

카이랄 액정 반사층과 WO₃ 전기변색 층을 기반으로 한 반사형 컬러 디스플레이

오효석^{ID} · 나애빈 · 김민혜 · 김세움^{†ID}

서울과학기술대학교 전기정보공학과

(2026년 1월 14일 접수, 2026년 5월 18일 수정, 2026년 6월 24일 채택)

Reflective Color Display Based on a WO₃ Electrochromic Layer and Chiral Liquid Crystal Reflector

Hyo Seok Oh^{ID}, Ae Bin Na, Minhye Kim, and Se-Um Kim^{†ID}

Department of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

(Received January 14, 2026; Revised May 18, 2026; Accepted June 24, 2026)

초록: 전기변색 소자(electrochromic device, ECD)와 카이랄 액정(chiral liquid crystal, CLC) 반사층을 결합한 반사형 디스플레이를 제작하였다. ECD는 WO₃ 변색층과 LiClO₄ 기반 전해질, 그리고 인듐주석산화물 상대 전극으로 구성되었고 CLC 반사층은 ECD의 하판 배면에 형성하였다. 제안한 소자에서 0 V에서 -4 V까지 전압 인가를 통해 삼원색 반사율을 약 38%에서 11%까지 조절할 수 있다. ECD는 착색 시 2.6초, 탈색 시 4.2초의 스위칭 속도를 나타내었으며, 100회의 반복 구동 후에 93%의 변색 성능을 유지하였다. 이 연구에서 제안한 방식은 디지털 사이니지, 스마트 윈도우 등의 분야에서 컬러 반사 디스플레이를 구현하는데 활용할 수 있다.

Abstract: We demonstrate a color reflective display by integrating an electrochromic device (ECD) with a chiral liquid crystal (CLC) reflector. The ECD consists of a tungsten oxide (WO₃) electrochromic layer, an electrolyte based on LiClO₄, and an indium tin oxide (ITO) counter electrode, while the CLC reflector was formed on the rear side of the bottom substrate of the ECD. By applying voltages from 0 V to -4 V, the integrated device achieves color reflectance modulation from 38% to 11%. The ECD exhibited switching speeds of 2.6 s for coloring and 4.2 s for bleaching, and maintained 93% of its transmittance modulation performance after 100 repeated operation cycles. The proposed approach can be utilized to implement color reflective displays for applications such as digital signage and smart windows.

Keywords: electrochromic devices, tungsten oxide, chiral liquid crystals, color reflective display.

서 론

반사형 디스플레이는 외부의 자연광이나 조명을 광원으로 활용하여, 백 라이트 유닛이 필요 없는 저전력 구동이 가능한 기술이다.^{1,2} 이러한 장점 덕분에 야외 시인성이 뛰어나며, 전자책, 디지털 사이니지(digital signage), 스마트 윈도우 등 다양한 응용 분야에서 핵심 기술로 주목받고 있다. 대표적인 반사형 디스플레이 기술의 종류로는 전기영동 디스플레이(electrophoretic displays, EPDs), 반사형 액정 디스플레이(reflective liquid crystal displays, RLCDs), 전기변색소자(electrochromic devices, ECDs) 등이 있다.³⁻⁸

EPD는 마이크로 캡슐 내에 분산된 대전 입자의 전기 영동 현상을 이용하여 이미지를 구현한다.^{3,4} 인가 전압의 극성에 따라 대전 입자가 상부 전극으로 이동하여 입사광을 산란 혹은 흡수함으로써 디스플레이의 명암비를 형성한다. 이 기술은 전원 공급이 차단되어도 화면이 그대로 유지되는 쌍안정성 덕분에 저전력 구동이 가능하며, 종이와 유사한 높은 가독성을 제공한다는 장점이 있다. 그러나 입자의 물리적 이동에 의존하는 구동 특성 상 응답속도가 느리고, 컬러필터 도입 시 광 효율과 색 재현율이 저하된다는 기술적 한계를 갖는다.^{9,10}

RLCD는 전압 인가에 따른 액정의 배열 변화를 이용하여 입사광의 편광 상태를 변조하고, 이를 후면의 반사층을 통해 선택적으로 반사시킴으로써 이미지를 구현한다.^{5,6} 입사된 외부 광은 전면 편광판과 액정 층을 통과하며 편광 상태가 변조된 후, 후면 반사층에 의해 반사되어 다시 외부로 방출됨으로써 이미지를 형성한다. RLCD는 응답 속도가 빠르고 기존 LCD

[†]To whom correspondence should be addressed.
seumkim@seoultech.ac.kr, ORCID^{ID} 0000-0001-6897-0706
©2026 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

제조 인프라를 그대로 활용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 편광판과 컬러 필터를 사용해야 하므로 광 이용 효율이 낮아 화면이 어둡고 시인성이 떨어진다는 단점이 있다.

ECD는 전기변색 물질들의 가역적인 산화-환원 반응을 통해 탈색 상태(bleached state)와 착색 상태(colored state)를 스위칭하는 소자이다.^{8,11} 복잡한 입자 제어 기술이나 정밀한 셀 구조가 요구되는 기존 반사형 디스플레이(EPD, RLCD)와 달리, ECD는 소자 구조가 단순하며 핵심 변색층을 스핀 코팅이나 슬롯 다이와 같은 용액 공정으로 형성할 수 있어 고품질 박막의 저비용 생산이 가능하다. 이러한 저비용 공정 가능성은 생산 단가를 낮추고 대면적 소자로의 확장에 유리하다는 장점이 있다. 또한 낮은 소비전력과 높은 시인성을 제공한다는 점에서 차세대 디스플레이 기술로 주목받고 있다.

이러한 ECD를 구현하기 위해 산화텅스텐(WO_3),¹²⁻¹⁴ 산화티타늄(TiO_2),^{15,16} 산화바나듐(V_2O_5),^{17,18} 산화니켈(NiO)^{19,20} 등의 다양한 무기 변색 소재들이 연구되어 왔다. 이외에도 poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS)^{21,22} 및 polyaniline(PANI)와^{23,24} 같은 전도성 고분자 소재에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 무기 변색 소재는 우수한 화학적 안정성과 내구성을 갖는 반면, 전도성 고분자는 빠른 응답 속도와 기계적 유연성이 뛰어나다는 장점을 가진다.

하지만 이러한 다양한 소재들의 개발에도 불구하고, 기존의 전기변색 소재들은 반사형 디스플레이로 활용되기에 색 표현력에 대한 근본적인 한계를 가지고 있다. 전기변색 물질은 고유의 착색 상태가 청색(WO_3)이나 갈색(NiO)과 같은 단색에 머물러 있어, 하나의 디바이스에서 적색, 녹색, 청색의 3원색을 모두 구현하는 것이 어렵다. 이러한 색상 한계를 극복하기 위해 다색 전기변색 기술과 양전극 시스템(ambipolar system) 등이 제안되었다.²⁵⁻³¹

다색 전기변색 기술은 인가 전압의 크기를 정밀하게 제어하여 전기변색 분자의 산화-환원 상태를 단계적으로 조절하거나, 단량체-이량체 평형(monomer-dimer equilibrium)을 이 동시킴으로써 변색층의 흡수 파장을 변화시키는 방식이다.²⁵⁻²⁷ 이 방식은 단일 소자 구조 내에서 전압 제어만으로 다중 색상을 구현할 수 있어, 소자 구조가 단순하고 공정 비용 측면에서 효율적이라는 장점이 있다. 하지만 물질 고유의 산화-환원 전위에 의존하는 특성상 구현 가능한 색상이 특정 영역에 국한되어 있어 색역이 좁고, 전압에 따른 색상 변화가 불연속적으로 나타나는 경우가 많다.

양전극 시스템은 상하부 전극에 각각 양극 및 음극 변색 물질을 도입하여 양쪽 전극 모두가 전기변색 활성층으로 작동하는 소자 구조이다.²⁸⁻³¹ 이 구조는 두 물질의 동시 산화-환원 반응을 유도하고, 따라서 각 물질의 흡수 파장이 중첩되어 구현된다. 이를 통해 단일 물질 기반 소자 대비 더 깊은 색 심도와 우수한 명암비를 구현하여 시인성을 향상시킬 수 있다. 그러나 두 변색 물질의 색상이 혼합되는 감산 혼합 특성상

질은 청색이나 흑색과 같은 고대비 명암에는 유리하나, 구현 가능한 색상이 제한적이거나 색 순도가 낮다는 기술적 한계가 있다.

최근 반사형 디스플레이 분야에서는 ECDs 및 액정층을 광학 셔터로 활용하고, 이를 카이랄 액정(chiral liquid crystals, CLCs) 반사층과 결합하여 컬러 반사형 디스플레이를 구현하려는 연구가 진행되고 있다.³²⁻³⁴ CLC는 광학적 이방성을 가진 액정 분자들이 별도의 패터닝 없이 스스로 정렬하여 1차원의 나선형 광결정 구조를 형성한다.³⁵ 이러한 CLC는 특정 파장 영역과 선성(handedness)을 가진 원편광(circular polarization)을 선택적으로 반사하여 구조색을 구현한다.³⁶ Yu 등은 흑색과 투명 상태 간의 가역적 변색이 가능한 전기변색 고분자를 광학 셔터로 적용하고 내부에 CLC 고분자 그리드를 삽입한 소자를 보고했다.³³ 이 소자는 전압 인가에 따라 고분자의 투과도를 제어하여, 착색 시 CLC의 구조색을 드러내고, 탈색 시 투명해진 셔터를 통해 하부의 배경을 노출시킨다. 그러나, CLC 그리드 구조는 유효 반사 면적을 감소시켜 광학적 효율을 떨어뜨릴 뿐만 아니라, 제한된 이온 경로로 인해 전해질 내 이온 확산이 저해되어 착/탈색 응답 속도가 느려진다는 한계가 있다. 따라서, 고순도의 선명한 컬러를 구현하기 위해서는 유효 반사 면적의 손실 없이도 안정적인 이온 전도성을 확보할 수 있는 새로운 소자 구조 개발이 필요하다.

본 연구에서는 WO_3 기반 ECD 소자를 광학 셔터로 활용하고, CLC 반사층을 ECD 하판 배면에 결합하여 3원색(RGB) 구현이 가능한 반사형 디스플레이를 제안한다. WO_3 전기변색 층은 가시광선 영역에서 큰 투과도 변화량을 가질 뿐만 아니라 탈색 상태에서 높은 투명도를 유지하므로, 하부 반사층의 구조색을 최소한의 손실로 전달해야 하는 광학 셔터로서 적합하다.³⁷ 전해질 층은 프로필렌 카보네이트(propylene carbonate, PC)에 LiClO_4 와 페로센(ferrocene, Fc)을 첨가하여 구성하였다.^{13,38} PC는 높은 유전율과 우수한 전기화학적 안정성을 가져 높은 이온 전도도 확보를 위해 용매로 채택되었다. 용질인 LiClO_4 는 WO_3 변색에 필요한 리튬 이온(Li^+)을 공급하는 역할을 하며, Fc는 양극 종(anodic species)으로서 가역적인 산화-환원 반응을 통해 소자 전체의 전하 균형을 맞추고 구동 안정성을 확보하기 위해 도입되었다.¹³

소자가 반사 모드(reflective mode)일 때, 상부 ECD는 탈색 상태(bleached state)로 하부 CLC 반사층까지 외광이 도달하여 소자 외부에서 CLC 층에서 반사된 구조색을 관측할 수 있다. 반대로 다크 모드(dark mode)가 되면 WO_3 층이 착색(colored state)되어 입사광 및 하부 CLC의 반사광을 흡수한다(Figure 1). 제안한 CLC 반사층의 외부 결합 방식은 반사층이 ECD 내부의 이온 전도 경로에 간섭을 주지 않아 ECD가 광학 셔터로서 안정적인 구동이 가능하다. 결과적으로 반사형 디스플레이의 고대비 명암비 구현에 필수적인 블랙(black) 상태를 확보하고 RGB를 구현할 수 있다. 이 방식을 통해 기

존 단색 구동 ECD의 한계를 넘어 심도 조절이 가능한 RGB 구현이 가능하므로 향후 반사형 디스플레이 소자에서 ECD의 응용 범위를 확장할 수 있다.

실 험

재료. Tungsten powder, isopropanol, propylene carbonate (PC), LiClO₄, ferrocene(Fc), 1,4-bis(4-(3-acryloyloxypropyloxy)benzoyloxy)-2-methylbenzene(RM257), 2,2-dimethoxy-2-phenylacetophenone(DMPA), toluene, dichloromethane(DCM)은 Sigma-Aldrich에서 구매하였다. ((3R,3aS,6aS)-hexahydrofuro[3,2-b]furan-3,6-diyl bis(4-(4-(4-(acryloyloxy) butoxy) carbonyloxy)benzoyloxy)benzoate)(LC756)은 Henan Wentao Chemical Product Co.에서 구매하였다. 과산화수소(H₂O₂)와 초순수(distilled water), 에탄올(ethanol), 아세톤(acetone)은 덕산과학에서 구매하였다.

WO₃ 층 공정. WO₃ 층 형성을 위한 전구체 용액은 30 wt% 농도의 H₂O₂에 tungsten powder를 6.8 wt% 농도로 용해시켜 제조하였다. 혼합물을 100 °C에서 5시간 동안 교반하여 WO₃ 분말을 합성하였다. 합성된 WO₃ 분말을 isopropanol과 distilled water가 1:1 비율로 혼합된 용매에 30 wt% 농도로 분산시킨 후, 6시간 동안 초음파 처리(sonication)를 진행하여 최종 WO₃ 현탁액을 제조하였다.³⁹ 인듐주석산화물(indium tin oxide, ITO) 기판은 ethanol과 acetone을 1:1 비율로 혼합한 용액에서 20분 동안 초음파 세척 후 오븐에서 30분 건조하였으며, 이후 자외선-오존(UV-ozone) 처리를 10분 수행하였다. 전처리된 ITO 기판 위에 준비된 WO₃ 현탁액을 3000 rpm에서 20초간 스핀 코팅하였다. 코팅한 WO₃ 층을 60 °C에서 10시간 건조하였다.

CLC 반사층 제작. CLC 반사층은 ECD 하부 유리기판의 배면과 덮개 유리 사이에 5 µm 두께의 스페이서를 배치하여 셀 갭(cell gap)을 형성하고, 제작된 셀 내부에 액정 혼합물을 주입하는 방식으로 제조되었다. 액정 혼합물은 네마틱 액정 단량체 RM257, 카이랄 도판트 LC756, 그리고 광개시제 DMPA로 구성되었다. RGB 컬러 구현을 위해 LC756의 함량은 3.95-5.26 wt% 범위 내에서 조절되었으며, DMPA는 0.5 wt%로 고정하고 잔량은 RM257로 조성된다.

제조된 액정 혼합물을 DCM에 50 wt% 농도가 되도록 용해시킨 후 상온에서 600 rpm으로 10분 동안 교반하였다. 이후 온도를 110 °C로 승온하고 600 rpm으로 1시간 동안 교반하여 DCM을 완전히 증발시켰다. 용매가 제거된 액정 혼합물을 110 °C에서 액정 셀에 모세관 현상(capillary action)을 이용해 주입하고 60초 동안 자외선(ultraviolet, UV) 노광을 진행하여 경화시켰다. 이후 부착했던 덮개 유리를 하판에서 분리하여 최종적인 CLC 반사층을 확보하였다. 이때, 적색, 녹색, 청색 CLC 반사층은 LC756의 함량을 각각 3.95, 4.74, 5.26 wt%

비율로 조절하여 제작하였다.

전해질 제조 및 최종 소자 결합. 전해질은 PC 용매에 0.5 M의 LiClO₄와 0.05 M의 Fc를 용해시켜 제조하였다.¹³ 25 µm 실리콘 스페이서를 광경화성 레진(NOA63)에 혼합하여 하판 외각에 도포하였다. 이후 WO₃ 층이 형성된 상판과 하부 CLC 반사층이 형성된 하판을 합착하였다. 이때, 하판은 ITO 층이 ECD 내부를 향하고 맞은편에 CLC 반사층이 형성되어, CLC 반사층이 ECD 기판 외부에 배치된다. 이후, 스페이서로 유지한 상하판 사이의 간격에 전해질을 주입하였다. 전해질 주입이 완료된 후, 주입구를 동일한 광경화성 레진으로 밀봉하여 최종 소자를 완성하였다.

특성 분석. 제작된 소자의 반사를 및 스펙트럼은 분광 광도계(Flame-T-Vis-Nir, Ocean Insight)를 사용하여 분석하였다. 소자의 전기변색 거동 및 내구성 평가는 635 nm 레이저 광원(PL202, Thorlabs Inc.)과 함수 발생기(AFG1022, Tektronix)를 이용하여 수행하였다.

결과 및 토론

ECD/CLC 통합 소자의 구조 및 구동 원리. Figure 1(a)는 본 연구에서 제안하는 반사형 디스플레이의 구조를 나타낸다. ECD는 상부의 WO₃ 작업 전극, 전해질, 하부의 ITO 상대 전극으로 구성된다. 이때, 하부 ITO 기판의 배면에는 CLC 반사층이 형성되어 있다. 이러한 구조에서 상부 ECD는 전기화학적 산화-환원 반응을 통해 투과도를 가역적으로 변화시

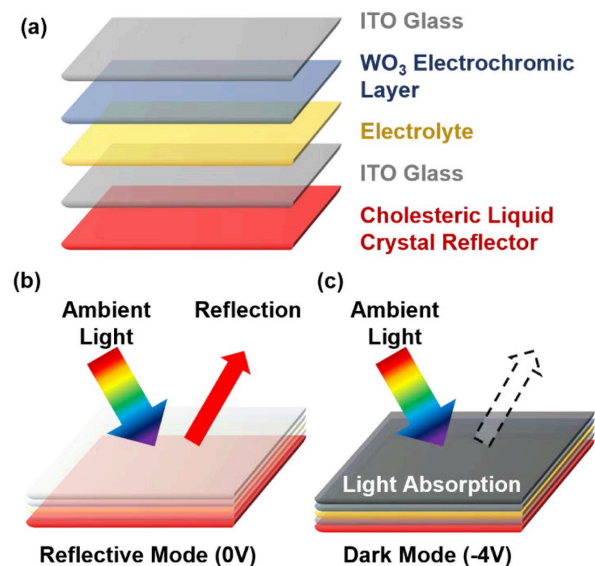


Figure 1. (a) Device structure of the proposed reflective ECD integrated with a CLC reflector; (b) In the reflective mode, ambient light passes through the ECD layer, and the CLC selectively reflects light corresponding to its helical pitch; (c) In the dark mode, the ECD layer absorbs incident light to block the reflection.

김으로써, 배면에 위치한 CLC 반사층으로 입사하는 외광의 크기를 제어하는 광학 서터의 역할을 수행한다(Figures 1(b) and 1(c)).

Figure 1(b)는 소자가 reflective mode (0 V)로 작동하는 경우를 보여준다. 상부 ECD 층이 높은 투과율을 갖는 bleached state를 유지할 때, 입사광은 적은 손실로 투과되어 하부 CLC 반사층에 도달한다. 이때 CLC 반사층은 고유의 나선 피치(helical pitch)에 대응하는 특정 파장 대역의 빛을 선택적으로 반사하여, 반사된 빛이 다시 투명한 ECD 층을 통과하여 관찰자에게 색을 전달한다.

반면, Figure 1(c)는 소자가 dark mode(-4 V)로 전환된 상태를 나타낸다. 전압 인가 시 WO_3 층은 짙은 청색을 띠는 colored state로 변화하여 가시광선 전 영역의 빛을 흡수한다. 이러한 착색층은 외부 입사광을 차단할 뿐만 아니라 하부 CLC 반사층에서 반사되는 빛까지 흡수할 수 있다.

CLC 반사층의 광학적 특성. CLC 반사층은 CLC 용액 내의 카이랄 도판트(LC756)의 함량을 조절하여 다양한 구조색을 구현할 수 있다. Figure 2(a)는 CLC 반사층 제조에 사용된 재료들의 분자 구조를 나타내고 Figure 2(b)는 RM257과 LC756 사이의 가교 전 후의 상태를 나타낸다. RM257과 LC756은 각각 분자 양 끝단에 반응성 아크릴레이트(acrylate)기를 보유하고 있다. UV 노광 시 광개시제 DMPA로부터 생성된 라디칼에 의해 RM257과 LC756이 가교(cross-linking)하여 네트 워크 구조를 형성한다. 이러한 구조는 제조된 CLC 층에 액정의 나선형 배열을 고정하는 역할을 한다.

LC756은 RM257 분자들에 카이랄 네마틱 상을 유도한다. 이때 나선 구조가 한 바퀴(360°)를 회전하는 데 걸리는 거리를 나선 피치(helical pitch, p)라고 한다. 피치 p 는 첨가된 LC756의 농도 c 와 반비례한다($p = 1/(\text{HTP} \cdot c)$).⁴⁰ 여기서 HTP(helical twisting power)는 카이랄 도판트 고유의 비틀림력을 의미한다. 따라서 CLC 혼합물 내의 LC756의 농도를 높일수록 피치가 짧아진다. 나선 구조는 내부에서 피치 길이에 해당하는 브래그 반사(Bragg reflection)를 유발한다. 반사되는 중심 파장 λ 와 나선 피치 p 는 $\lambda = n_{\text{avg}} \cdot p \cdot \cos\theta$ 의 수식으로 결정된다. 여기서 n_{avg} 는 액정의 평균 굴절률, θ 는 빛의 입사각을 의미한다. 따라서 LC756의 농도가 높아지면 반사 파장이 짧아진다. 본 연구에서는 LC756의 농도를 각각 3.95, 4.74, 5.26 wt% 비율로 조절하여 적색, 녹색, 청색 반사 필름을 제작하였다.

Figure 2(c)는 제작된 적색, 녹색, 청색 CLC 반사층의 반사 스펙트럼을 분석한 결과를 나타낸다. 가시광선 영역의 적색(640 nm), 녹색(546 nm), 청색(478 nm) 영역에서 각각 뚜렷한 반사 피크가 나타났다. 특히 녹색 CLC 반사층의 경우 약 38%의 가장 높은 반사율을 기록하였고, 반치 폭(full width at half maximum, FWHM)은 약 65 nm로 측정되었다. 이때 녹색 파장의 중심값(546 nm)과 액정의 평균 굴절률($n_{\text{avg}} \approx 1.6$)을 통해 산출된 나선 피치($P = \lambda_0/n_{\text{avg}}$)는 약 341 nm이다. 이를 바탕으로

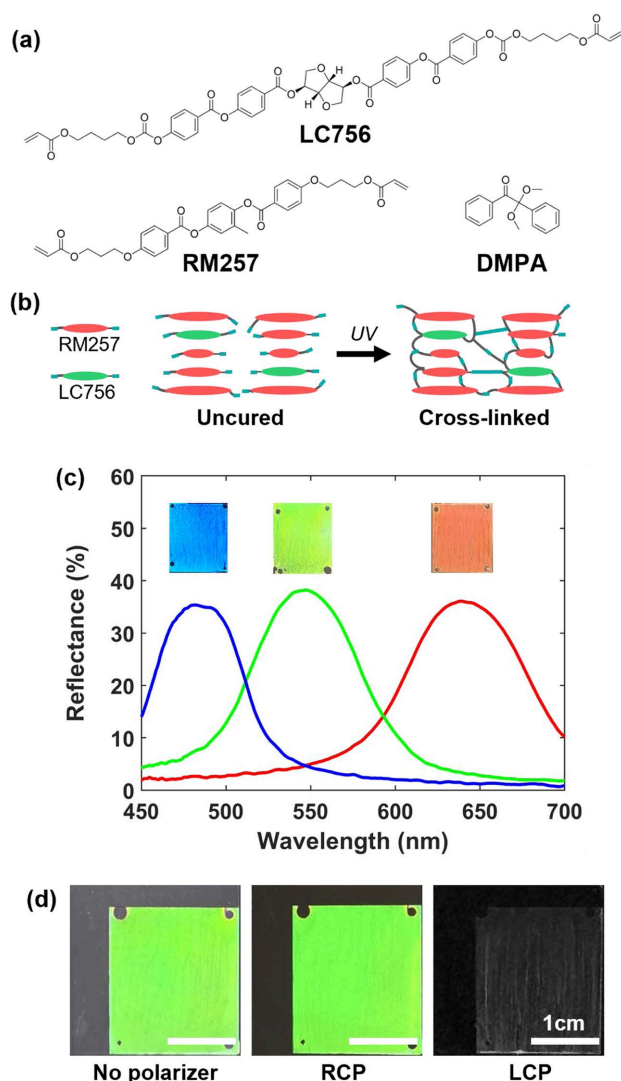


Figure 2. (a) Chemical structures of the materials used in CLC reflector fabrication: LC756, RM257, and DMPA; (b) Schematic illustration of the photo-induced cross-linking process of RM257 and LC756; (c) Reflection spectra of the red (640 nm), green (546 nm), and blue (478 nm) CLC reflectors; (d) Photographic images of the green CLC reflector observed under unpolarized, RCP, and LCP lights.

로 RM257 액정의 굴절률 이방성($\Delta n \approx 0.173$)을 고려해서 계산한 이론적 대역폭($\Delta\lambda = \Delta n \cdot P$)은 약 59 nm로, 측정된 실험 값(65 nm)과 잘 부합한다.⁴⁰ 이러한 실험값과 이론값의 유사성은 CLC 층 내부의 액정 분자들이 결합 없이 균일한 나선형 구조를 형성하였음을 시사한다.⁴¹

Figure 2(d)는 CLC 반사층의 선택적 반사 특성을 검증하기 위해, 편광판이 없는 상태(no polarizer)와 좌원편광(left circular polarization, LCP) 및 우원편광(right circular polarization, RCP) 필터를 통해 각각 촬영한 사진이다. 관찰 결과, CLC 반사층은 나선 방향과 일치하는 우원편광 조건에서는 선명한

녹색을 반사한 반면, 반대 방향인 좌원편광 조건에서는 반사가 억제되었다. 이러한 편광 의존성은 구현된 색상이 균일하게 정렬된 나선 구조에 의한 브래그 반사임을 나타낸다.

통합 소자의 구조적 특성 및 구동 안정성. 제조된 WO₃ 변색층의 물리적·화학적 구조가 소자의 구동 안정성에 미치는 영향을 분석하기 위해 주사전자현미경(SEM) 및 X선 광전자 분광법(XPS) 측정을 수행하였다. WO₃ 단면 SEM 측정 결과, 스핀 코팅 공정을 통해 ITO 기판 위에 약 109 nm 두께의 균일한 WO₃ 박막이 형성되었음을 확인하였다(Figure 3(a)). 이는 WO₃ 박막이 소자의 계면에서 균일하게 형성되어 가역적인 이온 삽입 및 탈리 거동이 가능함을 시사한다. 이어 제조된 박막의 화학적 조성 및 산화 상태를 확인하기 위해 XPS 측정을 수행하였다(Figure 3(b)). 분석 결과, 35.8 eV와 37.9 eV에서 두 개의 피크가 관찰되었으며, 이는 각각 W⁶⁺의 W4f_{7/2} 및 W4f_{5/2} 오비탈에 해당한다. 다른 결합 에너지 영역에서 추가적인 피크가 관찰되지 않아, 산소 결합이 최소화된 WO₃ 박막이 성공적으로 코팅되었음을 확인하였다.

상부 ECD의 응답 속도와 반복 구동 안정성을 평가하기 위해, 635 nm 파장에서 ECD 층의 투과도 변화를 측정하였다. 측정 시료로는 해당 파장 대역에서 투명한 녹색 CLC 반사층이 결합된 소자를 사용하였다. 광원과 동일한 파장 대역을 반사하는 적색 소자를 측정에 사용할 경우, 하부 CLC 층의 브래그 반사로 인해 입사광의 상당량이 차단되어 ECD 본연의 투과도 변화량을 측정하는 데 한계가 존재한다. 실험은

reflective mode(0 V)와 dark mode(-4 V)의 전압을 교대로 인가하며 진행되었다.

Figure 3(c)는 소자의 반복 구동 안정성을 평가한 결과이다. 안정성 테스트는 탈색(0 V)과 착색(-4 V) 전압을 각각 20초씩 교대로 인가하는 방식으로 수행되었으며, 총 100회 반복 구동하였다. 이때, 각 단계의 유지 시간은 소자가 완전한 착색 및 탈색 상태(saturated state)에 도달하기에 충분한 시간으로 설정되었다. 측정 결과, 초기 활성화 단계를 거쳐 안정화된 상태의 최대 투과도 변화량은 28%(탈색 63%, 착색 35%)였으며, 100회 구동 후의 투과도 변화량은 26%(탈색 62%, 착색 36%)로 측정되었다. 이는 최대 성능 대비 약 93%의 특성을 유지하는 것으로, 제안된 소자가 반복적인 전압 인가 환경에서도 안정적인 광학적 성능을 구현함을 시사한다.

이어 Figure 3(d)는 스위칭 사이클에서의 응답 속도 분석 결과를 보여준다. 구동 속도는 전체 투과도 변화량의 90%에 도달하는 데 소요되는 시간으로 정의하였으며, 측정 결과 착색 시간(τ_c) 2.6초, 탈색 시간(τ_b) 4.2초로 각각 확인되었다. 이는 기존에 보고된 WO₃ 기반 ECD의 응답 속도와 유사한 수준이다.⁴² CLC 반사층이 소자의 외부 배면에 결합되었기 때문에 전해질 내 이온의 이동이나 전극 계면 반응에 물리적인 저항을 주지 않는다. 따라서 반복 구동 안정성을 확보하면서도 WO₃ 기반 ECD의 통상적 수준의 응답 속도를 성공적으로 달성할 수 있었다.

통합 소자의 색 구현 특성. Figure 4는 ECD/CLC 통합 소

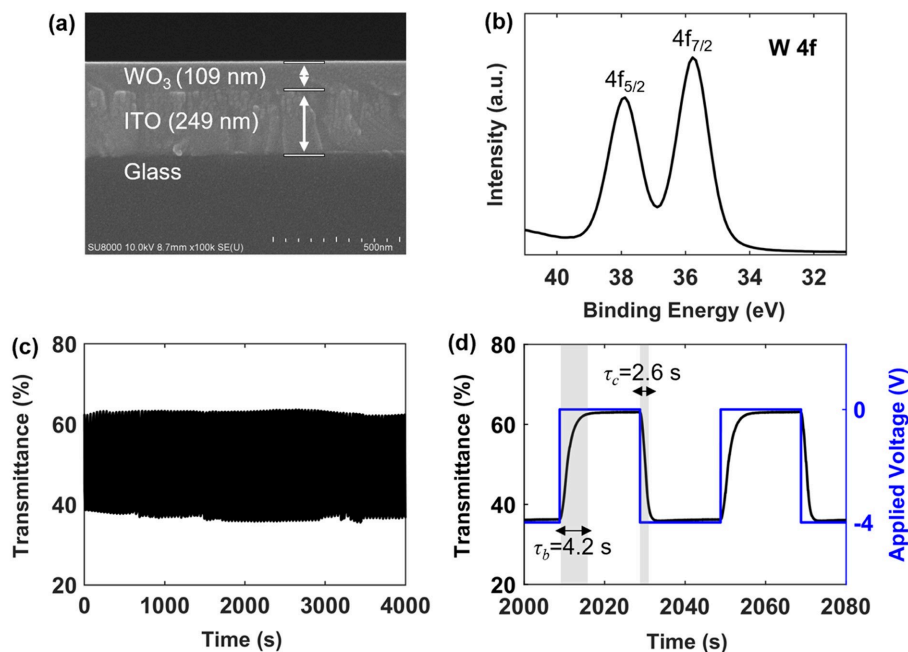


Figure 3. Structural and chemical characteristics of the WO₃ film and electro-optical performance of the green ECD/CLC device: (a) Cross-sectional SEM image of the spin-coated WO₃ film on the ITO-coated glass; (b) X-ray photoelectron spectra (XPS) of the WO₃ film; (c) Cycling stability over 100 operation cycles; (d) response speeds.

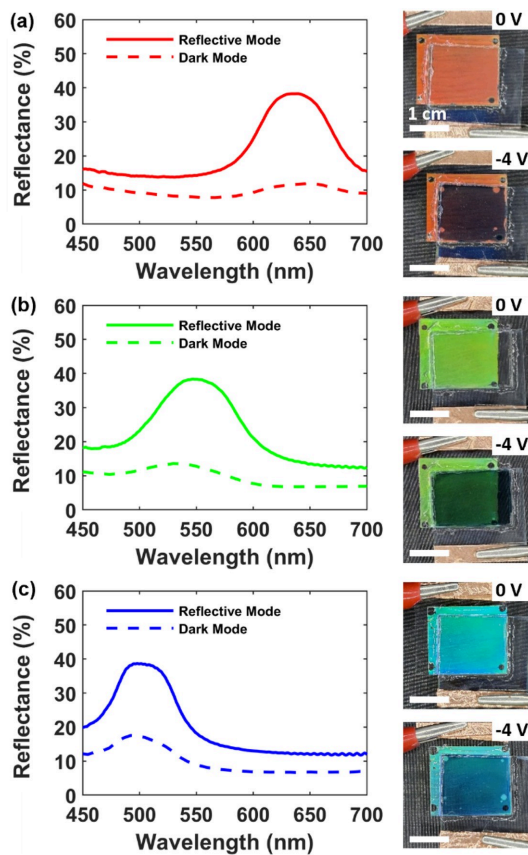


Figure 4. Voltage-dependent reflection spectra and sample images at reflective mode (0 V) and dark mode (-4 V) of (a) red; (b) green; (c) blue ECD/CLC devices.

자의 전압 인가에 따른 반사 스펙트럼과 실제 구동 사진을 나타낸다. 전압이 인가되지 않은 reflective mode에서, 각 소자의 최대 반사율은 약 38%로 측정되었다. 이 수치는 Figure 2(c)에서 CLC 반사층 단독으로 측정된 반사율(38%)과 동등 수준이다. 그러나 이 수치는 상부 ITO 기판, WO_3 층, 전해질 층이 적층된 최종 통합 소자의 계면에서 발생하는 반사율이 포함된 수치이다. Figure 2(c) 및 Figure 4의 dark mode의 반사 스펙트럼에서 기저 반사율이 2%에서 약 10%로 증가했음을 알 수 있다. 이론적으로는 이러한 기저 반사율의 상승분이 더해져 총 반사율이 증가해야 하지만, 측정된 최대 반사율이 38%로 유지된 것은 통합 소자의 계면을 통과하는 과정에서 광 흡수나 산란 등의 광학적 손실이 발생했기 때문이다. 그럼에도 불구하고, 최종 통합 소자가 CLC 고유의 반사율과 동등한 수준의 반사 강도를 유지한다는 점은 상부 ECD 층이 하부 CLC 반사층의 시인성을 저해하지 않으면서 효과적인 광학 서터로서 작동함을 시사한다.

Dark mode에서의 구동 특성을 적색 소자를 기준으로 관찰 하면, -4 V의 전압을 인가하였을 때 상부 ECD가 착색되면서

반사율이 11% 수준까지 감소하였다(Figure 4(a)). 이는 착색된 ECD가 외부 입사광과 하부 CLC의 반사광을 흡수하여, 소자 외부로 향하는 광 경로를 차단하였기 때문이다. 결과적으로, 제작된 적색 소자는 reflective mode(38%)와 dark mode(11%) 간에 약 27%의 반사율 변화를 구현하였다.

Figure 5는 제작된 소자의 색 구현 특성을 정량적으로 비교 분석하기 위해, Figure 2(c)의 단독 반사층과 Figure 4의 통합 소자(reflective mode)에서 측정된 반사 스펙트럼을 기반으로

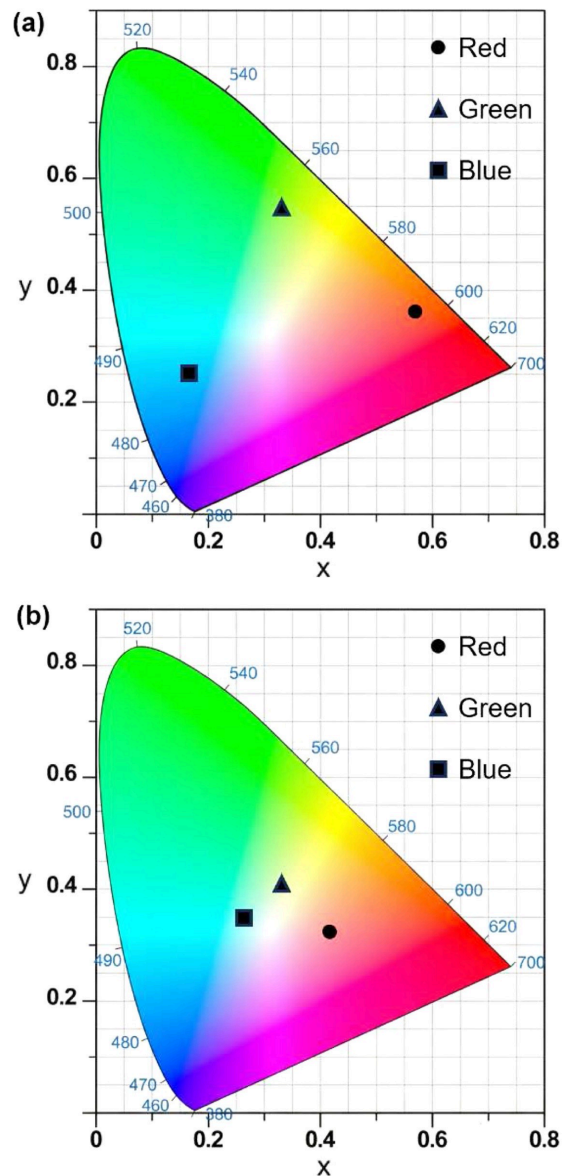


Figure 5. RGB color coordinates on CIE 1931 color space of (a) the CLC reflector; (b) the ECD/CLC devices at the reflective mode. Color coordinates were calculated from the reflection spectra given in Figure 2(c) and Figure 4.

CIE 1931 색도표에 도시된 색좌표를 나타낸다. Figure 5(a)는 CLC 반사층 단독 필름인 Figure 2(c)의 반사율 데이터를 기반으로 도시되었다. CLC 반사층 단독 필름은 기저 반사율이 약 2% 수준으로 낮아 높은 색 순도를 유지하였으며, 이에 따라 색도표 상에서 넓은 색역을 형성하였다. 반면, Figure 5(b)는 통합 소자인 Figure 4의 반사율 데이터를 기반으로 도시되었다. 상부 ECD 층의 계면 반사로 인해 기저 반사율이 약 10% 수준으로 상승함에 따라, 반사광에 백색광 성분이 혼입되어 구조색의 색 순도가 감소하였다. 그 결과 Figure 5(a) 대비 축소된 색역을 형성하였다. 그러나 이러한 색역의 축소에도 불구하고, 통합 소자는 여전히 적색, 녹색, 청색 각 영역에서 뚜렷하고 구분되는 색 좌표를 형성하여, 상부 ECD 층의 적층 후에도 하부 CLC의 구조색이 유효하게 구현됨을 확인하였다.

결 론

본 연구에서는 WO₃ 기반의 ECD를 광학 셔터로 적용하고, 이를 선택적 반사 특성을 갖는 CLC 반사층과 결합하여 전기적으로 색상 제어가 가능한 반사형 디스플레이 소자를 성공적으로 구현하였다. 제작된 CLC 반사층은 가시광선 전 영역에서 RGB 구조색을 구현하였으며, 약 38%의 반사율과 높은 색 순도를 확보하였다. 통합 소자는 reflective mode와 dark mode 간 약 27%의 반사율 변화량을 구현하여 뚜렷한 스위칭 특성을 보였다. 아울러, 광학 셔터인 ECD 층의 자체적인 구동 성능을 검증한 결과, 최대 28%의 투과도 변화량을 기록하였다. 이는 ECD 층이 하부 CLC 반사층의 입사광을 제어하는 광학 셔터로서 효과적으로 작동함을 입증한다. 완성된 통합 소자는 2.6초의 착색 속도와 4.2초의 탈색 속도를 갖는 동작 성능을 보였으며, 100회 이상의 반복 구동 테스트에서도 최대 성능 대비 약 93%의 변조 특성을 유지하여 구동 안정성을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 외부 반사층 통합 방식은 소자 구조를 단순화하면서도 기존 단색 ECD의 색상 표현 한계를 극복할 수 있는 효과적인 접근법이다. 본 연구에서 제안한 외부 CLC 반사층 결합 방식은 ECD의 전기화학적 구동 특성에 영향을 주지 않는 독립적인 구조이므로, WO₃ 뿐만 아니라 다양한 ECD 구조, 물질들에 적용될 수 있는 장점이 있다. 이러한 결과는 향후 저전력 반사형 디스플레이, 디지털 사이니지, 스마트 윈도우 등 다양한 광학 응용 분야에서의 활용 가능성을 시사한다.

감사의 글: 이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

참고문헌

- Herle, D.; Martin, O. J. F.; Villanueva, L. G.; Quack, N. Emulating Paper: A Review of Reflective Display Technologies. *J. Opt. Microsyst.* **2024**, 4, 020901.
- Kim, D. Y.; Kim, M.-J.; Sung, G.; Sun, J.-Y. Stretchable and Reflective Displays: Materials, Technologies and Strategies. *Nano. Converg.* **2019**, 6, 21.
- Kholghi Eshkalak, S.; Khatibzadeh, M.; Kowsari, E.; Chinnappan, A.; Jayathilaka, W. A. D. M.; Ramakrishna, S. Overview of Electronic Ink and Methods of Production for Use in Electronic Displays. *Opt. Laser Technol.* **2019**, 117, 38-51.
- Heikenfeld, J.; Drzaic, P.; Yeo, J.-S.; Koch, T. Review Paper: A Critical Review of the Present and Future Prospects for Electronic Paper. *J. Soc. Inf. Disp.* **2011**, 19, 129-156.
- Chen, H.-W.; Lee, J.-H.; Lin, B.-Y.; Chen, S.; Wu, S.-T. Liquid Crystal Display and Organic Light-Emitting Diode Display: Present Status and Future Perspectives. *Light Sci. Appl.* **2018**, 7, 17168.
- Yin, K.; Hsiang, E.-L.; Zou, J.; Li, Y.; Yang, Z.; Yang, Q.; Lai, P.-C.; Lin, C.-L.; Wu, S.-T. Advanced Liquid Crystal Devices for Augmented Reality and Virtual Reality Displays: Principles and Applications. *Light Sci. Appl.* **2022**, 11, 161.
- Ko, I. J.; Park, J. H.; Kim, G. W.; Lampande, R.; Kwon, J. H. An Optically Efficient Full-Color Reflective Display with an Electrochromic Device and Color Production Units. *J. Inf. Disp.* **2019**, 20, 155-160.
- Cho, H. M.; Hwang, Y. J.; Oh, H. S.; Hwang, H. S.; Kim, K.; Kim, S.-U.; Na, J.-H. Recent Advances in Electrochromic Devices: From Multicolor to Flexible Applications. *Adv. Photonics Res.* **2025**, 6, 2400103.
- Kao, W.-C.; Hsu, Y.-C.; Hong, K.-D.; Chen, H.; Lin, C.-M.; Yin, R.-X. Color Electronic Paper With Front Light. *IEEE Consum. Electron. Mag.* **2025**, 14, 94-104.
- Lu, C.-M.; Wey, C.-L. A Controller Design for Color Active-Matrix Displays Using Electrophoretic Inks and Color Filters. *IEEE/OSA J. Disp. Technol.* **2011**, 7, 482-489.
- Li, L.; Yu, Z.; Ye, C.; Song, Y. Structural Color Boosted Electrochromic Devices: Strategies and Applications. *Adv. Funct. Mater.* **2024**, 34, 2311845.
- Li, Z.; Liu, Z.; Zhao, L.; Chen, Y.; Li, J.; Yan, W. Efficient Electrochromic Efficiency and Stability of Amorphous/Crystalline Tungsten Oxide Film. *J. Alloys Compd.* **2023**, 930, 167405.
- Bae, J.; Kim, H.; Moon, H. C.; Kim, S. H. Low-Voltage, Simple WO₃-Based Electrochromic Devices by Directly Incorporating an Anodic Species into the Electrolyte. *J. Mater. Chem. C* **2016**, 4, 10887-10892.
- Guo, J.; Jia, H.; Shao, Z.; Jin, P.; Cao, X. Fast-Switching WO₃-Based Electrochromic Devices: Design, Fabrication, and Applications. *Acc. Mater. Res.* **2023**, 4, 438-447.
- Hu, Y.; Wang, L.; Li, G. Electrochromic Properties of Sputtered Ti-Doped WO₃ Films. *Plasma Sci. Technol.* **2007**, 9, 452.
- Zhang, S.; Chen, S.; Yang, F.; Hu, F.; Yan, B.; Gu, Y.; Jiang, H.; Cao, Y.; Xiang, M. High-Performance Electrochromic Device Based

- on Novel Polyaniline Nanofibers Wrapped Antimony-Doped Tin Oxide/TiO₂ Nanorods. *Org. Electron.* **2019**, 65, 341-348.
17. Shin, D.; Kim, J.; Choi, S.; Song, G.; Rougier, A.; Lee, C. S. Evaluation of Low-Voltage-Driven Multi-Colored Electrochromic Device Based on Dry-Deposited V₂O₅. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2023**, 257, 112341.
 18. Karaca, G. Y.; Eren, E.; Alver, C.; Koc, U.; Uygun, E.; Oksuz, L.; Oksuz, A. U. Plasma Modified V₂O₅/PEDOT Hybrid Based Flexible Electrochromic Devices. *Electroanalysis* **2017**, 29, 1324-1331.
 19. Rakibuddin, M.; Shinde, M. A.; Kim, H. Sol-Gel Fabrication of NiO and NiO/WO₃ Based Electrochromic Device on ITO and Flexible Substrate. *Ceram. Int.* **2020**, 46, 8631-8639.
 20. Ma, D.; Shi, G.; Wang, H.; Zhang, Q.; Li, Y. Hierarchical NiO Microflake Films with High Coloration Efficiency, Cyclic Stability and Low Power Consumption for Applications in a Complementary Electrochromic Device. *Nanoscale* **2013**, 5, 4808-4815.
 21. Do, M.; Park, C.; Bae, S.; Kim, J.; Kim, J. H. Design of Highly Stable and Solution-Processable Electrochromic Devices Based on PEDOT:PSS. *Org. Electron.* **2021**, 93, 106106.
 22. Singh, R.; Tharion, J.; Murugan, S.; Kumar, A. ITO-Free Solution-Processed Flexible Electrochromic Devices Based on PEDOT:PSS as Transparent Conducting Electrode. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2017**, 9, 19427-19435.
 23. Kang, J.-H.; Oh, Y.-J.; Paek, S.-M.; Hwang, S.-J.; Choy, J.-H. Electrochromic Device of PEDOT-PANI Hybrid System for Fast Response and High Optical Contrast. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2009**, 93, 2040-2044.
 24. Lin, T.-H.; Ho, K.-C. A Complementary Electrochromic Device Based on Polyaniline and Poly(3,4-Ethylenedioxythiophene). *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2006**, 90, 506-520.
 25. Liang, Z.; Nakamura, K.; Kobayashi, N. A Multicolor Electrochromic Device Having Hybrid Capacitor Architecture with a Porous Carbon Electrode. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2019**, 200, 109914.
 26. Moon, H. C.; Kim, C.-H.; Lodge, T. P.; Frisbie, C. D. Multicolored, Low-Power, Flexible Electrochromic Devices Based on Ion Gels. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2016**, 8, 6252-6260.
 27. Chen, B.-H.; Kao, S.-Y.; Hu, C.-W.; Higuchi, M.; Ho, K.-C.; Liao, Y.-C. Printed Multicolor High-Contrast Electrochromic Devices. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2015**, 7, 25069-25076.
 28. Liu, H.-S.; Pan, B.-C.; Huang, D.-C.; Kung, Y.-R.; Leu, C.-M.; Liou, G.-S. Highly Transparent to Truly Black Electrochromic Devices Based on an Ambipolar System of Polyamides and Viologen. *NPG Asia Mater.* **2017**, 9, e388.
 29. Kortz, C.; Hein, A.; Ciobanu, M.; Walder, L.; Oesterschulze, E. Complementary Hybrid Electrodes for High Contrast Electrochromic Devices with Fast Response. *Nat. Commun.* **2019**, 10, 4874.
 30. Zhang, W.; Li, H.; Yu, W. W.; Elezzabi, A. Y. Transparent Inorganic Multicolour Displays Enabled by Zinc-Based Electrochromic Devices. *Light Sci. Appl.* **2020**, 9, 121.
 31. Ling, Y.; Xiang, C.; Zhou, G. Multicolored Electrochromism from Benzodipyrrolidone-Based Ambipolar Electrochromes at a Fixed Potential. *J. Mater. Chem. C* **2017**, 5, 290-300.
 32. Kim, S.-U.; Lee, S.-H.; Lee, I.-H.; Lee, B.-Y.; Na, J.-H.; Lee, S.-D. Generation of Intensity-Tunable Structural Color from Helical Photonic Crystals for Full Color Reflective-Type Display. *Opt. Express* **2018**, 26, 13561.
 33. Yu, Z.; Wang, J.; Li, L.; Guo, Z.; Liu, S.; Ding, Y.; Wu, M.; Ye, C. Cholesteric Liquid Crystal Polymer Grids Enabling Facile Fabrication of Structural Color-Enhanced Electrochromic Devices for Advanced Security Encryption with Multi-Mode Display Effects. *Chem. Eng. J.* **2025**, 521, 166731.
 34. Li, X.; Guo, Y.; Zhang, M.; Zhang, C.; Niu, R.; Ma, H.; Sun, Y. Colorable Light-Scattering Device Based on Polymer-Stabilized Ion-Doped Cholesteric Liquid Crystal and an Electrochromatic Layer. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, 15, 7184-7195.
 35. Wang, L.; Urbas, A. M.; Li, Q. Nature-Inspired Emerging Chiral Liquid Crystal Nanostructures: From Molecular Self-Assembly to DNA Mesophase and Nanocolloids. *Adv. Mater.* **2020**, 32, 1801335.
 36. Coates, D. Development and Applications of Cholesteric Liquid Crystals. *Liq. Cryst.* **2015**, 42, 653-665.
 37. Cai, G.; Cui, M.; Kumar, V.; Darmawan, P.; Wang, J.; Wang, X.; Lee-Sie Eh, A.; Qian, K.; Lee, P. S. Ultra-Large Optical Modulation of Electrochromic Porous WO₃ Film and the Local Monitoring of Redox Activity. *Chem. Sci.* **2016**, 7, 1373-1382.
 38. Wen, R.-T.; Granqvist, C. G.; Niklasson, G. A. Eliminating Degradation and Uncovering Ion-Trapping Dynamics in Electrochromic WO₃ Thin Films. *Nat. Mater.* **2015**, 14, 996-1001.
 39. Costa, C.; Pinheiro, C.; Henriques, I.; Laia, C. A. T. Inkjet Printing of Sol-Gel Synthesized Hydrated Tungsten Oxide Nanoparticles for Flexible Electrochromic Devices. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2012**, 4, 1330-1340.
 40. Li, X.; Chen, Y.; Du, C.; Liao, X.; Yang, Y.; Feng, W. Cholesteric Liquid Crystal Elastomer Coatings with Brilliant Structural Colors and Mechanochromic Response Fabricated by Spray Deposition. *Adv. Funct. Mater.* **2024**, 34, 2412298.
 41. Christou, M. A.; Papanicolaou, N. C.; Polycarpou, A. C. Modeling the Reflection from Cholesteric Liquid Crystals Using Modal Analysis and Mode Matching. *Phys. Rev. E* **2012**, 85, 031702.
 42. Qu, H.; Zhang, H.; Li, N.; Tong, Z.; Wang, J.; Zhao, J.; Li, Y. A Rapid-Response Electrochromic Device with Significantly Enhanced Electrochromic Performance. *RSC Adv.* **2015**, 5, 803-806.

출판자 공지사항: 한국고분자학회에 게재된 논문 및 기관 소속의
 관찰권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.