

전기변색 폴리머 박막의 카이로옵틱 스위칭

카이랄 광학 고분자와 빛의 상호작용은 카이로옵틱스, 스피트로닉스 그리고 키랄-스핀 선택성에서 핵심적인 역할을 한다. 지금까지 비대칭적인 고분자 박막을 제작하는 데는 많은 성과가 있었지만, 전기화학적 전환 과정에서의 카이랄 광학 활성에 대한 연구는 충분하지 않았다.

본 연구에서는 전기화학적으로 활성화된 고분자 필름이

본질적으로 원형 편광 투과 특성을 가지며, 매우 비대칭적인 카이랄 광학 활성을 나타낸다는 것을 제시한다. 이러한 광학적 특성은 분자 카이랄 템플릿이 존재하는 환경에서 폴리머 사슬이 급속히 고화되는 과정에서 형성되는 카이랄 정렬에서 기인한다. 또한, 전기화학적 전환을 통해 고분자의 카이랄 광학 특성을 효과적으로 조절할 수 있음을 확인하였다. 특히, 높은 도핑 상태에서는 카이랄 광학 활성이 크게 반전되면서, 양부호 원형이색성(CD) 스펙트럼이 단일 부호 CD 스펙트럼으로 전이되는 현상이 관찰되었다.

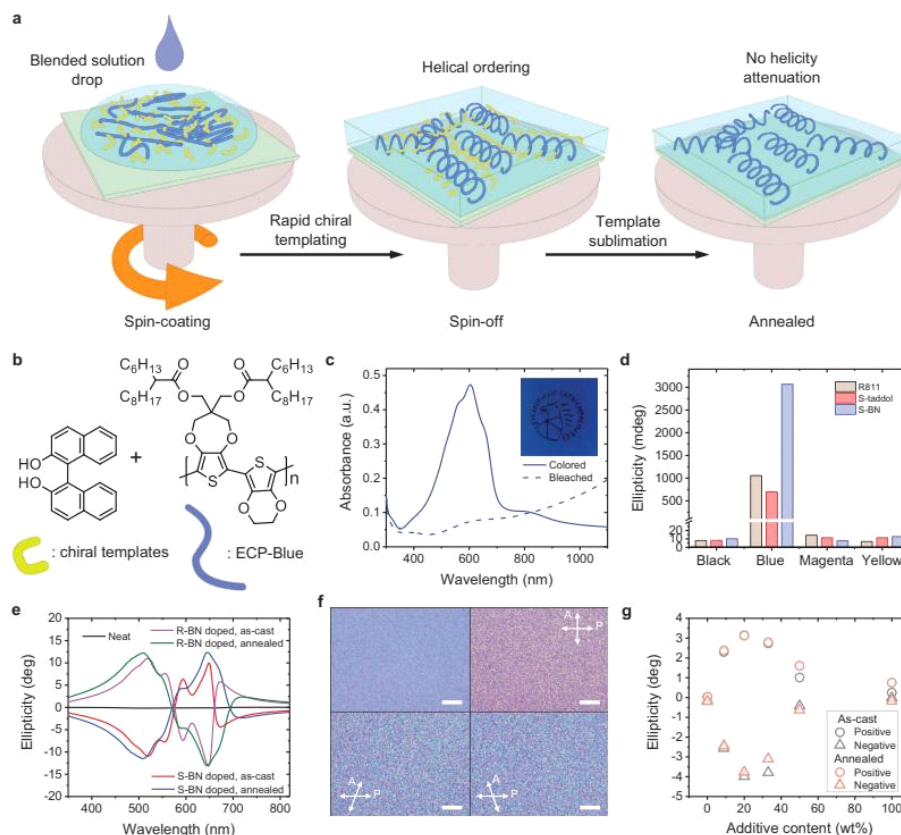


그림 1. 연구에서 사용된 카이랄 전기변색 고분자 필름. (a) 분자 카이랄 템플릿과 장거리 질서 공액 폴리머를 사용한 카이랄 과도 템플릿의 개략도. (b) 청색 전기변색 고분자 와 카이랄 첨가제의 분자 구조. (c) 환원 및 산화 상태에서의 ECP-Blue 필름의 광학 흡광 스펙트럼. 삽입된 그림은 환원된 상태에서의 ECP-Blue 필름의 사진 이미지를 보여줌. (d) 석영 플레이트 위 다양한 카이랄 템플릿 전기변색 고분자 필름이 보이는 최대 타원 강도. (e) 열적 어닐링 전후의 템플릿된 ECP-Blue films(25 wt% BN 첨가제, ~350 nm)의 최적화된 타원 스펙트럼. (f) 열 어닐링 후 S-BN과 혼합된 템플릿된 ECP-Blue films의 밝은 광학 현미경 및 편광 광학 현미경 이미지(즉, 교차 편광자 = 90°, 45° 및 135°). 스케일 바는 20 μm 를 나타냄. (g) 열 어닐링 전후의 템플릿된 ECP-Blue 필름의 최대 타원 강도를 보여줌.

특히 주목할 점은 원형 편광의 손잡이성과 카이랄 고분자의 카이랄 특성이 동기화됨에 따라 광학 대비와 색 변환 동역학이 크게 변화한다는 것이다. 본 연구에서 확인된 높은 비대칭 원형 편광 투과도(약 13,000 mdeg)는 원형 편광 필터를 통과할 때 육안으로도 뚜렷이 감지될 정도의 강한 광학적 변화를 유발했으며, 이는 삼자극 값(tristimulus values) 및 촬영된 색 변화 분석을 통해 명확히 입증되었다. 또한, 전기화학적으로 활성화된 고분자 필름은 등방성 카이랄 광학 활성을 가지므로 무작위 편광이나 입사각 변화에도 영향을 받지 않는다. 이는 해당 고분자 필름이 균질하고 본질적인 CD 특성을 갖고 있기 때문이다. 추가적인 광학 요소 없이 카이랄 전기변색 고분자 필름을 기반으로 한 원형 편광 투과형 디스플레이를 최초로 개발하였다. 이 카이랄 전기화학적 디스플레이는 넓은 시야각에서 우수한 성능을 발휘하며, 다양한 환경광 조건에서도 신호 간섭 없이 선명한 색 변화를 유지한다.

본 연구는 카이랄 폴리머의 단순한 공정성과 우수한 가공성을 활용하여, 플렉서블하고 고도로 집적된 칩 기반 플랫폼에서 원형 편광 부호화 투명 디스플레이를 구현할 수 있는 새로운 가능성을 제시한다.

본 연구결과는 “Chiroptical Switching of Electrochromic Polymer Thin Films”의 제목으로 2024년 *Advanced Materials*에 게재되었다.

◀I. Song et al., *Adv. Mater.*, **36**, 2307057 (2024), DOI: 10.1002/adma.202307057>

본질적으로 신축성 있는 유기 반도체를 기반으로 한 고성능 편광 분해 광검출기

기존의 팬크로매틱 광검출기는 빛의 강도를 측정하고 물체의 스펙트럼 정보를 제공한다. 하지만, 빛의 편광 상태나 위상을 감지하면 표면 특징, 음영 및 재료의 거칠기 등에 대한 더 풍부한 정보를 얻을 수 있어서 편광 감지 광검출기는 보통 추가적인 광학 부품 없이 빛의 강도와 편광 상태를 동시에 감지할 수 있도록 설계된다.

본 연구에서는 본질적으로 신축성이 뛰어난 고분자 도너 PNTB6-Cl과 비풀러렌 엑셉터 Y6로 구성된 자체 구동 유기 광검출기(OPD)를 제시한다. PNTB6-Cl:Y6 기반의 광활성 박막은 최대 100%의 변형률을 견디면서도 균열 없이 유지되며, 변형 정렬 후 높은 광학 이방성(1.8)을 나타낸다. 제작된 OPD는 미약한 빛도 감지할 수 있는 뛰어난 성능을 보이며, 높은 스펙트럼 응답도(0.45 AW^{-1})와 높은 특정 검출도 (10^{12} Jones)를 기록했다. 또한, 평행 및 수직 편광 조명 하에서 1.42의 높은 이방성 응답비를 나타내어 편광 감지 기능을 효과적으로 수행함을 확인하였다.

본 연구에서 제시한 OPD의 광검출 성능과 편광 감지 특성은 현재까지 보고된 유기 광검출기 및 편광 감지 광검출기 중 최고 수준에 속한다. 개념 증명 실험으로써, 본 연구에서는 편광 감지 OPD를 활용하여 자체 구동 방식의 편광 이미징 시스템과 폴-스토크스 편광계를 구축하여 실험적으로 검증했다.

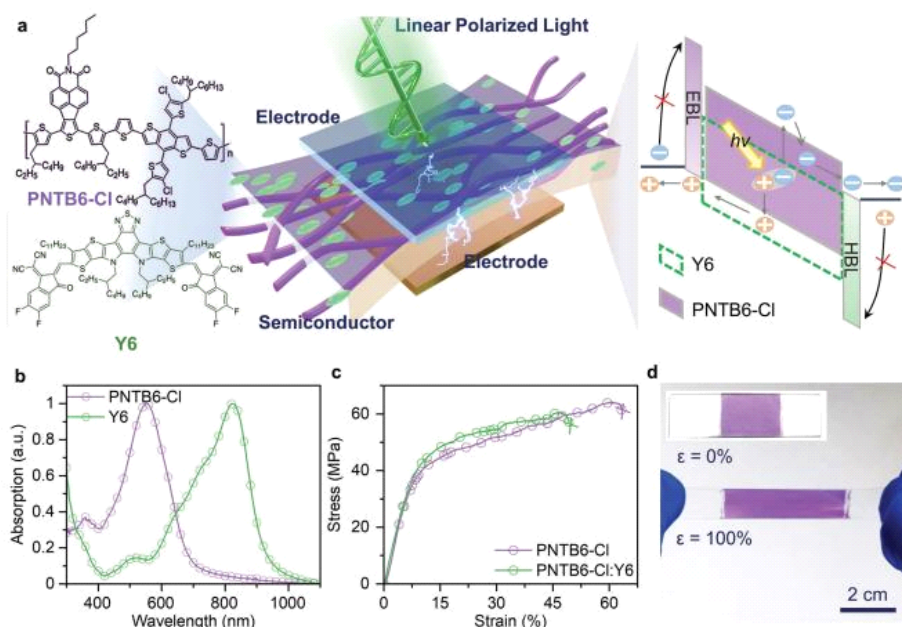


그림 2. 신축성 있는 편광 분해 광검출 가능한 고분자 필름 기반 소자. (a) 편광 분해 광검출기의 개략도. 왼쪽 부분은 PNTB6-Cl과 Y6의 화학 구조이고, 오른쪽 부분은 조명 하에서의 광검출기의 에너지 밴드 다이어그램. (b) PNTB6-Cl film과 Y6 film의 정규화된 흡수 스펙트럼. (c) 인장 시험을 사용한 PNTB6-Cl 및 PNTB6-Cl:Y6 필름의 응력-변형률 곡선. (d) PDMS 기판의 순수한 필름과 100% 변형된 필름의 사진.

이는 높은 신축성을 갖춘 유기 반도체가 최첨단 편광 이미지 및 분광학 응용에 활용될 가능성을 새롭게 제시하며, 차세대 유연 광전자 소자로서의 발전 가능성을 보여준다.

본 연구결과는 “High Performance Polarization-Resolved Photodetectors Based on Intrinsically Stretchable Organic Semiconductors”의 제목으로 2023년 *Advanced Science*에 게재되었다.

〈Y. Gao et al., *Adv. Sci.*, **10**, 2204727 (2023), DOI: 10.1002/adv.202204727〉

고성능 원형 편광 검출을 위한 유기 공여체-수용체 이중 접합

카이랄 광전자공학은 특정 카이랄 분자나 구조의 광자 특성을 이용하여 양자 정보와 암호화를 수행하는 핵심 기술이다. 기존의 위상지연판을 사용하지 않고도 소형화 및 통합된 형태의 원편광 광 검출 응용 요구가 증가하고 있다. 고효율성과 안정성을 갖춘 측면형 유기 원형 편광 광검출기의 개발은 원형 편광 광통신 및 집적 광소자 응용을 위한 필수적인 요소이다. 그러나 나선형 구조를 가진 카이랄 반도체는 일반적으로 낮은 전계 효과 이동도를 가지며, 이는 고성능 다중 파장 원형 편광 검출의 주요 한계점으로 작용한다.

이를 해결하기 위해, 본 연구에서는 도너-억셉터 이중접합 (D-A heterojunction) 기반의 다중 파장 원형 편광 광검출기

제작 전략을 제시한다. 여기서, 효율적인 엑시톤 분리를 통해 카이랄 억셉터 층이 유기 전계 효과 트랜지스터 (OFET)의 채널로 전달되는 정공 농도를 차별화할 수 있도록 설계하였다. 반도체/유전체 계면에서의 낮은 결합 밀도로 인해, 본 연구에서 제작된 광검출기는 약 500회 사이클 동안 3-4% 수준의 낮은 전류 감쇄를 보이며 우수한 안정성을 나타낸다. 또한, 대기 중 측정된 원형 편광 광검출기의 광전류 비대칭성 값은 0.24, 응답도는 0.28 A W^{-1} 로 확인되었다. 또한 카이랄 분자의 다중 피크 CD 신호에 따라 다중 파장 검출이 실현된다. 여기서 제공되는 장치 구조는 카이랄 분자의 흡수 비대칭성에 따라 검출 파장을 가시광선 영역 전체 또는 적외선 영역까지 확장할 수 있다.

추가적으로, 실시간 원형 편광 검출을 통해 광 신호를 디코딩하는 원형 편광 광통신 시스템을 구축하여 개념 증명 실험을 수행하였다. 본 연구는 대규모 원형 편광 광 집적 시스템의 구현 가능성을 제시하며, 차세대 편광 광전자 소자로서의 발전 가능성을 보여준다.

본 연구결과는 “Organic donor-acceptor heterojunctions for high performance circularly polarized light detection”의 제목으로 2022년 *Nature Communications*에 게재되었다.

〈D. Zhu et al., *Nat. Commun.*, **13**, 3454 (2022), DOI: 10.1038/s41467-022-31186-7〉

〈한문중, email: doorbell1@gachon.ac.kr〉

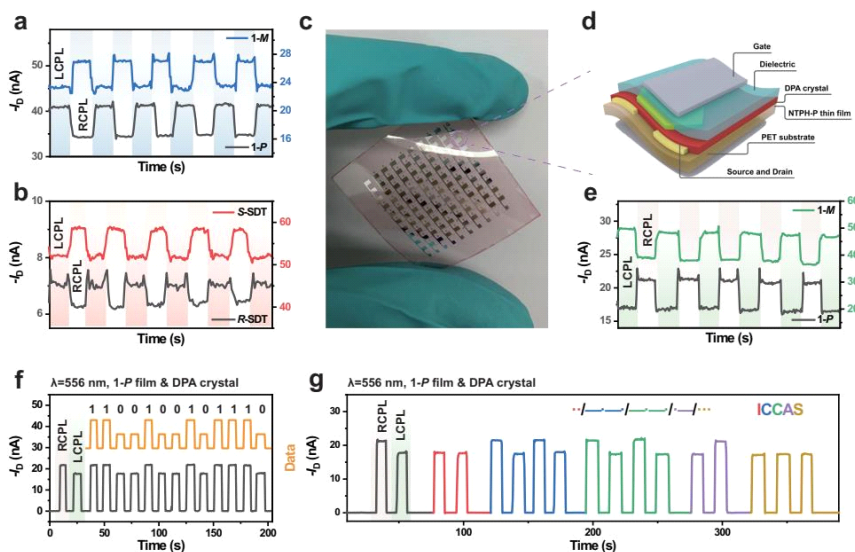


그림 3. 다파장 원형 편광 검출. (a) NTPH-P/DPA 결정 기반 광검출기의 488 nm 좌원편광 및 우원편광 빛에 따른 검출기의 실시간 전류값 변화. 파란색 음영과 회색 음영은 각각 좌원편광과 우원편광 빛으로 조사되는 것을 의미함. (b) SDT/DPA 결정 기반 광검출기의 700 nm 좌원편광 및 우원편광 빛에 따른 실시간 전류값 변화. 빨간색 음영과 회색 음영은 각각 좌원편광과 우원편광 빛으로 조사되는 것을 의미함. (c) 1-P/DPA 결정을 기반으로 한 유연 전자소자의 광학 현미경 이미지. (d) PET 기판 위에 제작된 유연 전자소자 구조. (e) NTPH-P/DPA 결정을 기반으로 한 유연 광검출기의 556 nm 좌원편광 및 우원편광 빛에 따른 검출기의 실시간 전류값 변화. 녹색 음영과 회색 음영은 각각 좌원편광과 우원편광 빛으로 조사되는 것을 의미함. (f, g) 1-P/DPA 결정을 기반으로 한 유연 광검출기의 정보 전송을 의미하며 모스 코드 암호화에 기반을 둔 빛 정보를 해독하는 예시를 제시함.