

유기 광전자 소자의 카이랄성 도입 전략과 응용

Strategies to Introducing Chirality into Organic Optoelectronic Devices and Their Applications

이한나 · 임정아 | Hanna Lee · Jung Ah Lim

Electronic and Hybrid Materials Research Center, Korea Institute of Science and Technology (KIST)
5 Hwarang-ro 14-gil, Seongbuk-gu, Seoul 02792, Korea
E-mail: jalim@kist.re.kr

1. 서론

원편광(circularly polarized light, CP light)은 회전하는 전기장을 가진 전자기파로, 차세대 광전자 기술의 핵심 광원으로 주목받고 있다. 원편광이 광감응 물질과 상호작용하면 전자의 회전 비편재화를 유도하여 자기 전이 쌍극자를 형성하고, 전자 스핀 모멘텀과 같은 자기적 특성을 소자의 정보 벡터로 활용할 수 있게 된다. 이러한 특성 덕분에 카이랄 광전자 소자 기술은 암호화, 3D 입체 이미징, 바이오센싱, 스핀트로닉스를 위한 스핀 편광 제어, 광학적 스핀 전달, 양자 통신 등 다양한 응용 분야에 새로운 가능성을 제시한다.

이러한 원편광의 잠재력을 실현하기 위해, 초기 카이랄 광전자 기술은 편광기나 위상 지연기 같은 부피가 큰 광학 부품을 기준 소자에 결합하는 방식으로 구현되었으나, 이는 집적 회로와의 호환성이 떨어져 실용적 응용에 한계가 있었다. 최근에는 나노입자, 페로브스카이트 소재, 메타표면, π -공액 분자 등 새로운 카이랄 나노소재의 도입으로 고효율·소형화·집적화가 가능한 카이랄 광전자 소자 개발이 활발히 이루어지고 있다.

다양한 카이랄 소재 중, π -공액 분자는 우수한 광흡수 및 발광 특성, 정밀한 분자 설계를 통한 물성 제어, 자기조립 기반을 통한 카이랄 광학 특성 구현 용이성 등의 장점으로 주목받고 있다. 더불어 저비용 공정성을 갖추고 있어 광범위한 상용화 가능성 또한 높다. 이러한 특성 덕분에 π -공액 분자는 카이랄 광전자 소자의 핵심 소재로 자리 잡았으며, 최근에는 강한 카이랄 광학 활성을 갖는 박막 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이로 인해, 원편광을 선택적으로 검출하거나 방출할 수 있는 소형 다기능 소자 기술이 본격적으로 구현되고 있다.

이러한 발전에도 불구하고, 카이랄 유기 광전자 소자의 성능과 기능성을 더욱 향상시키기 위한 체계적인 접근법은 여전히 필요한 상황이다. 본 특집에서는 유기 광전자 소자에 카이랄 광학 활성을 도입하는 두 가지 전략을 소개한다. 하나는 π -공액 고분자 반도체에 직접 카이랄성을 부여하는 방법이며, 다른 하나는 기존 유기 소자에 카이랄 구조를 통합하는 방식이다. 이러한 전략은 단순한 구조 제안을 넘어, 정보 보안 향상과 편광 기반 이미지 센싱 등 실질적 응용 분야로의 확장을 도모한다.

2. 본론

2.1 카이랄 광전자 소자의 측정 지표

카이랄 광전자 소자의 성능을 정량적으로 평가하기 위해서는 원편광 감지 능력과 광검출기로서의 성능을 종합적으로 고려해야 한다.

Author



이한나

2017 상명대학교 화공신소재학과 (학사)
2019 상명대학교 화공신소재학과 (석사)
2025 연세대학교 화공생명공학과 (박사)
2025-현재 한국과학기술연구원 (KIST)
(Post-Doc.)



임정아

2004 서강대학교 화학공학과, 화학과
(학사)
2006 POSTECH 화학공학과 (석사)
2009 POSTECH 화학공학과 (박사)
2010-현재 한국과학기술연구원 (KIST)
책임연구원

2.1.1 카이랄 선택성 및 원편광 감지 능력

카이랄 광전자 소자 평가에서 가장 핵심적인 지표는 비대칭 인자(g -factor)로, 입사된 좌·우선형 원편광에 따라 발생하는 광전류 차이를 정규화한 값이다. 이는 소자가 원편광의 편광 방향을 얼마나 잘 구별하는지를 정량적으로 나타내며, 다음과 같이 정의된다.

$$g_{ph} = 2 \left(\frac{I_{ph}^L - I_{ph}^R}{I_{ph}^L + I_{ph}^R} \right)$$

(I_{ph}^L : 좌선형 원편광 조사 시 발생하는 광전류

I_{ph}^R : 우선형 원편광 조사 시 발생하는 광전류)

이론적으로 비대칭 인자의 최대값은 2이다. 또한, 광전류 (I_{ph}) 차이뿐 아니라 응답도(R) 또는 단락 전류(I_{sc})를 기준으로도 계산할 수 있다.

2.1.2 광검출기 성능 지표

응답도(R)는 입사광 강도에 대비해 생성된 광전류의 비율로, 소자의 광-전기 변환 효율을 나타내는 대표적인 지표이다. 값이 클수록 입사광을 전기 신호로 변환하는 성능이 우수함을 의미한다.

$$R = \frac{I_{ph} - I_{dark}}{P_{in} \cdot A}$$

(I_{ph} : 광전류, I_{dark} : 암전류, P_{in} : 단위 면적당 입사광 강도, A : 채널 면적)

광/암전류비(P)는 암전류 대비 광 조사 시 증가한 전류의 비율로, 소자의 광감응성을 나타내는 지표이다. 값이 클수록 광 조사에 따른 전류 변화가 뚜렷해, 감지 성능이 우수한 소자로 평가된다.

$$P = \frac{(I_{light} - I_{dark})}{I_{dark}}$$

외부 양자 효율(EQE)은 입사된 광자 수에 대비해 생성된 전하 캐리어의 비율로, 소자의 광자-전자 변환 능력을 나타내는 지표이다. 응답도와 밀접한 관련이 있으며, 값이 높을수록 광 에너지를 전기 신호로 효과적으로 전환함을 의미한다.

$$EQE = \frac{(I_{ph} - I_{dark}) \cdot hc}{P_{in} \cdot q \cdot A \cdot \lambda}$$

(h : 플랑크 상수, c : 빛의 속도, q : 전자의 기본 전하량, λ : 입사광의 파장)

검출 능력(D^*)은 소자의 잡음 수준에 대한 신호 감지 성능을 나타내는 지표로, 구조나 면적이 다른 소자 간의 성능 비교에도

사용된다. 값이 높을수록 미약한 광신호도 효과적으로 감지할 수 있음을 의미한다.

$$D^* = \frac{R}{\sqrt{2 \cdot q \cdot I_{dark} / A}}$$

이러한 식을 사용해 D^* 를 계산할 경우, 특히 10^{13} Jones 이상의 높은 값을 주장할 때 성능이 과대평가될 수 있다. 실제 시스템에서는 열 잡음이나 플리커 잡음 등 다양한 잡음 요소가 함께 작용하기 때문이다

2.2 광전자 소자의 카이랄성 유도 전략

카이랄 광학 특성은 분자의 비대칭적 적층이나 π -공액 궤도의 비대칭 왜곡에 의해 유도되며, 이는 전하 이동을 방해해 고성능 소자 구현에 제약을 줄 수 있다. 따라서 전하 이동 특성을 유지하면서도 카이랄성을 효과적으로 부여할 수 있는 새로운 접근이 요구된다.

2.2.1 카이랄 분자와 π -공액 고분자간의 하이브리드화

강한 카이랄 광학 특성을 지닌 카이랄 분자와 우수한 전하 이동 특성을 갖는 π -공액 고분자를 혼합하는 전략은, 두 물질의 장점을 결합하는 효과적인 방식이다. 이 과정에서 카이랄 분자로부터 π -공액 고분자로 카이랄성이 전이되며, 상분리 구조나 분자 배열 구조가 광전자 소자의 성능에 영향을 미친다.

2.2.1.1 이중층 이종접합 구조

카이랄 분자층과 비카이랄 유기반도체층이 분리된 이중층 이종접합의 대표 사례로는, 카이랄 분자인 1,1'-binaphthyl-2,2'-diamine(BN)과 비카이랄 π -공액 고분자인 poly[3-(6-carboxyhexyl) thiophene-2,5-diyl](P3CT)를 혼합하여 형성된 하이브리드 박막이 있다(그림 1a).¹ 이 박막은 열처리를 통해 상분리가 유도되어, 상단에는 BN 마이크로결정이, 하단에는 P3CT 중심의 혼합층이 형성되며 독특한 이중층 구조를 이룬다. 형성된 박막에서는 BN의 흡수 영역에서 원편광 이색성 (circular dichroism, CD) 신호가 크게 증폭되었고, P3CT 흡수 영역에서도 미약하게 확장된 CD 신호가 관찰되었다. 이는 BN에서 P3CT로의 에너지 전달과 P3CT 전도대 내 새로운 에너지 상태 형성에 기인한 것으로 해석된다. 또한, 375 nm 원편광의 편광 방향에 따라 광다이오드 소자의 광전류 응답이 다르게 나타나는 특성이 확인되었다.

또한, Longzhen 연구팀은 카이랄 광학 특성이 조절 가능한 poly(9,9-di-n-hexylfluorene-alt-benzothiadiazole)(F6BT)와 전하 수송 특성이 우수한 poly(3-alkyl thiophene)(P3HT)로 구성된 이중층 구조를 기반으로, 광학적으로 프로그래밍 가능한

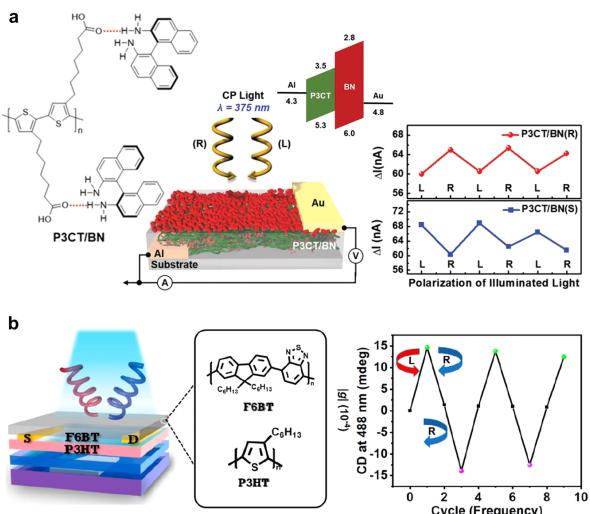


그림 1. 카이랄 분자와 π -공액 고분자간의 하이브리드화 시스템 예시: (a) P3CT/BN¹, (b) F6BT/P3HT² 이중층 이종접합 구조.

원편광 감응 소자를 개발하였다(그림 1b).² 조사된 원편광의 편광 방향에 따라 F6BT의 분자 사슬이 M형 또는 P형으로 뒤틀렸으며, 반대 방향의 원편광을 조사하면 CD 신호의 부호가 반전되었다. 해당 소자는 450 nm에서 비대칭 인자 0.425 및 응답도 2.76 A/W를 달성하였다.

2.2.1.2 벌크 이종접합 구조

카이랄 분자와 비카이랄 π -공액 고분자를 혼합하여 고분자에 카이랄성을 부여하는 방식은, 다양한 유기반도체 시스템에 적용 가능한 유연한 전략으로 주목받고 있다. 카이랄 분자로부터 유도된 카이랄성은 π -공액 고분자의 흡수 파장대까지 CD 응답을 확장시킬 수 있으며, 이에 따라 상분리, 분자 배열, 카이랄 전이 메커니즘 간의 상관관계를 정량적으로 이해하는 연구가 요구된다.

Feng 연구팀은 π -공액 단분자인 ITIC에 카이랄 첨가제(R5011 및 S5011)를 혼합하여 카이랄성을 유도하는 전략을 제안했다.³ 하이브리드 필름은 ITIC 흡수 파장대인 700 nm에서 CD 응답을 나타냈으며, 이는 ‘sergeants and soldiers’ 메커니즘에 따라 π - π 적층 구조의 비대칭 왜곡에서 비롯된 것으로 해석되었다. 해당 구조 기반의 광다이오드는 균적외선 영역에서 비대칭 인자 0.113 및 응답도 0.329 A/W의 성능을 보였다.

또한, 서울대 오준학 교수 연구팀은 동일한 카이랄 첨가제를 고분자 PCPDTTBTT와 혼합하여 나선형 π -적층이 형성된 정방형 2차원 기둥상 구조를 구현했다(그림 2a).⁴ 이 구조에서도 고분자 흡수 영역까지 카이랄성이 전이되었으며, 특히 카이랄 유도체 제거 이후에도, 또는 수용체(PC_{70}BM)와의 블렌딩한 후에도 CD 신호가 유지된 것이 특징이다. 해당 벌크 이종접합 소자는 비대칭 인자 -1.2의 우수한 성능을 보였다.

이러한 하이브리드 시스템 내 카이랄성 전달 메커니즘을

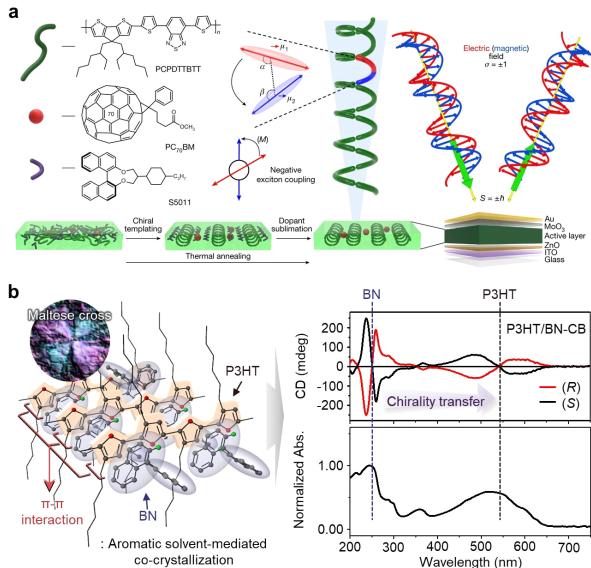


그림 2. 카이랄 분자와 π -공액 고분자간의 하이브리드화 시스템 예시: (a) PCPDTTBTT/PC₇₀BM/S5011 기반 벌크 이종접합 구조⁴, (b) P3HT/BN 하이브리드 박막의 결정구조 및 CD 특성.⁵

규명함으로써, 유기반도체에 카이랄성을 부여할 수 있는 범용적인 방법이 제시되었다(그림 2b).⁵ 특히 방향족 용매의 선택이 카이랄성 전달에 결정적인 역할을 한다는 점이 밝혀졌으며, 이는 분자 간 π - π 상호작용을 강화하고 두 물질 간 공동 결정화를 유도함으로써 카이랄성 전이에 핵심적으로 기여한다. 이러한 전략은 다양한 유기반도체 시스템에 폭넓게 적용 가능하며, 이를 바탕으로 카이랄 광전자 소자의 구현에 성공하였다.

2.2.2 카이랄 π -공액 고분자의 분자 설계 전략

π -공액 고분자의 알킬 결사슬에 카이랄 중심을 도입하는 것은, 고분자 박막 내에서 강한 카이랄 광학 특성을 유도할 수 있는 대표적인 분자 설계 전략이다. 실제로 poly(p-phenylene ethynylene), P3HT, polyfluorene(PFO) 등 다양한 π -공액 고분자에 카이랄 결사슬을 도입한 사례가 다수 보고 되었으며,⁶⁻⁸ 인접 사슬 간 엑시톤 결합에 의해 CD 응답을 나타낸다. 이 중 PFO는 주쇄의 비틀림 유연성에 기인한 강한 카이랄 광학 특성으로 주목 받고 있다(그림 3a).⁹ 그러나 방향족 고리의 비평면적인 구조는 분자 간 전자 결합을 약화시켜 전하 이동 특성을 저해되는 한계가 있다.

최근 개발된 *chiral-PBDT*는 이러한 한계를 극복하기 위해 공평면성을 유지한 전자 주개-받개 백본 구조에 카이랄 결사슬을 도입함으로써, 우수한 전기적 특성과 강한 카이랄성을 동시에 구현했다(그림 3b).¹⁰ 해당 고분자기반의 소자는 균적외선 영역에서 정공 이동도 $4.20 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 응답도 26.1 A/W, 비대칭 인자 0.5의 우수한 소자 성능을 나타냈다. 이러한 성능은 edge-on 방향의 라멜라 적층 구조와 cofacial

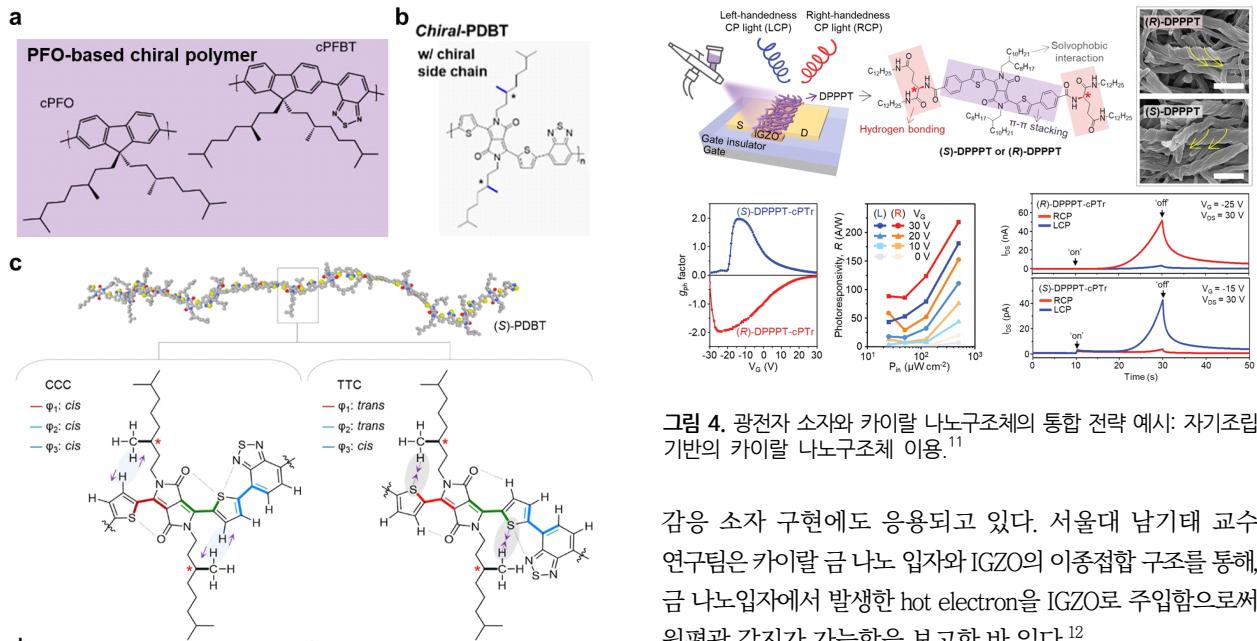


그림 3. 카이랄 π -공액 고분자의 분자 설계 전략 예시: (a) PFO 기반의 카이랄 고분자⁹, (b) chiral-PDBT¹⁰ 구조 및 (c) chiral-PDBT의 MD 시뮬레이션.¹⁰

적층, 그리고 결사슬의 비대칭 사슬 구조에 기인한 것으로 해석된다. 특히, 카이랄 결사슬이 유도한 회전 이성질체 형태는 π -전이쌍극자 모멘트의 대칭성을 깨뜨려, 원편광에 선택적으로 반응하는 전자 전이를 유도하는 데 핵심적인 역할을 한다 (그림 3c).

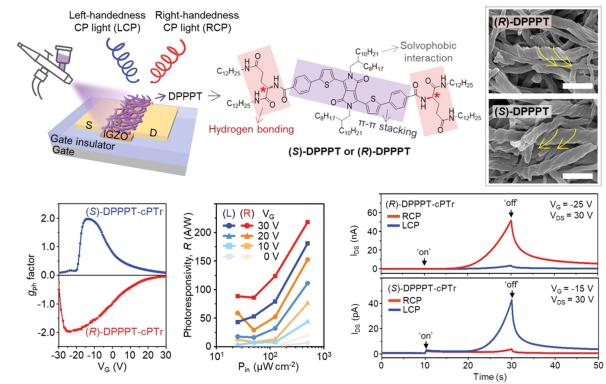
2.3 광전자 소자와 카이랄 나노구조의 통합 전략

2.3.1 자기조립 기반의 카이랄 나노구조

π -공액 분자의 초분자 구조 형성은 분자 수준의 카이랄성을 비공유 상호작용을 통해 초분자 수준으로 확장하고, 카이랄 광학 활성을 증폭하는 효과적인 전략이다. 이 과정에서 형성된 나노헬릭스 구조는 강한 카이랄 광학 활성을 나타내지만, 균일한 박막 형성이 어렵고 전하 이동 특성 확보에도 한계가 있어, 고성능 광검출기 응용에는 제약이 따른다.

이를 극복하기 위해, 높은 전자 이동도를 지닌 IGZO 트랜지스터를 기반으로, 강한 카이랄 광학 활성을 지닌 DPPPT 나노헬릭스를 적층하여 응답도 218 A/W, 광비대칭 인자 1.97을 달성한 원편광 감응 이종접합 광트랜지스터를 구현하였다 (그림 4).¹¹ DPPPT는 비공유 상호작용을 통해 강한 카이랄 광학 활성을 나타내는 초분자 구조를 형성하도록 세롭게 설계되었으며, IGZO와의 type-II 밴드 정렬에 따라, 계면 전하 이동이 유도된다. 또한, DPPPT/IGZO 계면에서는 전하 트래핑과 산소 공공의 이온화가 복합적으로 작용하여, 빛이 끼진 이후에도 광전류가 지속되는 시냅스 특성이 관찰된다.

이와 같은 IGZO 기반 이종접합 구조는 다양한 형태의 원편광



감응 소자 구현에도 응용되고 있다. 서울대 남기태 교수 연구팀은 카이랄 금 나노 입자와 IGZO의 이종접합 구조를 통해, 금 나노입자에서 발생한 hot electron을 IGZO로 주입함으로써 원편광 감지가 가능함을 보고한 바 있다.¹²

2.3.2 카이랄 나노아키텍처

CNC(Collage Nanocomposite) 액정 네트워크(CLCN)나 셀룰로오스 나노결정(CNC)과 같은 카이랄 유기 나노 구조를 기존 광전자 소자에 통합하는 방식도 활발히 연구되고 있다. 이러한 구조는 광여기 전하를 직접 생성하지는 않지만, 높은 원편광 감응성과 기존 광전자 소자와의 뛰어난 호환성을 바탕으로 효과적인 카이랄 광학 필터로 활용될 수 있다.

CNC는 우수한 기계적 강도와 생분해성을 갖춘 카이랄 광자결정으로, 좌선형 원편광은 반사하고 우선형은 투과시키는 특성을 지닌다. 습도에 따라 나선 피치가 변화하여 반사 파장을 550 nm에서 730 nm까지 조절할 수 있으며, 이러한 특성은 카이랄 광학 필터로서의 응용 가능성을 높인다(그림 5a).¹³ 최근에는 CNC 위에 π -공액 분자를 프린팅한 트랜지스터도 보고되었으며, 습도에 따라 포토닉 밴드갭이 조절되고, CNC

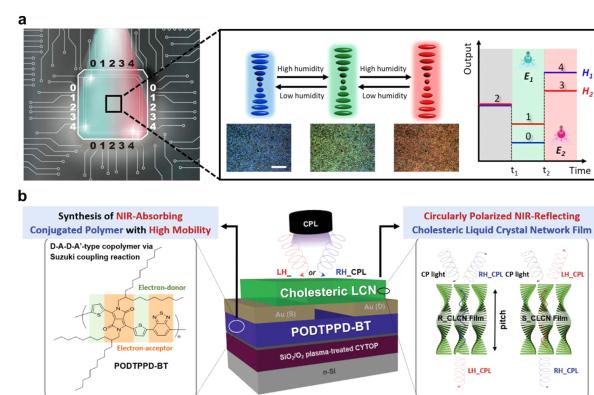


그림 5. 광전자 소자와 카이랄 나노구조의 통합 전략 예시: (a) CNC,¹³ (b) CLCN 필름¹⁵ 이용.

표 1. 전략 별 카이랄 유기 광전자 소자의 성능 지표

	Chiroptical materials	Wavelength (nm)	g_{ph} (or g_R)	R (A/W)
카이랄 분자 / π -공액 고분자 : 이중층 이종접합	P3CT/BN ¹	375	0.1	-
	F6BT/P3HT ²	450	0.425	2.76
카이랄 분자 / π -공액 고분자 : 벌크 이종접합	ITIC:R(S)5011 ³	700	0.113	0.329
	PCPDTTBTT: S(R)5011:PC ₇₀ BM ⁴	670	1.16	0.06
	P3HT:BN ⁵	520	0.2	-
카이랄 π -공액 고분자의 분자설계	cPFO or cPFB ⁹	405 479	0.83 (g_{abs})	-
	Chiral-PDBT ¹⁰	830 920	0.49 0.60	31.6 26.1
	DPPPT/IGZO ¹¹	520	1.97	218
	(S)-1/P3HT ¹⁷	450	0.83	3.52
광전자 소자와 자기조립 기반 카이랄 나노 구조체의 통합	CLCN film/POPTPPD-BT ¹⁵	830	1.9	300
	CLC film/PM6:Y6 ¹⁸	870	1.56	0.357
	ZnO/CNC ¹⁹	365	0.23	-

유전체/활성층 계면에서 전하가 축적되어 낮은 전압에서도 조절 가능한 광응답 특성을 나타낸다.¹⁴

CLCN 필름 역시 나선과 동일한 방향의 원편광은 반사하고 반대 방향은 투과시키는 성질을 가진다. 반사 파장은 카이랄 도펀트 농도에 따라 조절 가능하며, 습도의 영향을 받지 않아 안정적인 소자 응용이 가능하다. 이러한 특성을 활용해, CLCN 필름을 통합한 고성능 근적외선 원편광 감응 유기 광트랜지스터가 최초로 구현되었다(그림 5b).¹⁵ 해당 소자는 π -공액 고분자인 PODTPPD-BT 기반 트랜지스터 위에 CLCN 필름을 증착하여 830 nm 원편광에 선택적으로 반응하도록 설계되었고, 응답도 300 A/W, 비대칭 인자 1.9의 우수한 성능을 보였다. 특히, CLCN 필름이 없는 소자 대비 약 10배 향상된 응답도가 관찰되었으며, 이는 CLCN 다층 구조의 반사 방지 효과에 기인한다.

각 전략별 카이랄 광전자 소자의 성능 지표는 표 1¹⁶에 정리되어 있으며, 주요 지표와 함께 각 접근법의 상대적 강점과 한계에 대한 통찰을 제공한다.

2.3 카이랄 광전자 소자의 응용

최근 π -공액 카이랄 광전자 기술은 원편광 감응 광검출기, 이미지 센서, 원편광에 반응하는 암호화 소자 등으로 응용되고 있다.

특히, 신경망 기반 신호 인식에서 계산 부담을 줄이기 위한 센서 내 신호 처리(in-sensor signal process)가 주목 받으며,

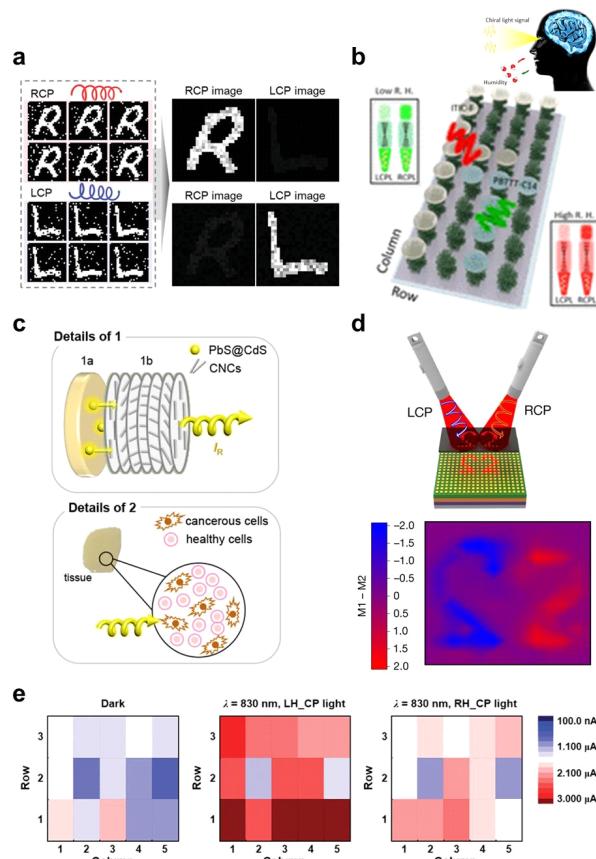


그림 6. 카이랄 광전자 소자의 응용 예시: (a) 이미지 센서,¹¹ (b) 이중 기능 시냅스 트랜지스터,¹⁴ (c) 암 조직 검출,²⁰ (d) 스핀 이미징,⁴ (e) 암호화 소자.¹⁵

이를 카이랄 광전자 소자에 적용하기 위해서는 원편광에 대해 단기 및 장기 시냅스 가소성을 나타내는 소자 구현이 필수적이다. 최근 π -공액 나노헬릭스 DPPPT와 IGZO 산화물 반도체로 구성된 이중층 이종접합 기반의 카이랄 시냅스 소자가 개발되었으며, 펄스에 따른 시냅스 반응을 통해, 노이즈 환경에서도 높은 원편광 선택성과 이미지 전처리 정확도 향상을 달성하였다(그림 6a).¹¹

또한, 카이랄 CNC 유전체와 π -공액 반도체로 구성된 이중층 이종접합 기반 소자는 색과 원편광을 동시에 구별할 수 있는 이중 기능 시냅스 트랜지스터로 구현되었다(그림 6b).¹⁴ CNC 유전체에 흡수된 수분이 전류 히스테리시스 방향과 원편광의 투과도를 동시에 조절함으로써, 흥분성 또는 억제성 시냅스 응답을 유도한다. 이를 통해 인공 신경망 기반의 복잡한 패턴 인식에서 습도 조건에 따른 문자 구분 정확도를 향상시킬 수 있음을 입증하였다.

한편, PDMS 매트릭스에 분산된 CNC 필름과 양자점 (QD)으로 구성된 이중층 필름은 암 조직 검출에 활용된 바 있다(그림 6c).²⁰ 세포 핵 형태의 차이에 따라, 암 조직에서는 건강한 조직보다 원편광 편광에 따른 차이가 작게 나타났으며,

이러한 특성은 알코올성 간염이나 궤양성 대장염 등 핵 비대가 동반되는 질환의 진단에도 응용 가능성을 제시한다.

카이랄 물질과 원편광 간의 상호작용은, 편광의 나선성에 따라 스핀 각운동량($S = \pm \frac{1}{2}$)을 유도할 수 있으며, 이는 양자 연산이나 스핀트로닉스와 같은 차세대 광전자 기술에 활용될 수 있는 고유한 특성이다. 최근에는 카이랄 π -공액 고분자 복합체 기반의 벌크 이종접합 구조를 이용하여, 스핀 각운동량 궤적을 시각화한 사례가 보고되었다(그림 6d).⁴ 해당 소자는 원편광 성분의 비율을 나타내는 원편광도(degree of circular polarization, DoCP)에 따라 광전류가 달라지는 특성을 나타냈으며, 이를 통해 단순한 선편광이나 원편광뿐 아니라 미지의 타원 편광에서도 나선성 정보를 추출할 수 있었다.

암호화 분야에서 원편광은 단일 파장으로 여러 정보를 제어할 수 있는 강력한 광원으로 주목받고 있다. 특히, 균적외선 영역에서 흡수하는 CLCN 필름과 π -공액 반도체를 결합한 카이랄 광트랜지스터 어레이이는 암호화 및 물리적 복제 불가능 함수(PUF) 소자로 구현되었다(그림 6e).¹⁵ 원편광에 따라 다른 전류 응답을 나타내는 특성을 활용하여, 다중 소자 어레이에서 비밀 키를 생성하고 보안성을 향상시킬 수 있다.

3. 결론

원편광 기반 광전자 소자를 구현하기 위한 고성능 카이랄 소자 및 소자 구조 개발이 필수적이다. 유기 광전자 소자에 카이랄 광학 활성을 도입하기 위한 대표적 접근법으로, (1) π -공액 고분자 자체에 카이랄성을 부여하는 전략과 (2) 카이랄 나노구조체를 기존 소자에 통합하는 전략을 소개하였다. 특히, 카이랄 분자/ π -공액 고분자 하이브리드 시스템 및 chiral-PDBT와 같은 카이랄 고분자 설계는 우수한 전기적 특성과 카이랄 활성 특성을 동시에 확보할 수 있는 가능성을 제시한다. 또한, IGZO 기반의 이종접합 구조나 CNC, CLCN과 같은 카이랄 유기 광자 구조체는 소자의 집적성과 안정성을 확보하면서도, 높은 원편광 감지 성능을 실현할 수 있는 유망한 플랫폼으로 주목된다. 향후에는 이러한 전략들을 복합적으로 결합하고, 소자 물성 간의 상호작용을 정밀하게 제어함으로써, 고감도·다기능 원편광 감응 소자 기술의 실용화 가능성을 한층 더 확장할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- N. Y. Kim, J. Kyhm, H. Han, S. J. Kim, J. Ahn, D. K. Hwang, H. W. Jang, B. K. Ju, and J. A. Lim, *Adv. Funct. Mater.*, **29**, 1808668 (2019).
- C. Zhang, C. Xu, C. Chen, J. Cheng, H. Zhang, F. Ni, X. Wang, G. Zou, and L. Qiu, *ACS Nano*, **16**, 12452 (2022).
- L. Wan, R. Zhang, E. Cho, H. Li, V. Coropceanu, J.-L. Brédas, and F. Gao, *Nat. Photonics*, **17**, 649 (2023).
- I. Song, J. Ahn, H. Ahn, S. H. Lee, J. Mei, N. A. Kotov, and J. H. Oh, *Nature*, **617**, 92 (2023).
- H. Lee, W. M. Takele, J. I. Kwon, C. Choi, D. Kim, J. H. Cho, T. G. Habteyes, and J. A. Lim, *Adv. Funct. Mater.*, **34**, 2409982 (2024).
- L. A. Kane-Maguire and G. G. Wallace, *Chem. Soc. Rev.*, **39**, 2545 (2010).
- B. Langeveld-Voss, R. Janssen, and E. Meijer, *J. Mol. Struct.*, **521**, 285 (2000).
- C. Kulkarni, M. H. van Son, D. Di Nuzzo, S. C. Meskers, A. R. Palmans, and E. Meijer, *Chem. Mater.*, **31**, 6633 (2019).
- J. Wade, J. N. Hiltiker, J. R. Brandt, L. Liirò-Peluso, L. Wan, X. Shi, F. Salerno, S. T. Ryan, S. Schöche, and O. Arteaga, *Nat. Commun.*, **11**, 6137 (2020).
- H. Han, J. H. Choi, J. Ahn, H. Lee, C. Choi, W. Jung, J. Yeom, D. K. Hwang, B. J. Sung, and J. A. Lim, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **15**, 57447 (2023).
- H. Lee, J. H. Hwang, S. H. Song, H. Han, S. J. Han, B. L. Suh, K. Hur, J. Kyhm, J. Ahn, and J. H. Cho, *Adv. Sci.*, **10**, 2304039 (2023).
- S. D. Namgung, R. M. Kim, Y.-C. Lim, J. W. Lee, N. H. Cho, H. Kim, J.-S. Huh, H. Rhee, S. Nah, and M.-K. Song, *Nat. Commun.*, **13**, 5081 (2022).
- M. J. Han, M. Kim, and V. V. Tsukruk, *ACS Nano*, **16**, 913684 (2022).
- M. J. Han and V. V. Tsukruk, *ACS Nano*, **17**, 18883 (2023).
- H. Han, Y. J. Lee, J. Kyhm, J. S. Jeong, J. H. Han, M. K. Yang, K. M. Lee, Y. Choi, T. H. Yoon, and H. Ju, *Adv. Funct. Mater.*, **30**, 2006236 (2020).
- H. Lee, D. Kim, J. H. Cho, and J. A. Lim, *Acc. Mater. Res.*, **6**, 434 (2025).
- Y. Xue, C. Zhang, T. Lv, L. Qiu, and F. Wang, *Angew. Chem.*, **135**, e202300972 (2023).
- Q. Wang, J. Bao, L. Liu, Y. Yang, J. Yang, H. Gao, T. Liu, H. Dong, Y. Wu, and Y. Zhang, *Nano Today*, **54**, 102132 (2024).
- B. Zhang, S. Zhao, Y. Yu, M. Li, L. Zhao, and L. Gao, *Nanomaterials*, **11**, 3098 (2021).
- D. Lu, M. Li, X. Gao, X. Yu, L. Wei, S. Zhu, and Y. Xu, *ACS Nano*, **17**, 461 (2022).