

쌍안정 고분자 안정화 액정 및 카이랄 액정 필름 기반 상태 기억 가능 반사형 컬러 디스플레이

황현성[#] · 김민혜[#] · 나애빈[#] · 오호석[#] · 최지원 · 김세움[†]

서울과학기술대학교 전기정보공학과

(2026년 4월 13일 접수, 2026년 6월 6일 수정, 2026년 6월 6일 채택)

Reflective Color Display with Memory Effect Based on Bistable Polymer-stabilized Liquid Crystal and Chiral Liquid Crystal Film

Hyeon Seong Hwang[#], Minhye Kim[#], Ae Bin Na[#], Hyo Seok Oh[#], Ji Won Choi, and Se-Um Kim[†]

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

(Received April 13, 2026; Revised June 6, 2026; Accepted June 6, 2026)

초록: 인가 전압 주파수에 따라 전압 제거 후 포컬 코닉 상태를 유지할 수 있는 쌍안정 고분자 안정화 액정과 하부에 적색(R), 녹색(G), 청색(B)을 반사하는 카이랄 액정 필름을 형성하여 반사형 디스플레이 소자를 제작하였다. 쌍안정 고분자 안정화 액정층에 저주파 교류 전압을 인가하면 쌍안정 포컬 코닉 상태가 되어 가시광 영역 투과율이 78.7%에서 0.6%로 줄어들며, 고주파 교류 전압을 인가하면 투명 상태로 리셋된다. 이에 따라 배면에 형성한 카이랄 액정 필름의 R, G, B 반사율을 37%에서 17.5%로 조절할 수 있다. 이 연구에서 제안한 방식은 전압 제거 후에도 표시 이미지를 유지할 수 있으므로, 향후 저전력 스마트 윈도우 및 컬러 반사형 디스플레이 등 다양한 분야에 응용할 수 있다.

Abstract: A reflective color display with state-memory capability was demonstrated by integrating a bistable polymer-stabilized liquid crystal (PSLC) layer with chiral liquid crystal films reflecting red (R), green (G), and blue (B). Under a low-frequency AC voltage, the PSLC layer switched to a bistable scattering state, and the transmittance decreased from 78.7% to 0.6%. When a high-frequency AC was applied, the PSLC layer was reset to a transparent state. The reflectance of the underlying R, G, and B chiral liquid crystal films was then modulated from 37% to 17.5%. The proposed device can preserve the displayed image after the voltage is removed. The proposed method in this study can be widely used in low-power optical applications such as smart windows and color reflective displays.

Keywords: polymer stabilized liquid crystals, chiral liquid crystals, color reflective displays, bistable states, focal conic states.

서 론

반사형 디스플레이는 백라이트 유닛 없이 외부의 자연광이나 조명을 광원으로 활용해 이미지를 구현한다. 야외 시인성이 뛰어나고 저전력 구동이 가능하여 에너지 절감형 건축물, 디지털 사이니지 등 다양한 응용 분야에 적용될 수 있다.¹⁻⁴ 대표적인 반사형 디스플레이 기술로 전기 영동 디스플레이(electrophoretic displays),^{5,6} 전기변색 디스플레이(electrochromic displays),^{7,8} 반사형 액정 디스플레이(reflective liquid crystal displays)⁹ 등이 있다.

전기 영동 디스플레이는 서로 다른 색상을 갖는 입자에 서로 다른 전하를 부여한 뒤 인가 전압에 따라 입자의 위치를 화면의 상·하부로 이동시켜 이미지를 구현한다.^{5,10} 상태마다 쌍안정성을 가져 전압 제거 후에도 표시 이미지를 유지시킬 수 있다.^{11,12} 그러나 화면 전환 속도가 느리고 표현 가능한 색의 범위가 좁다.^{1,10} 전기변색 디스플레이는 전기변색이 가능한 물질들의 가역적인 산화-환원 반응을 통해 탈색 상태와 착색 상태를 스위칭하는 소자이다.^{13,14} 저전압 구동이 가능하다는 장점을 가지고 있으나, 구동 속도가 느리고, 색 구현 기능이 단순 변색에 의존하여 넓은 색역의 반사형 컬러 이미지를 구현하는 것이 어렵다.¹⁵⁻¹⁷ 반사형 액정 디스플레이는 기존 액정 디스플레이에서 백라이트를 제거하고 반사판을 도입한 구조를 가진다.¹⁸ 빠른 응답 속도 및 고해상도 구현이 가능하다는 장점을 가지지만 외광이 입사와 반사시 컬러 필터를 두 번 통

[#]These authors equally contributed to this work.

[†]To whom correspondence should be addressed.

seumkim@seoultech.ac.kr, ORCID[®] 0000-0001-6897-0706

©2026 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

과하므로 휘도가 낮고 시야각에 따른 화질이 감소한다.^{19,20} 또한, 전기 영동 디스플레이, 전기변색 디스플레이와 다르게 전압 제거 후에도 표시 이미지를 유지하는 것이 불가능하다.

고분자 안정화 액정(polymer stabilized liquid crystals, PSLCs)은 단분자 액정에 액정 단량체를 첨가하여 액정 단량체 중합 이후 기존 단분자 액정이 가진 상을 유지하고 있는 액체-고체 복합체를 뜻한다. PSLC에 전압을 인가하여 광학적으로 투명 상태와 산란 상태를 스위칭할 수 있어 광학 셔터, 스마트 윈도우 등으로 활용할 수 있다.²¹⁻²⁴ PSLC는 인가 전압을 제거하면 본래의 상태로 되돌아오므로 표시 상태를 유지할 수 없다. 이는 전기장에 의해 변형되었던 액정 분자들이 탄성 복원력과 표면 구속력에 의해 전압을 인가하기 이전 상태로 돌아가기 때문이다.²⁵ 반면, PSLC에 카이랄 네마틱 액정을 사용하는 경우 인가 전압의 크기 또는 주파수에 따라 선택 반사 상태인 투명 상태와 광산란 상태인 포컬 코닉 상태 사이의 전이가 가능하며, 액정 단량체와 카이랄 도펀트 등의 조성에 따라 전압 제거 후에도 각 상태를 유지할 수 있는 쌍안정 특성을 구현할 수 있다.²⁶⁻²⁸ 투명 상태에서는 액정의 나선축이 기판에 수직으로 정렬되어 선택 반사가 나타나는 반면, 포컬 코닉 상태에서는 나선축이 불규칙한 방향으로 배열되어 강한 광산란이 발생한다. 이때 고분자 네트워크는 전기장에 의해 형성된 액정 배열 상태를 기계적으로 안정화하고 전압 제거 후 액정 분자들이 초기 상태로 완전히 되돌아가는 것을 억제한다. 따라서 적절한 조성 및 구동 조건에서는 전압 제거 후에도 포컬 코닉 상태가 유지될 수 있으며, 이를 통해 별도의 유지 전압 없이 표시 상태를 보존할 수 있다.²⁹ 하지만 기존의 쌍안정 PSLC는 투명-산란 상태의 명암비만 구현할 수 있으므로 단일 소자 내에서 여러 색상을 표현하는 것이 어렵다.³⁰⁻³³

최근 카이랄 액정의 높은 색 반사 효율을 이용하여 시인성을 향상시킨 반사형 디스플레이 연구가 진행되고 있다.^{34,35} 카이랄 액정은 네마틱 액정에 나선 구조를 유도하는 카이랄 도펀트가 혼합되어 액정 분자의 방향자가 나선형으로 회전하는 구조로 형성되어 있다. 입사광 중 나선 주기 및 유효 굴절률에 비례한 파장을 선택적으로 반사하여 구조색을 나타낸다.^{36,37} 따라서 카이랄 도펀트의 함량 조절 등을 통해 나선 주기를 변조하여 적색(R), 녹색(G), 청색(B)의 삼원색 반사가 가능한 반사 필터를 형성할 수 있다.³⁸⁻⁴⁰

본 연구에서는 액정 단량체와 카이랄 도펀트의 최적 중량비를 탐색하여 PSLC에 인가된 전압을 제거해도 이전 상태가 유지되는 쌍안정 PSLC를 제작하였다(Figure 1). 이는 기존의 고분자 안정화 액정의 상태를 유지하기 위해 지속적인 전압 인가가 필요하다는 한계점을 개선한 것이다. 더 나아가 제작된 쌍안정 PSLC 배면에 R, G, B를 반사하는 카이랄 액정 필름을 배치함으로써, 상부 PSLC의 투과율을 조절하여 카이랄 액정 필름에서 반사되는 R, G, B를 조절할 수 있는 반사형 디스플레이

레이를 제작하였다. 제작된 소자의 쌍안정 PSLC는 음의 유전율 이방성을 가지는 단분자 액정 BHR27200-300, 액정 단량체 RM257, 카이랄 도펀트 S811, 광개시제 DMPA를 혼합하여 구성했다. PSLC 소자 배면에 형성한 카이랄 액정 필름은 액정 단량체 RM257, 카이랄 도펀트 LC756, 사슬연장제 EDDT, 촉매 DPA, 광개시제 DMPA를 혼합하여 구성했다. 카이랄 액정 필름에서 LC756의 농도를 조절하여 중심 반사 파장이 R, G, B인 필름을 구현하였다. 제안한 구조는 PSLC 층과 카이랄 액정 필름의 물리적 간섭을 차단하여 구동 안정성을 높일 수 있다. 제안한 구조에서 쌍안정 상태 안정성과 R, G, B의 심도 표현 성능을 분석하였다.

실 험

재료. BHR27200-300($\Delta\epsilon = -4.5$)은 High C CO., LTD.에서 구매하였다. 1,4-bis(4-(3-acryloyloxypropyloxy)benzoyloxy)-2-methylbenzene(RM257), 2,2-(ethylenedioxy) diethanethiol (EDDET), dipropylamine(DPA) 2,2-dimethoxy-2-phenylacetophenone(DMPA)는 Sigma-Aldrich에서 구매하였다. ((3R, 3aS, 6aS)-hexahydrofuro[3,2-b] furan-3,6-diyl bis(4-(4-(3-acryloyloxy) butoxy) carbonyloxy) benzoyloxy)benzoate (LC756)은 Henan Wentao Chemical Product Co.에서 구매하였다. (S)-2-Octyl 4-[4-(Hexyloxy)benzoyloxy]benzoate(S811)는 Tokyo Chemical Industry CO., LTD.에서 구매하였다. 수평배향용 SE-7492는 Nissan Chemical Co.에서 제공되었다.

PSLC 소자 제작. 투명전극(Indium-tin oxide, ITO)이 코팅된 유리 기판을 아세톤으로 세척한 후 자외선-오존 처리를 5분 동안 수행하였다. 기판의 ITO 면 위에 SE-7492를 3000 rpm에서 30초간 스핀 코팅하고, 230 °C에서 2시간 동안 열처리한 후, 러빙하여 수평배향층을 형성하였다. 수평배향층이 형성된 ITO 기판 2개를 25 μm 두께의 셀 갭을 갖도록 결합하고 PSLC 형성을 위한 액정 혼합물을 주입하였다. 액정 혼합물은 BHR27200-300, RM257, S811, DMPA로 구성되었다. RM257의 함량은 0.5-2 wt%, S811의 함량은 2-10 wt%에서 조절되었으며, DMPA는 0.2 wt%로 고정되었고 잔량은 BHR27200-300으로 조성되었다. 액정 혼합물을 주입한 후 365 nm 파장의 자외선을 28 mW/cm² 세기로 60초 동안 노광하였다. 광개시제로부터 생성된 라디칼에 의해 RM257의 아크릴기 중합 및 가교 반응을 일으켜 액정 매질 내에 고분자 네트워크가 형성된다. 본 연구에서의 노광 에너지는 일반적인 고분자 안정화 액정 시스템에서 RM257의 아크릴기 가교를 충분히 유도할 수 있는 에너지에 해당한다.^{27,41} 광중합의 결과로 PSLC 내부에는 가교된 RM257이 BHR27200-300과 함께 S811의 도움으로 나선 구조를 안정적으로 나타내는 고분자 네트워크가 형성된다. PSLC 제작 과정이 강건하게 설정되어, 반복된 실험 간에 완성된 소자의 광학 성능이 유사하게 나타났다.

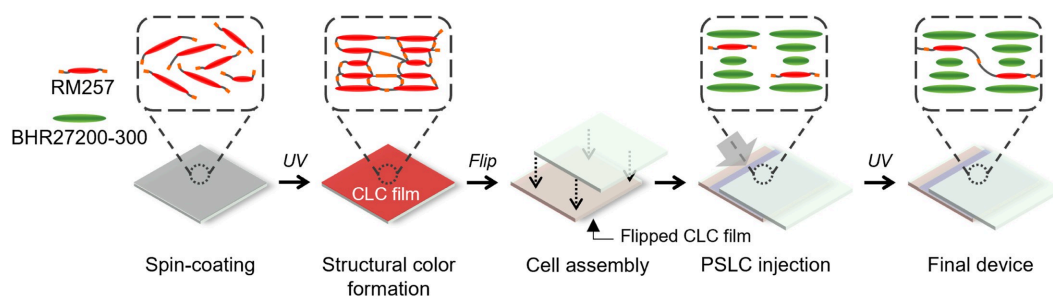


Figure 1. Fabrication process of the device. Schematic illustration of the sequential fabrication process and transition of molecular configuration.

카이랄 액정 필름 제작. 카이랄 액정 필름은 ITO 기판에 수평배향층을 형성한 후, PSLC 셀 제작 전, 기판 배면에 카이랄 액정 필름용 액정 혼합물을 스핀 코팅하여 제작된다. 스핀 코팅을 이용해 형성된 카이랄 액정 필름은 일반적으로 $1.5\ \mu\text{m}$ 에서 $2\ \mu\text{m}$ 수준의 두께를 가진다.^{42,43} 액정 혼합물은 500 mg RM257, LC756, 108 mg EDDT, 10 mg DPA, 10 mg DMPA를 1200 mg 톨루엔에 용해시켜 조성된다. LC756의 함량은 R, G, B 반사 필름 각각 RM257 중량 대비 4.4 wt%(22 mg), 5.2 wt%(26 mg), 6.0 wt%(30 mg)로 설정하였다. 액정 혼합물 용액을 기판 배면에 1000 rpm에서 30초간 스핀 코팅하고, 상온에서 1시간 동안 톨루엔을 증발시킨 후, $28\ \text{mW}/\text{cm}^2$ 의 세기로 60초 동안 365 nm 파장의 자외선 노광을 진행하여 RM257의 아크릴기를 가교시켰다.

특성 분석. 제작된 소자의 가시광 투과 스펙트럼은 분광 광도계(Flame-T-Vis-Nir, Ocean Optics)를 사용하여 분석하였다. 제작된 소자의 가시광 반사 스펙트럼은 적분구(ISP-REF, Ocean Optics)를 사용하여 분석하였다. 소자의 전압에 따른 동적 특성 평가는 635 nm 레이저 광원(PL202, Thorlabs Inc.)과 광센서(S120VC, Thorlabs Inc.)를 사용하여 이루어졌다. 소자 전압 인가는 함수와 발생기(AFG1022, Tektronix), 선형 증폭기(F10A, Pendulum)를 통해 수행하였다.

결과 및 토론

소자 구조 및 구동 원리. Figure 2는 본 연구에서 제안하는 소자의 여러 동작 상태에서의 PSLC 내부 액정 상태 및 색 반사 상태를 나타낸다.

PSLC 층에 저주파 교류 전압(low-frequency alternating current voltage, LFAC) (90 V, 10 Hz)이 인가되면 전기유체 역학적 불안정성으로 액정 배향 상태가 깨지게 되고 이후 LFAC를 제거하면 포컬 코닉 상태를 형성한다. 이 상태에서 PSLC가 입사하는 빛을 난반사하여 카이랄 액정 필름으로 들어가는 빛을 차단하고, 이로 인해 전체 구조에서 R, G, B 반사율이 감소한다. 이후 고주파 교류 전압(high-frequency alternating current voltage, HFAC) (90 V, 1000 Hz)을 인가

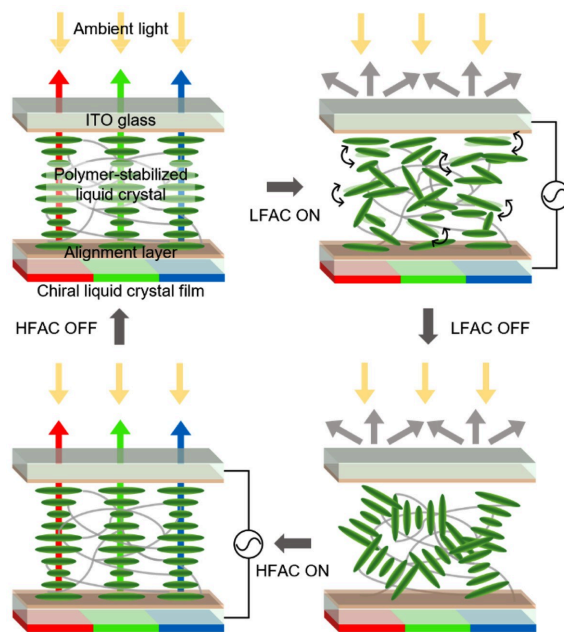


Figure 2. Schematic diagram of the state transition of the proposed device under LFAC and HFAC driving, showing the corresponding liquid crystal configurations in the PSLC layer and the modulation of RGB reflection.

하면 음의 이방성을 가진 액정의 방향자가 전기장에 수직으로 정렬하면서 초기 전압 미인가 상태와 액정의 배향 상태가 동일해진다. 이후, 인가한 HFAC를 제거하면 액정 분자의 배열 상태가 유지되므로 투명과 포컬 코닉 상태를 안정적으로 유지하는 쌍안정성이 구현된다. 이 상태에서 PSLC는 소자에 입사하는 빛의 경로를 방해하지 않으므로, 카이랄 액정 필름은 R, G, B를 반사하게 된다.

Figure 3은 PSLC 및 액정 필름 제조에 사용된 재료들의 분자 구조를 나타낸다. RM257은 다이아크릴레이트 액정 단량체로, 광에 반응하여 고분자 네트워크를 형성한다. LC756과 S811은 카이랄 도펀트로 단분자 액정과 RM257 분자들에 나선 구조를 유도하여 카이랄 네마틱 상을 유도한다. S811은 PSLC 층 제작에 사용되었고, LC756은 카이랄 액정 필름 층 제작에 사용되었다. DMPA는 광개시제로, 광에 반응하여 라

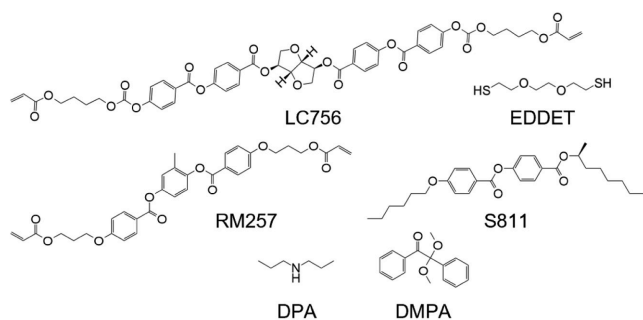


Figure 3. Chemical structures of the materials used for the fabrication of the PSLC and CLC reflector layers.

디칼을 생성해 RM257을 중합시킨다. EDEET는 사슬 연장제로, 스핀 코팅 공정에서 균일한 고분자 네트워크를 형성하여 필름의 구조적 안정성을 향상시키고 반사율을 증가시키기 위해 사용하였다.^{44,45} DPA는 RM257과 EDEET의 티올-아크릴레이트 결합 반응을 위한 촉매로 사용되었다.

RM257 농도에 따른 PSLC의 동작 특성. Figure 4는 RM257 농도에 따른 PSLC의 동작 특성을 나타낸다. PSLC의 동작 특성은 광원의 파장보다 전기장에 의해 유도되는 액정 및 고분자 네트워크의 상태 변화에 의해 결정되므로,⁴⁶ 본 연구에서는 측정 파장을 635 nm로 설정하여 PSLC의 투과율 변화를 제시하였다. S811 및 DMPA의 농도를 각각 6, 0.2 wt%로 고정하고, RM257 농도를 0.5, 1, 2 wt%로 각각 설정하여 PSLC를 제작하였다. 나머지 중량은 BHR27200-300 액정으로 구성된

다. 제작된 PSLC 소자를 포컬 코닉 상태로 전환하기 위해 LFAC인 10 Hz 90 V를 5초 동안 인가한 후 제거하였다. 포컬 코닉 상태 전환 이후, 30초 동안 투과율 변화를 관측하고, HFAC인 1000 Hz 90 V를 5초 동안 인가한 후 제거하여 투과율을 확인하였다. Figure 4(a), 4(b), 4(c)는 각각 RM257의 농도가 0.5, 1, 2 wt%로 설정된 소자의 동작 특성을 나타낸다. 고분자 네트워크는 LFAC 인가로 형성된 포컬 코닉 상태를 유지하는 역할을 한다.^{26,27} RM257의 농도가 0.5 wt%일 때, LFAC 제거 후 30초 동안 투과율이 22.8%에서 71.9%로 상승했다. 이를 통해 포컬 코닉 상태가 유지되지 않는 것을 알 수 있다. RM257의 농도가 2 wt%인 경우, LFAC 제거 후 투과율이 유지되었지만, HFAC 인가 및 제거 이후 투과율이 44.1%로 측정되어, 초기값 75.9%로 복원되지 않았다. RM257 농도가 1 wt%인 경우, 포컬 코닉 상태에서 투과율이 유지되었고(from 3.1% to 3.6%), HFAC를 제거한 후의 투과율이 79.1%로 초기값(79.6%)과 거의 일치하였다.

Figure 4(d)와 4(e)는 포컬 코닉 상태와 리셋 상태의 가시광대역(400-750 nm) 투과 스펙트럼과 635 nm 파장에서의 투과율을 각각 나타낸다. RM257의 농도가 0.5 wt%인 소자의 포컬 코닉 상태의 평균 투과율이 27.7%로 측정되었으며, 이는 RM257의 농도가 1 wt%인 소자의 평균 투과율인 0.6%에 비해 높은 수치이므로, 강한 전기유체역학적 불안정성을 유도하지 못함을 알 수 있다. RM257의 농도가 2 wt%인 소자의 리셋 상태의 투과율이 45.8%로 측정되어 초기 상태로 복원되지 않는다. 따라서 RM257의 농도가 낮을 경우 포컬 코닉 상태를

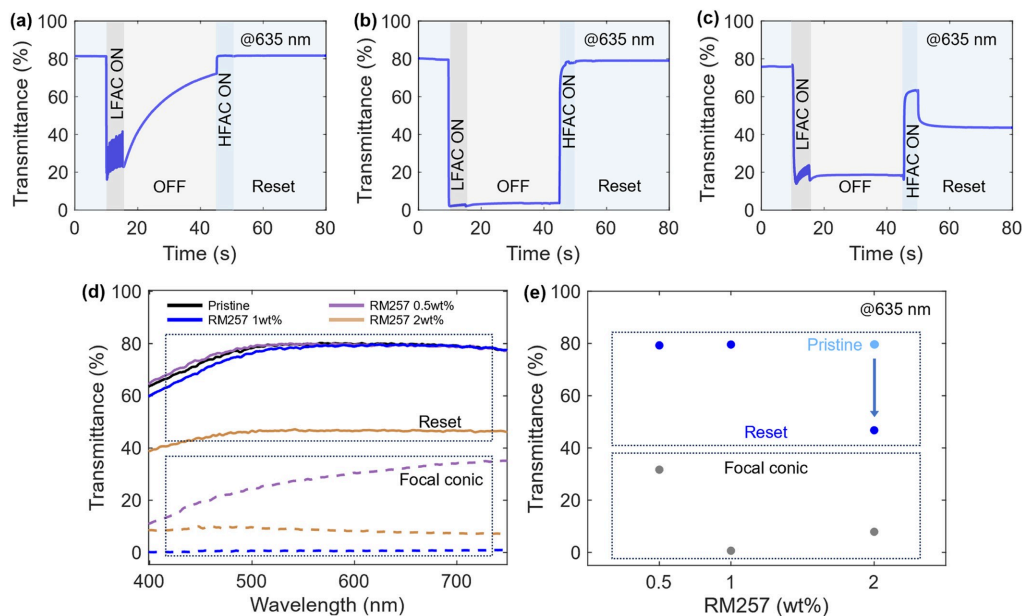


Figure 4. Time-dependent transmittance of PSLCs with RM257 weight ratios of (a) 0.5; (b) 1; (c) 2 during sequential LFAC ON, OFF, HFAC ON, and reset (HFAC OFF) states. LFAC was applied for 5 s to the pristine state, followed by a 30 s voltage-off period, and HFAC was then applied for 5 s before removal; (d) Transmittance spectra of PSLCs containing 0.5, 1, and 2 wt% RM257 in the focal conic (dotted lines) and reset (solid lines) states; (e) Transmittance at 635 nm of PSLCs containing 0.5, 1, and 2 wt% RM257 in the focal conic and reset states.

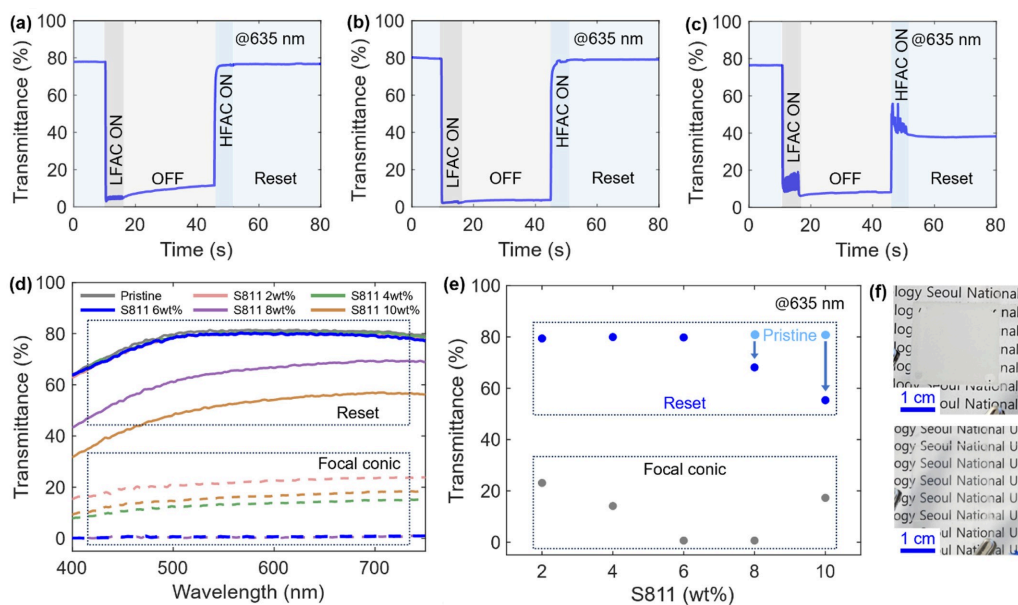


Figure 5. (a–c) Time-dependent transmittance of PSLCs containing S811 at weight ratios of 2, 6, and 10 wt%, respectively, during sequential LFAC ON, OFF, HFAC ON, and reset (HFAC OFF) states. LFAC was applied to the pristine state for 5 s, followed by a 30 s voltage-off period, and HFAC was then applied for 5 s before removal; (d) Transmittance spectra of PSLCs containing 2, 4, 6, 8, and 10 wt% S811 in the focal conic (dotted lines) and reset (solid lines) states; (e) Transmittance at 635 nm of PSLCs containing 2, 4, 6, 8, and 10 wt% S811 in the focal conic and reset states; (f) Photographs of the PSLC containing 6 wt% S811 and 1 wt% RM257 in the focal conic and reset states.

유지하지 못하고, RM257의 농도가 높을 경우 상 복원력이 떨어져 초기 상태로 돌아가는 것이 어렵다는 것을 확인할 수 있다.

S811 농도에 따른 PSLC의 동작 특성. Figure 5는 S811 농도에 따른 PSLC의 동작 특성을 나타낸다. RM257 및 DMPA의 농도를 각각 1, 0.2 wt%로 고정하고, S811 농도를 2, 4, 6, 8, 10 wt%로 변화시켰다. 나머지 중량은 BHR27200-300 액정으로 구성된다.

Figure 5(a), 5(b), 5(c)는 각각 S811의 농도가 2, 6, 10 wt%로 설정된 소자의 동작 특성을 나타낸다. S811의 농도가 2 wt%인 경우, LFAC를 제거한 후 포컬 코닉 상태에서 투과율이 평균 9.2%로 측정되었다. 이는 S811의 최적 농도인 6 wt%의 포컬 코닉 상태의 평균 투과율인 3.4%와 비교해서 5.8% 높은 수치이다. S811이 6 wt% 포함된 소자가 S811이 2 wt% 포함된 소자에 비해 전기유체역학적 불안정성을 증가시켜 포컬 코닉 상태의 광산란을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다. S811의 농도가 10 wt%로 높은 경우에는 LFAC를 제거한 후 포컬 코닉 상태에서 투과율이 평균 7.7%로 2 wt%인 경우와 유사하나, 리셋 후 투과율이 38.3%로 감소한다.

Figure 5(d)와 5(e)는 포컬 코닉 상태와 리셋 상태의 가시광대역(400–750 nm) 투과 스펙트럼과 635 nm 파장에서 투과율을 각각 나타낸다. S811의 농도가 2 wt%와 4 wt%인 소자의 포컬 코닉 상태의 평균 투과율이 21.8%와 13.3%로 측정되었으며, 이는 S811의 농도가 6 wt%와 8 wt%인 소자의

평균 투과율인 0.6%와 0.5%에 비해 높은 수치이므로, 강한 전기유체역학적 불안정성을 유도하지 못함을 알 수 있다. S811의 농도가 10 wt%인 경우 포컬 코닉 상태의 평균 투과율이 16.1%로 다시 증가한다. 또한 S811의 농도가 8, 10 wt%인 소자의 리셋 상태의 투과율이 각각 64.1%와 51.4%로 측정되어 초기 상태로 복원되지 않는다. 따라서 쌍안정 PSLC를 구현하기 위한 최적의 RM257과 S811의 농도가 존재하는 것을 알 수 있다. Figure 5(f)는 본 연구에서 사용한 액정 BHR27200-300에 대한 최적 배합비인 RM257 1 wt%, S811 6 wt% 조건에서 제작한 PSLC 소자의 포컬 코닉 및 리셋 상태의 사진으로, 제작된 PSLC가 R, G, B를 반사하는 액정 필름과 결합했을 때 상태 기억 가능 광학 셔터 역할을 수행할 수 있음을 보여준다.

PSLC의 안정성 및 작동 전압. Figure 6은 단분자 액정 92.8 wt%, RM257 1 wt%, S811 6 wt%, DMPA 0.2 wt%로 구성된 PSLC의 전기광학적 특성 및 반복 구동 안정성을 나타낸다. Figure 6(a)는 초기 상태에서 LFAC를 인가 및 제거하여 포컬 코닉 상태를 형성한 후 장시간(6000 s) 투과율 변화를 추적한 결과이다. LFAC를 제거한 직후 소자는 2.1%의 투과율을 나타냈으며, 2000초가 지난 후부터는 그 투과도가 9.8%로 일정하게 유지되어 쌍안정 특성을 장시간 유지하는 것을 알 수 있다. Figure 6(b)는 LFAC ON, OFF와 HFAC ON, OFF를 각각 5초씩 순차적으로 인가하는 구동 사이클을 1000초 동안 총 55회 반복하여 소자의 장기 구동 안정성을 평가한 결과이다. 각 사이클에서의 단일 구동 응답은 Figure

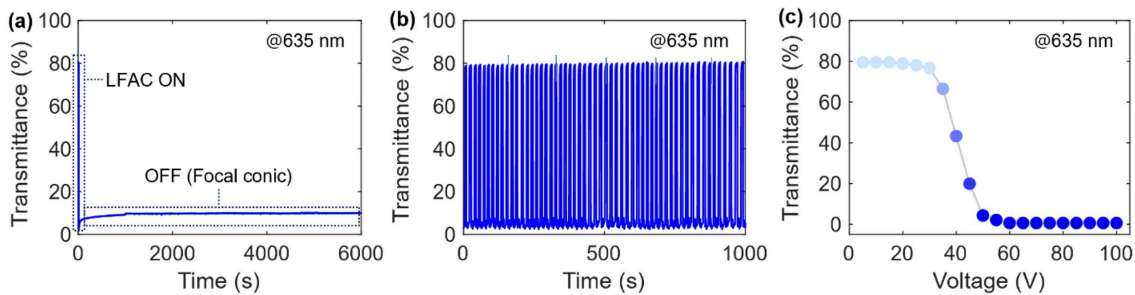


Figure 6. (a) Time-dependent transmittance of PSLC at 635 nm for 6000 seconds after the focal conic state is formed by applying and removing LFAC; (b) Cycling stability of the PSLC over the operation of 55 cycles; (c) Change in transmittance at 635 nm, as a function of applied voltage when LFAC is applied to PSLC.

5(b)에 제시된 투과율 응답에 해당한다. 포컬 코닉과 리셋 상태의 투과도 차이는 75.9%로 측정되었으며, 55회 반복 구동 후 그 투과도 차이는 75.2%로, 99% 수준의 성능을 유지하였다. Figure 6(c)는 제작된 PSLC에 LFAC 인가 시 전압에 따른 전압-투과도 곡선을 나타낸다. 이때, 모든 전압 조건에서 교류 전원의 주파수는 10 Hz로 설정되었다. 0 V부터 15 V의 전압 조건에서는 소자 투과율이 79.5%로 측정되었으며, 20 V 조건에서 소자 투과율이 78.9%로 감소하여 제작된 PSLC의 문턱 전압이 20 V임을 확인했다. 또한 60 V 이상의 전압 조건에서 소자 투과율이 0.6%로 일정하게 측정되어 제작된 PSLC의 포화 전압이 60 V임을 확인했다. 이러한 포화 전압은 리셋 상태와 포컬 코닉 상태 사이의 충분한 투과율 대비를 확보하기 위해 설정한 25 μm 의 셀 갭과, 전기장 인가 시 액정 재배열을 제한하는 고분자 네트워크의 안정화 효과에 기인한다. 본 연구에서는 PSLC에 충분한 전기장을 인가하여 포화된 광학 상태를 확보하기 위해 구동 전압을 90 V로 설정하였다. 이때 소자에 인가되는 전기장($E = V/d$)은 약 3.6 V/ μm (90 V/25 μm)이다. 기존 쌍안정 PSLC 연구에서 사용된 전기장 범위와 비교했을 때 과도하지 않은 수준이다. 또한 해당 조건에서 발열로 인한 열적 문제는 확인되지 않았다.^{27,47}

PSLC/액정 필름 결합 소자의 동작 특성. Figure 7은 PSLC와 액정 필름이 결합된 최종 소자의 리셋 및 포컬 코닉 상태의 가시광대역(400-750 nm) 반사 스펙트럼과 소자 사진을 나타낸다. 반사 스펙트럼 분석은 적분구를 이용하여 진행되었다.

Figure 7(a), 7(b), 7(c)는 PSLC 배면에 각각 R, G, B를 반사하는 카이랄 액정 필름을 형성한 소자의 측정 결과이다. R, G, B 카이랄 액정 필름의 반사 중심 파장은 각각 674 nm, 518 nm, 458 nm이다. Figure 7(a)에서 소자 반사율은 리셋 상태에서 36.1%, 포컬 코닉 상태에서 16.9%로 측정되어, 반사율을 19.2% 감소시킴을 확인했다. 포컬 코닉 상태에서 나타나는 잔여 반사는 적분구의 광수집 방식과 투명전극이 코팅된 유리 기판의 고유 반사에 기인한다. 포컬 코닉 상태의 PSLC는 입사광을 여러 방향으로 산란시키며, 적분구는 정반사뿐만 아니라 산란광까지 함께 수집되므로 측정 반사율이

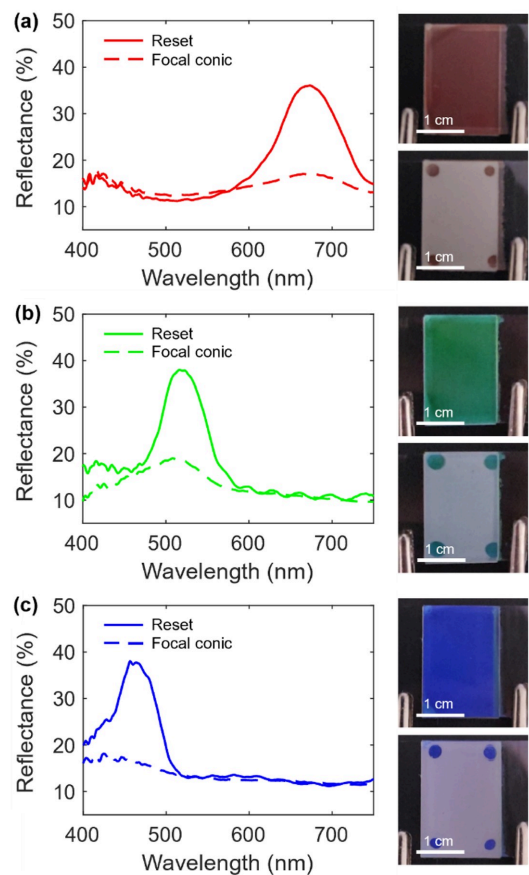


Figure 7. The reflection spectra and photographic images of (a) red; (b) green; (c) blue devices at the focal conic and reset state.

실제 정반사 성분보다 높게 나타날 수 있다.⁴⁸ Figure 7(b)에서 소자 반사율은 리셋 상태에서 37.8%, 포컬 코닉 상태에서 18.6%로 측정되어, 19.2% 감소한다. 마지막으로 Figure 7(c)에서 소자 반사율은 리셋 상태에서 37.9%, 포컬 코닉 상태에서 17.1%로 측정되어, 반사율이 20.8% 감소한다. 위 결과는 제작된 소자가 외부 광원을 활용하여 반사형 디스플레이로 활용될 수 있음을 시사한다.

결 론

본 연구에서는 투명 및 포컬 코닉 상태가 유지되는 쌍안정 PSLC 층과 그 배면에 R, G, B를 반사하는 카이랄 액정 필름을 형성한 반사형 디스플레이를 제안하였다. PSLC를 구성하는 RM257과 S811의 농도를 각각 1 wt%와 6 wt%로 최적화하여 투명 및 포컬 코닉 상태의 투과율 대비 78.1%를 확보했으며, 소자가 리셋(Reset) 상태일 때, 상부 PSLC의 투과율이 78.7%로 초기 상태와 동등한 수준의 투과도를 달성하였다. 6000초의 시간 동안 포컬 코닉 상태의 투과율 10% 미만과 55회 반복 구동 후 초기 성능 대비 약 99%의 투과율 변화를 나타냄을 확인했다. PSLC 소자 배면에 R, G, B 파장을 반사시키는 카이랄 액정 필름을 결합하여 최종 반사형 디스플레이 소자를 완성하였다. 제안한 소자는 R(674 nm), G(518 nm), B(458 nm) 파장에서 평균 37%의 높은 반사율을 나타냈으며, 소자가 포컬 코닉 상태일 때, 상부 PSLC의 투과율이 0.6%로 전환되어 반사율을 평균 17.5%로 감소시킬 수 있었다. 제안한 구조가 투명 상태에서의 색상 구현과 포컬 코닉 상태에서의 색상 은폐가 가능함을 보여주며, 반사형 컬러 디스플레이 구동에 요구되는 고대비 명암비 및 R, G, B 색 재현성을 갖추었음을 알 수 있다. 또한, 투명 또는 포컬 코닉 상태 유지를 위해 지속적인 전압을 인가해야 했던 기존의 PSLC와 다르게 해당 상태들을 전압을 제거한 후에도 유지할 수 있고, 이와 반사 필터를 결합하여 다양한 심도의 컬러 반사 이미지를 구현할 수 있도록 한다. 향후 이온 또는 나노 입자를 도핑하거나 셀 갭을 줄이는 등의 연구를 통해 전기적 응답성을 높임으로써 구동 전압을 낮출 수 있을 것으로 기대한다. 본 연구에서 제안한 구조는 투명 및 포컬 코닉 상태만을 구현하는 것을 넘어 다채로운 색상의 능동적인 제어 및 상태 유지에 추가적인 전력 소모가 필요하지 않은 저전력 구동 방식을 제시함으로써, 향후 저전력 반사형 컬러 디스플레이, 스마트 윈도우 등 차세대 디스플레이 장치에 응용될 수 있다.

감사의 글: 이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

참 고 문 헌

- Herle, D.; Martin, O. J. F.; Villanueva, L. G. 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 Conver.* **2019**, 6, 21.
- Yan, J.; Wu, S. T.; Cheong, K. L. A Full-Color Reflective Display

- Using Polymer-Stabilized Blue Phase Liquid Crystal. *Appl. Phys. Lett.* **2013**, 102, 081102.
- Hong, J.; Chan, E.; Chang, T. Continuous Color Reflective Displays Using Interferometric Absorption. *Optica* **2015**, 2, 589-597.
- Comiskey, B.; Albert, J. D.; Yoshizawa, H.; Jacobson, J. An Electrophoretic Ink for All-Printed Reflective Electronic Displays. *Nature* **1998**, 394, 253-255.
- Hayes, R. A.; Feenstra, B. J. Video-Speed Electronic Paper Based on Electrowetting. *Nature* **2003**, 425, 383-385.
- Somani, P. R.; Radhakrishnan, S. Electrochromic Materials and Devices: Present and Future. *Mater. Chem. Phys.* **2002**, 77, 117-133.
- Gu, C.; Jia, A. B.; Zhang, Y. M.; Zhang, S. X. A. Emerging Electrochromic Materials and Devices for Future Displays. *Chem. Rev.* **2022**, 122, 14679-14721.
- Cell, L. C.; Larger, W.; Gap, C. Reflective Liquid Crystal Display for Better Productivity. *Appl. Opt.* **2015**, 54, 3360-3364.
- 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.
- Fu, Q.; Yu, W.; Bao, G.; Ge, J. Electrically Responsive Photonic Crystals with Bistable States for Low-Power Electrophoretic Color Displays. *Nat. Commun.* **2022**, 13, 7007.
- Lu, H.; Zhu, S.; Wang, T.; Gu, Y.; Chen, W.; Qiu, Z.; Yang, B.-R.; Deng, S. Ultralow Power Consumption Coaxial-Structured Electrophoretic Display Fibers with Stretchability and Environmental Adaptability. *Adv. Fiber Mater.* **2025**, 7, 93-105.
- 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.
- Cai, G.; Wang, J.; Lee, P. S. Next-Generation Multifunctional Electrochromic Devices. *Acc. Chem. Res.* **2016**, 49, 1469-1476.
- 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.
- Bisquert, J. Analysis of the Kinetics of Ion Intercalation: Ion Trapping Approach to Solid-State Relaxation Processes. *Electrochim. Acta* **2002**, 47, 2435-2449.
- Zheng, J. Y.; Sun, Q.; Cui, J.; Yu, X.; Li, S.; Zhang, L.; Jiang, S.; Ma, W.; Ma, R. Review on Recent Progress in WO₃-Based Electrochromic Films: Preparation Methods and Performance Enhancement Strategies. *Nanoscale* **2023**, 15, 63-79.
- Kato, K.; Tanaka, K.; Date, M. Reflective Liquid Crystal Color Display Technologies. *Electron. Commun. Jpn. Pt. II.* **1998**, 81, 32-40.
- 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.
- Gwag, J. S. Optical Fine-Tuning for Improving the Dark Level of a Reflective Liquid Crystal Display. *Appl. Opt.* **2017**, 56, 1893.
- Ye, Y.; Guo, L.; Zhong, T. A Review of Developments in Polymer Stabilized Liquid Crystals. *Polymers* **2023**, 15, 2962.
- Pande, M.; Tripathi, P. K.; Misra, A. K.; Manohar, S.; Manohar, R.; Singh, S. Dielectric and Electro-Optical Properties of Polymer-

- Stabilized Liquid Crystal System. *Appl. Phys. A* **2016**, 122, 217.
23. Zhou, Y.; You, Y.; Liao, X.; Liu, W.; Zhou, L.; Zhang, B.; Zhao, W.; Hu, X.; Zhang, L.; Yang, H.; Zhou, G.; Yuan, D. Effect of Polymer Network Topology on the Electro-Optical Performance of Polymer Stabilized Liquid Crystal (PSLC) Devices. *Macromol. Chem. Phys.* **2020**, 221, 2000185.
 24. Zhang, Y.; Zhan, Q.; Wang, C.; Gao, J.; Zhou, G.; Zhao, W.; Chen, J. Unique Polymer-Stabilized Liquid Crystal Structure Prepared by Addition of a Reversible Addition-Fragmentation Chain Transfer Agent. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, 15, 51815-51822.
 25. Wang, S.; He, J.; Zeng, Y.; Yan, B.; Wang, Y. Effect of Polymer Structures on Electro-Optical Properties of Polymer Stabilized Liquid Crystal Films. *Front. Chem. Eng. China* **2008**, 2, 265-268.
 26. Ma, J.; Shi, L.; Yang, D.-K. Bistable Polymer Stabilized Cholesteric Texture Light Shutter. *Appl. Phys. Express* **2010**, 3, 021702.
 27. 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.
 28. Hu, W.; Chen, M.; Zhou, L.; Zhong, T.; Yuan, X.; Chen, F.; Zhang, L. Nonelectric Sustaining Bistable Polymer Framework Liquid Crystal Films with a Novel Semirigid Polymer Matrix. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2018**, 10, 22757-22766.
 29. Yang, D.-K.; West, J. L.; Chien, L.-C.; Doane, J. W. Control of Reflectivity and Bistability in Displays Using Cholesteric Liquid Crystals. *J. Appl. Phys.* **1994**, 76, 1331-1333.
 30. Zhang, M.; Li, X.; Long, Z.; Guo, R.; Gao, W.; Ma, H.; Sun, Y. Effect of Different Monomers on the Electro-Optical Properties of Reverse-Mode Polymer Stabilized Liquid Crystal. *J. Mol. Liq.* **2022**, 363, 119895.
 31. Li, H.; Xu, J.; Ren, Y.; Han, R.; Song, H.; Huang, R.; Wang, X.; Zhang, L.; Cao, H.; Zou, C.; Yang, H. Preparation of Highly Durable Reverse-Mode Polymer-Stabilized Liquid Crystal Films with Polymer Walls. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, 15, 2228-2236.
 32. Yun, C.; Saeed, M. H.; Kim, D.; Kim, K.; Choi, M.; Park, S.-C.; Na, J.-H. Reverse Mode Polymer-Stabilized Liquid Crystal Films via Thiol and Acrylic Azobenzene. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2023**, 5, 3919-3927.
 33. Hu, X.; Zhang, X.; Yang, W.; Jiang, X.; Jiang, X.; de Haan, L. T.; Yuan, D.; Zhao, W.; Zheng, N.; Jin, M.; Shui, L.; Schenning, A. P. H. J.; Zhou, G. Stable and Scalable Smart Window Based on Polymer Stabilized Liquid Crystals. *J. Appl. Polym. Sci.* **2020**, 137, 48917.
 34. Boyon, C.; Soldan, V.; Mitov, M. Bioinspired, Cholesteric Liquid-Crystal Reflectors with Time-Controlled Coexisting Chiral and Achiral Structures. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, 13, 30118-30126.
 35. Li, Y.; Luo, D.; Peng, Z. H. Full-Color Reflective Display Based on Narrow Bandwidth Templated Cholesteric Liquid Crystal Film. *Opt. Mater. Express* **2017**, 7, 16-24.
 36. Lim, C.; Bae, S.; Jeong, S. M.; Ha, N. Y. Manipulation of Structural Colors in Liquid-Crystal Helical Structures Deformed by Surface Controls. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2018**, 10, 12060-12065.
 37. 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.
 38. 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.* **2025**, 35, 2412298.
 39. White, T. J.; Bricker, R. L.; Natarajan, L. V.; Tondiglia, V. P.; Green, L.; Li, Q.; Bunning, T. J. Electrically Switchable, Photoaddressable Cholesteric Liquid Crystal Reflectors. *Opt. Express* **2010**, 18, 173-178.
 40. Yang, T.; Yuan, D.; Liu, W.; Zhang, Z.; Wang, K.; You, Y.; Ye, H.; de Haan, L. T.; Zhang, Z.; Zhou, G. Thermochromic Cholesteric Liquid Crystal Microcapsules with Cellulose Nanocrystals and a Melamine Resin Hybrid Shell. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2022**, 14, 4588-4597.
 41. Zhan, X.; Luo, D.; Yang, K.-L. Multifunctional Sensors Based on Liquid Crystals Scaffolded in Nematic Polymer Networks. *RSC Adv.* **2021**, 11, 38694-38702.
 42. 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, 13561-13572.
 43. Choi, J.-H.; Hwang, H. S.; Jang, H.-B.; Kim, S.-U.; Park, H.-L. Flexible Phototransistors Integrated with Chiral Liquid Crystal Encapsulating Film for Improving Color Selectivity and Stability. *ACS Appl. Electron. Mater.* **2024**, 6, 8094-8103.
 44. Li, X.; Ren, N.; Xiao, Y.; Li, X.; Lang, M.; Zhu, X. Construction and Regulation on Thiol-Acrylate Networks through Binary Polymerization of Thiol-Ene Polymerization and Free Radical Polymerization. *Macromolecules* **2024**, 57, 9867-9876.
 45. Sahin, M.; Ayalur-karunakaran, S.; Manhart, J.; Wolfahrt, M.; Kern, W.; Schlogl, S. Thiol-Ene versus Binary Thiol-Acrylate Chemistry: Material Properties and Network Characteristics of Photopolymers. *Adv. Eng. Mater.* **2016**, 19, 1600620.
 46. Lee, K. M.; Marsh, Z. M.; Crenshaw, E. P.; Tohgha, U. N.; Ambulo, C. P.; Wolf, S. M.; Carothers, K. J.; Limburg, H. N.; McConney, M. E.; Godman, N. P. Recent Advances in Electro-Optic Response of Polymer-Stabilized Cholesteric Liquid Crystals. *Materials* **2023**, 16, 2248.
 47. Zhou, Z.; Zhang, X.; Halder, S.; Hu, L.; Yang, D.-K. Bistable Polymer-Stabilized Cholesteric-Liquid-Crystal Window Based on Flexoelectric and Dielectric Effects. *Phys. Rev. Appl.* **2024**, 21, 024045.
 48. Karin, T.; Miller, D.; Jain, A. Nondestructive Characterization of Antireflective Coatings on PV Modules. *IEEE J. Photovolt.* **2021**, 11, 760-769.

출판자 공지사항: 한국고분자학회는 게재된 논문 및 기관 소속의
 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.