 보고되며, 이는 일반적 유기 CPL 시스템과 비교해도 경쟁력 있는 값이다. 예컨대 용매 처리 및 2D 카이랄 페로브스카이트 양자점 복합체에서는 g_{lum} 이 약 6.9×10^{-3} 까지 증가함이 보고되었고, 이는 격자 왜곡을 통해 비대칭성이 강화된 결과로 해석된다.⁵

또한 CPL 강도 자체는 단순히 g_{lum} 로만 설명될 수 없으며, 광량과 발광양자효율을 함께 고려한다. 높은 g_{lum} 을 달성 하더라도 발광 강도가 낮으면 실제 광원으로서 활용이 제한 되기 때문이다.

CPL이 발현되는 물리적 기작은 보통 전이 다이폴 간섭, spin-selective 전하 재결합, 카이랄 유도 스핀 선택성(chiral induced spin selectivity, CISS) 효과, 구조적 비대칭 유도 메커니즘 등으로 설명된다.

CPL의 핵심은 전기 쌍극자(electric dipole) 전이와 자기 쌍극자(magnetic dipole) 전이의 상호작용으로, 이는 전자-구조 비대칭성 유도 시 중요한 역할을 한다. 일반적인 광발광에서는 전기 쌍극자 전이가 지배적이지만, CPL에서는 비대칭 전자 구조로 인해 자기 쌍극자 전이 기여가 증폭되며, 이는 비대칭 발광을 가능하게 한다. 이는 CD 측정에서의 회전 강도가 전기 쌍극자 연산자와 자기 쌍극자 연산자의 내적에 비례하는 물리적 기작에서 이해할 수 있다. 즉 CPL 성능은 전기·자기 쌍극자 전이의 결합이 지배적으로 기여한다. 스핀 선택적 전하 재결합은 카이랄성 도입 시 전하가 스핀 편극(spín polarization)

상태로 재결합하는 CISS 현상이 CPL 강화에 영향을 미칠 수 있는 것으로 여겨진다. 이 효과는 카이랄 구조가 전하 운반자 선택성을 유도하며 재결합 시 특정 스핀 상태를 우선시함으로써 비대칭 CPL 방출을 촉진할 수 있는 것으로 여겨진다. 이 과정은 스핀-궤도 결합(spin-orbit coupling)과 구조적 비대칭성으로 인해 더욱 강화된다.

이어서 구조적 비대칭 유도 메커니즘(격자 왜곡, 표면 왜곡)은 카이랄 리간드 도입에 따라 단순히 광학 활성만을 부여하는 것이 아닌 표면 트랩 상태를 억제하여 PLQY를 동시에 향상시킬 수 있는 요소임을 알 수 있다.¹²

그 외 카이랄 결함(chiral defect) 및 국소 배위 환경을 통해 CPL의 기원을 제공할 수 있는 사례도 있는 등 CPL 신호 생성에 대한 다양한 기작들이 연구되고 있다.⁶

2.2 원편광발광 소재 전략

2.2.1 카이랄 표면 리간드 설계

앞서 소개된 기작들을 바탕으로, 페로브스카이트 기반 CPL 소재에서 카이랄성의 도입은 구조적 비대칭성을 인위적으로 부여함으로써 전자 전이의 선택성을 조절하는 전략이 핵심으로 자리 잡고 있다. 가장 보편적인 접근으로서 카이랄 유기 리간드 또는 카이랄 유기 양이온을 페로브스카이트 결정 구조 혹은 표면에 도입하는 방식은 결정 대칭성의 붕괴(symmetry breaking)를 유도하고 전기·자기 쌍극자 전이 간의 불균형을 발생시켜 CPL 신호를 생성 및 극대화하는 것을 목표로 한다.^{7,8}

그림 1과 같이 초기에는 주로 카이랄 아민 기반 리간드가

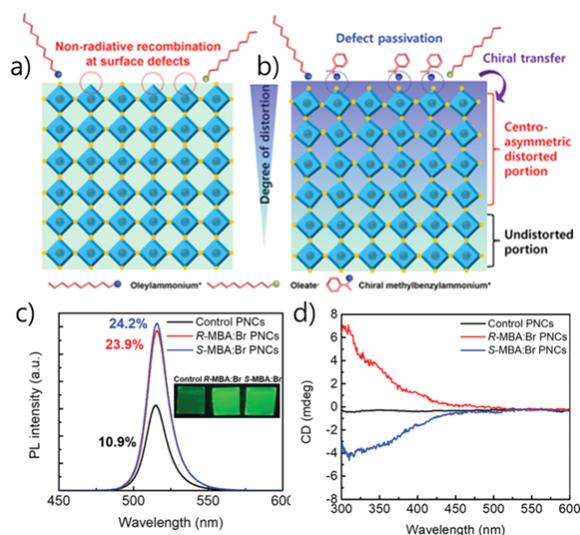


그림 1. 카이랄 표면 리간드가 페로브스카이트 나노결정 표면에 중심 비대칭 왜곡을 유도하고 표면 결함을 비활성화하는 기작. (a) 카이랄 리간드가 없는 콜로이드성 페로브스카이트 나노 결정과 (b) 카이랄 리간드로 표면 기능화된 콜로이드성 페로브스카이트 나노 결정의 카이랄 전달 메커니즘에 대한 모식도. (c) PL 스펙트럼, PLQY 값 및 발광 사진, (d) CD 스펙트럼.⁸

페로브스카이트 나노결정 표면에 도입되어 부동태화 (passivation)를 유도, CPL을 구현하였다. 이러한 방식을 도입한 보고들 중에서는 발광 효율 저하 없이 g_{PL} 이 약 10^{-2} 수준, g_{EL} 이 약 10^{-3} 수준의 안정적인 CPL을 구현할 수 있음이 보고되었고, 이들 연구는 카이랄 리간드가 단순히 광학 활성만을 부여하는 것이 아니라, 표면 트랩 상태를 억제하여 PLQY를 동시에 향상시킬 수 있음을 보여주었다.^{9,10}

2.2.2 카이랄 양이온 스페이서를 통한 저차원 구조 설계

최근에는 2D 또는 quasi-2D 구조를 활용한 카이랄성 증폭 전략이 주목받고 있다.

Ruddlesden-Popper 구조에서 부피가 큰 카이랄 유기 양이온을 스페이서로 사용하면, 무기층 간의 회전 및 틀어짐 (octahedral tilting)이 강화되며, 이로 인해 구조적 비대칭성이 본질적으로 증폭된다.

이러한 2D 카이랄 페로브스카이트는 3D 대비 상대적으로 큰 g_{EL} ($>10^{-3}$)을 나타내며, CISS 효과 유도에서도 더욱 유리하다는 보고가 있다.

특히 용액 공정을 거쳐 박막 상태에서도 CPL 특성이 유지된다는 점에서 소자 응용 측면에서 중요한 진전을 이루었다.^{11,12}

2.2.3 카이랄 구조 왜곡 및 외부 처리 전략

한편, 카이랄성의 전달(chirality transfer)을 극대화하기 위한 나노구조 설계도 활발히 연구되고 있다. 그림 3과 같이 카이랄 리간드 처리 후 페로브스카이트 양자점이 나선형 나노와이어 (helical nanowire) 또는 비틀린 초구조체 (twisted superstructure)로 자가조립되는 현상이 보고되었으며, 단일 나노결정보다 큰 CPL 응답이 관찰된다. 이는 개별 나노결정에서 유도된 약한 카이랄성이 집단적 배열을 통해 증폭되는 효과로 해석되며, 구조적 계층성이 CPL 성능을 좌우하는 핵심 요소임을 시사한다.¹³

더욱이 카이랄 분자와 결합된 표면에서의 국소적인 라쉬바 분할(Rashba splitting) 또는 스핀 선택적 재결합 (spin-selective

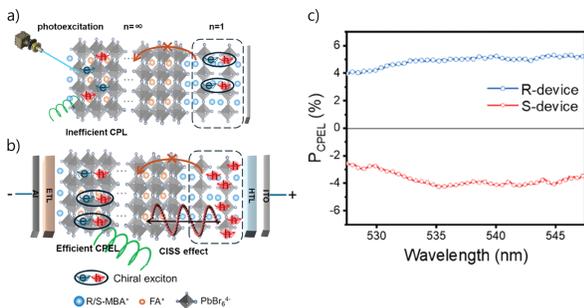


그림 2. 카이랄 준 2차원 페로브스카이트의 개략도. (a) 광발광 및 (b) 전계발광, (c) 스핀 LED의 원편광전계발광효율(P_{CPEL}).¹¹

recombination)이 이와 연관된 메커니즘으로 제시되고 있다.

구조 왜곡 및 외부 처리를 통한 비대칭성 부여 전략도 제시되고 있다. 이는 용매 조절, 후처리, 혼합 할라이드 조성 제어 등을 통해 페로브스카이트 격자 내 국소 비대칭성을 강화하여 CPL 신호가 유도되거나 기존 CPL 특성이 현저히 증폭되는 사례가 보고되고 있다.¹⁴⁻¹⁶

2.3 소자 응용으로의 확장 동향

페로브스카이트 기반 CPL 소재의 연구는 초기의 분자 및 나노결정 수준에서 이루어지는 광학 특성 검증 및 평가를 넘어, 전기적 신호 변환 및 구동이 가능한 소자 응용 단계로 확장되고 있다. 특히 높은 발광 효율, 강한 스핀-궤도 결합 그리고 카이랄 구조 도입의 유연성이라는 페로브스카이트의 고유한 장점은 CPL을 단순한 광학 특성으로 그치지 않고 유용한 소자로 구현되기 위한 핵심적인 역할을 하고 있다.

첫번째로 응용을 보인 분야는 원편광 광검출(CPL photodetection) 소자이다.^{17,18} 기존 CPL 연구가 CD 또는 PL 기반의 정적 측정에 머물렀다면, 최근 연구들은 좌·우 원편광에 따라 서로 다른 전기적 응답을 생성하는 능동 소자를 구현하는 데 집중하고 있다. 카이랄 페로브스카이트를

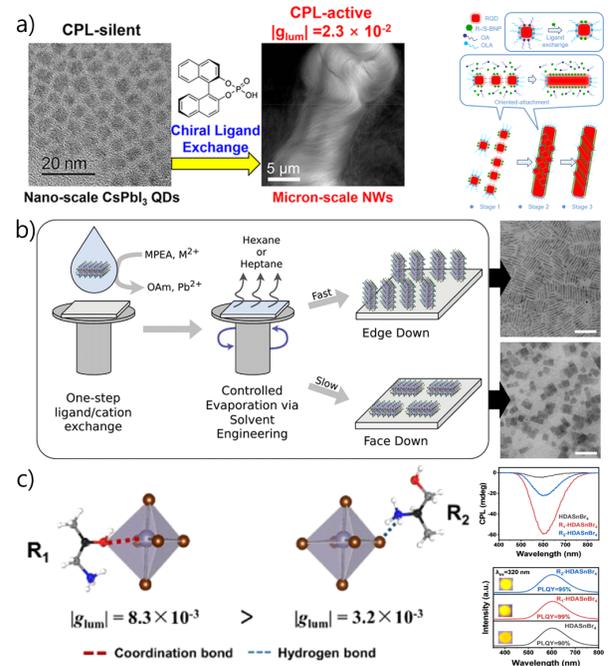


그림 3. (a) 나노와이어 표면에 CsPbI₃ 양자점이 부착되어 나선형 패턴을 형성. (a) 카이랄 리간드 교환을 통해 형성된 마이크로 스케일의 나노 와이어 제작 및 CPL 활성화 발생에 대한 개략도. (b) 리간드 교환 과정 및 방향성 부착을 통한 나선형 CsPbI₃ 나노와이어 형성 과정의 모식도.¹³ 교환 및 NPL 배향 초격자 필름 제작 공정의 개략도 및 NPL의 에지다운 배향과 페이스다운으로 배향된 초격자의 TEM 이미지(스케일 바: 50 nm).¹⁵ (c) 좌상: R1 리간드, R2 리간드 및 무기 팔면체의 조합에 대한 개략도와 적용된 리간드별 CPL 강도 차이 및 시료의 발광 사진과 PLQY.¹⁶

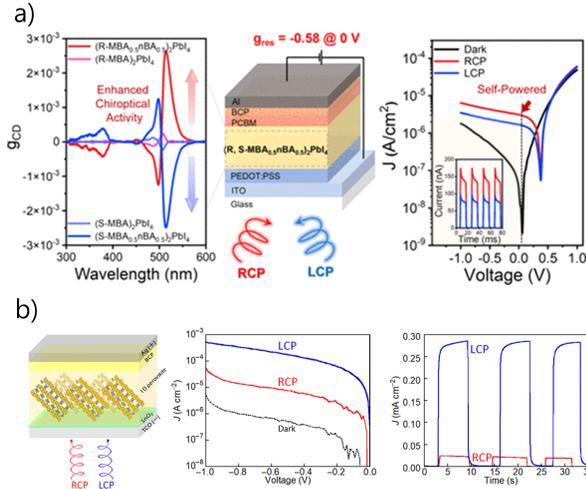


그림 4. (a) 2차원 페로브스카이트 기반 RCP 및 LCP 광 검출의 개략도. 비카이랄 양이온 도입을 통해 개선된 카이랄성을 바탕으로 향상된 흡수 이방성 인자 및 검출 감도 향상.¹⁷ (b) 나선형 1D 페로브스카이트 기반 광검출기의 개략도. LCP 및 RCP 광 조사 조건에서 (R-NEA)PbI₃ 소자의 J-V 곡선과 인가 전압 -0.5 V에서 1.0 mW cm⁻² (395 nm)의 단색광 조사 시 광응답의 시간 경과 그래프. 응답 구별도 및 감도 향상.¹⁸

활성층으로 사용하는 CPL 검출 소자에서는, 입사된 원편광 빛이 스핀 선택적인 전하 생성 및 수송 과정을 거쳐 비대칭적인 광전류로 변환된다. 이는 좌/우로 구분된 원편광의 응답(response) 구별도를 g_{res} 로 표현하고, 이는 CD나 g_{lum} 과는 다른, 소자 수준에서 정의되는 CPL 성능 지표로 자리 잡고 있다. 현재는 0.5 이상의 높은 응답 구분성을 보인 연구가 보고되어 있으며,¹⁷ 이는 종래의 응답 구분도보다 현저히 높은 수치이다. 이러한 성능 향상은 단순한 흡수 차이 때문이 아니라, 카이랄 구조의 설계를 바탕으로 비대칭성을 증폭시킨 결과로 해석된다. 즉, CPL 검출 소자는 페로브스카이트 기반 CPL 특성을 전하·스핀 제어와 더불어 재료의 구조와 유기적으로 얽힌 현상으로 이해하는 대표적인 예라 할 수 있다.

두번째로, 전기적으로 구동되는 원편광발광 소자(CP-LED 또는 spin-LED)이다. 이 경우 소자는 편광을 보조할 수 있는 외부 장치 없이 전하 주입과 재결합 과정 자체에서 좌·우 원편광 중 하나가 우세한 발광을 생성한다. 최근 연구들은 카이랄 리간드로 표면 또는 결정구조를 제어한 페로브스카이트 양자점 및 벌크 재료를 발광층으로 사용하여, 전기 발광 비대칭 계수(g_{EL})와 외부양자효율(EQE)을 동시에 확보할 수 있음을 보여주었다.^{19,20} 특히 최근 Nature Communications 등에 보고된 사례에서는 0.2~0.3 수준의 g_{EL} 과 함께 EQE가 두 자릿수(>10%)에 도달하며, CPL 소자가 실제 광원으로 기능할 수 있는 임계 수준에 근접했음을 시사한다.²⁰ 이러한 CP-LED에서 CPL의 기원은 단순한 발광 이방성이 아니라 카이랄 구조에 의해 유도된 스핀 선택적 전하 주입과 스핀-궤도 결합에 의해 분리된 밴드 구조, 그리고 방사 재결합

과정에서의 스핀 보존성이 모두 유효하게 작용된 결과로 이해되고 있다. 즉, CP-LED는 페로브스카이트 CPL 연구를 스핀 광전자 소자(spin-optoelectronic device) 영역으로 확장시키는 핵심 플랫폼이라 할 수 있다.

2.4 재료·소자 최적화 동향

최근에는 자체의 CPL 특성에만 의존하지 않고, 소자 구조 및 광학 설계를 통해 CPL 소자의 신호를 증폭 및 조율하려는 연구도 활발하다.

메타표면(metasurface)을 도입한 발광 소자에서는 동일한 발광 재료를 사용하더라도 방출 모드 선택성에 의해 CPL이 크게 향상될 수 있음이 보고되었다.²¹ 이러한 접근은 g_{PL} 또는 g_{EL} 의 절대값을 재료 하나의 한계로 보지 않고, 소자 차원의 광학 상태 제어 문제로 재정의한다는 점에서 중요하다. 특히 이는 CPL 소자를 디스플레이, 보안 광원, 광정보 암호화와 같은 응용으로 확장하는 데 있어 필수적인 설계 전략으로 간주된다.

지금까지의 소자 응용 연구를 종합하면, 페로브스카이트 CPL 소자로부터 다음과 같은 병목들과 연구 방향을 정립할 수 있다. CPL 순도(g_{EL} , $g_{current}$)와 효율(EQE, responsivity) 간 상충 관계, 카이랄 구조 도입에 따른 전하 수송 저하 및 안정성 문제, 스핀 선택성의 정량적 검증 및 재현성 확보 문제 등을 병목으로 두고 이에 따라 향후 연구는 카이랄성 유지하되 전하 수송에는 영향을 최소화하는 선택적 카이랄 설계, 소자 수명과 직접 연결되는 계면·전하 주입층 공학, 그리고 CPL-스핀-전기 신호 간 상관관계를 설명할 수 있는 물리 모델의 정립을 중심으로 진행될 것이라 사료된다.

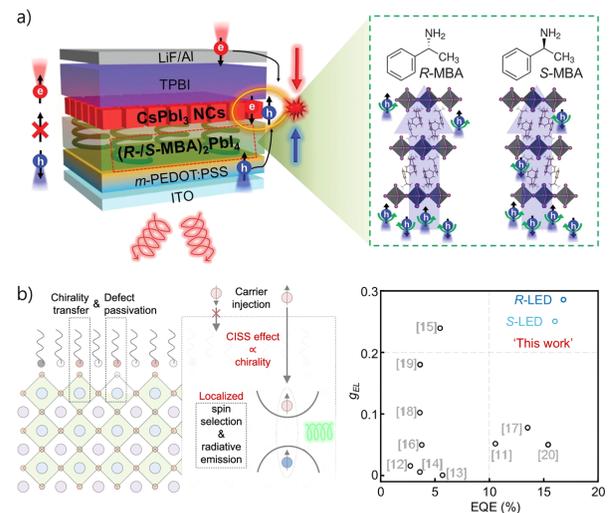


그림 5. (a) 준 2차원 LED에서 스핀 편극 전하 주입 및 CP-EL 발광에 대한 개략도.¹⁹ (b) 카이랄 PQD 기반 스핀 LED의 메커니즘에 대한 개략도. 문헌 및 본 연구의 페로브스카이트 스핀 R/S-LED의 g_{EL} 및 EQE 요약.²⁰

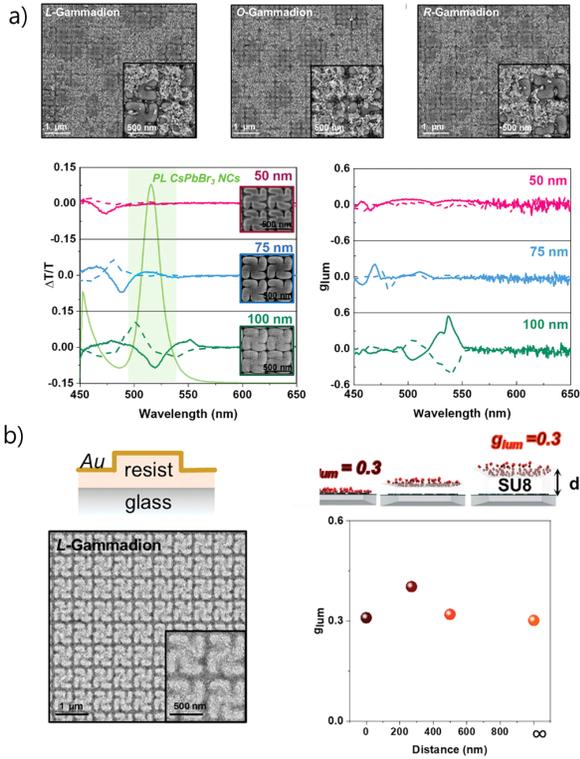


그림 6. (a) 좌부터 L-감마디온, O(라세릭)-감마디온, R-감마디온의 SEM 이미지, CsPbBr₃ 페로브스카이트 나노결정의 PL 스펙트럼과 CsPbBr₃ 페로브스카이트 NC로 덮인 두께가 다른 TiO₂(50, 75, 100 nm)를 갖는 L(점선) 및 R(실선) 감마디온의 CD 투과 스펙트럼, CsPbBr₃ 페로브스카이트 나노결정을 갖는 TiO₂ 감마디온(50, 75, 100 nm)에 대해 얻은 비대칭 인자. (b) CsPbBr₃ 페로브스카이트 나노결정을 갖는 Au 코팅 L-감마디온의 고해상도 SEM 이미지, 서로 다른 SU8 포토레지스트 두께에 따른 비대칭 인자 값 비교.²¹

3. 결론

CPL 소재 연구는 본질적으로 카이랄 구조에 기인한 발광 상태의 비대칭성을 정밀하게 제어하고 증폭하는 것을 목표로 발전해 왔으며 최근에는 전기·자기 쌍극자 전이 간섭과 스핀 선택적 전하 재결합을 동시에 고려한 설계 기법이 도입되면서 리간드 선정의 합리성과 소자 수준에서의 완성도가 크게 향상되고 있다. 기존 연구 방식은 주로 분자 또는 나노결정 수준의 광학 활성 검증에 국한되어 실제 소자 응용으로의 확장이 제한적이었으나 차원 감소 구조, 자가조립 나노구조 그리고 표면·결합 제어 기술을 통해 카이랄성-전자구조-발광 특성 간의 상관관계를 체계적으로 설계할 수 있는 환경이 마련되면서 원편광발광 구현은 한층 정교해지고 있다. 또한 스핀-궤도 결합이 강한 페로브스카이트 기반 연구는 CPL을 단순한 광학 특성이 아닌 스핀 광전자 기능으로 확장하는 데 기여함으로써 연구의 물리적 깊이와 효율성을 동시에 극대화하고 있다.

향후 카이랄 설계와 소자 구조 공학을 통합한 CP-LED 및 CPL 광검출 기술이 가속화됨에 따라 원편광발광 소재 및

소자 연구의 효율성과 재현성은 더욱 향상될 것으로 예상되며, 차세대 디스플레이, 광정보 압축, 보안 광원 그리고 스핀 기반 광전자 소자 등 다양한 응용 분야에서 상용화에 상당 기여할 것으로 예상된다. 더 나아가 이러한 흐름은 원편광 발광 개발의 전반적인 접근 방식을 재료 중심 설계에서 스핀·광자 상태를 고려하는 물리적 설계로 전환하는 데 기여할 것으로 사료된다. 이러한 기술적 진보는 고성능 CPL 광원의 실용화뿐만 아니라 다양한 산업 및 기초 연구 분야에 새로운 기능적 응용 가능성을 넓히고 설계 기회를 제공하며 동시에 차세대 스핀 광전자학 및 광기반 정보 기술 발전에 중추적인 역할을 할 것으로 전망된다.

참고문헌

1. Q. Cao, R. Song, C. C. S. Chan, Z. Wang, P. Y. Wong, K. S. Wong, V. Blum, and H. Lu, *Adv. Optical Mater.*, **11**, 2203125 (2023).
2. G. Chen, L. Meng, S. Liu, and L. Peng, *Molecules*, **29**, 5347 (2024).
3. JASCO Inc - Basics of Circularly Polarized Luminescence (CPL).
4. D. Yang, J. Han, M. Liu, and P. Duan, *Adv. Mater.*, **31**, 1805683 (2019).
5. H. Zhu, Q. Wang, K. Sun, W. Chen, J. Tang, J. Hao, Z. Wang, J. Sun, W. C. H. Choy, P. Müller-Buschbaum, X. W. Sun, D. Wu, and K. Wang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **15**, 9978 (2023).
6. L.-Z. Feng, Y.-H. Song, Z.-D. Li, B.-S. Zhu, Z.-Y. Ma, J.-N. Yang, Y.-C. Yin, J.-M. Hao, G.-J. Ding, Y.-R. Wang, Z. Zhao, H. Zhou, F. Fan, and H.-B. Yao, *Nano Lett.*, **24**, 6084 (2024).
7. Y. Xie, J. Morgenstein, B. G. Bobay, R. Song, N. A. M. S. Caturello, P. C. Sercel, V. Blum, and David B. Mitzi, *J. Am. Chem. Soc.*, **145**, 17831 (2023).
8. Y.-H. Kim, R. Song, J. Hao, Y. Zhai, L. Yan, T. Moot, A. F. Palmstrom, R. Brunecky, W. You, J. J. Berry, J. L. Blackburn, M. C. Beard, V. Blum, J. M. Luther, *Adv. Funct. Mater.*, **32**, 2200454 (2022).
9. Y.-H. Kim, Y. Zhai, E. A. Gaulding, S. N. Habisreutinger, T. Moot, B. A. Rosales, H. Lu, A. Hazarika, R. Brunecky, L. M. Wheeler, J. J. Berry, M. C. Beard, and J. M. Luther, *ACS Nano*, **14**, 7, 8816 (2020).
10. D. Chen, B. Tang, A. A. Sergeev, Y. Wu, H. Liu, D. Zhu, S. Hu, K. S. Wong, H.-L. Yip, and A. L. Rogach, *ACS Energy Lett.*, **10**, 815 (2025).
11. B. Li, Y. Li, W. Yuan, X. Zhang, S. Tao, H. Zhan, Z.-g. Yu, K. Wang, J. Liu, L. Wang, and C. Qin, *Adv. Funct. Mater.*, **35**, 2415433 (2025).
12. H. Gao, Y. Chen, R. Zhang, R. Cao, Y. Wang, Y. Tian, and Y. Xiao, *Mater. Horiz.*, **11**, 2906 (2024).
13. H. Liu, A. S. Portniagin, B. Tang, K. Vighnesh, Y. Li, Y. Wu, D. A. Rusanov, L. Ke, Y. Wang, D. Zhu, D. Chen, K.-C. Law,

- M. V Babak, E. Ushakova, and A. L Rogach, *ACS Nano*, **19**, 17774 (2025).
14. M. Veksler, J. Raymond, T. Ma, N. Schrenker, D. Fairhurst, R. Sharma, S. Bals, and N. A. Kotov, *Adv. Mater.*, **37**, e18765 (2025).
15. T. Wang, Z. Li, M. Ge, J. Shi, Y. Bekenstein, G. Ung, and M. Liu, *Adv. Optical Mater.*, **13**, e02519 (2025).
16. D. Wu, J. Wei, B. Luo, L. Zhou, P. Chen, J. Tian, J. Pan, A. V Emeline, J. Z. Zhang, and Q. Pang, *J. Phys. Chem. Lett.*, **16**, 4181 (2025).
17. X. Zhang, Y. Xu, A. N. Alphenaar, S. Ramakrishnan, Y. Zhang, A. J. Babatunde, and Q. Yu, *ACS Nano*, **18**, 14605 (2024).
18. A. Ishii and T. Miyasaka, *Sci. Adv.*, **6**, eabd3274 (2020).
19. Y.-H. Kim, Y. Zhai, H. Lu, X. Pan, C. Xiao, E. A. Gaulding, S. P. Harvey, J. J. Berry, Z. V. Vardeny, J. M. Luther, and M. C. Beard, *Science*, **371**, 1129 (2021).
20. S. He, W. Lin, D. Yu, J. Shi, Z. Yin, C. Sun, H. Liu, C. Zhang, J. Yuan, S. Bai, S. Xiao, G. Long, M. Yuan, Y. Jiang, Y. Chen, and Q. Song, *Nat. Commun.*, **16**, 2201 (2025).
21. N. Fiuza-Maneiro, J. Mendoza-Carreño, S. Gómez-Graña, M. I. Alonso, L. Polavarapu, and A. Mihi, *Adv. Mater.*, **36**, 2413967 (2024).