

원편광 감지를 위한 유기 카이랄 전자소자

Organic Chiral Electronic Devices for Circularly Polarized Light Detection

배준호 · 조명훈 · 송인호 | Junho Bae · Myeonghun Cho · Inho Song

Department of Chemical Engineering, Chung-Ang University,
84, Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul 06974, Korea
E-mail: ihsong@cau.ac.kr

1. 서론

오른손과 왼손같이 거울상과 서로 겹쳐지 않는 것을 거울상 이성질체(enantiomer)라고 하며, 이는 서로 반대되는 카이랄성(chirality)을 갖는다고 표현한다. 분자의 경우, 거울상 이성질체 간 밀도, 분자량, 생성 엔탈피와 같은 물리적인 특성이 동일하기 때문에 이러한 특성을 통해 거울상 이성질체의 카이랄성을 구분할 수는 없고, 카이랄성을 가지는 다른 대상과의 상호작용을 통해서만 구분할 수 있다.¹ 다른 물질과 쉽게 상호작용을 할 수 있으면서도, 카이랄성을 가지는 대표적인 매개체 중 하나가 바로 원편광이다.

원편광은 양자 컴퓨팅,² 암호화 통신,³ 스피드로닉스,⁴ 편광 이미지 처리⁵와 같은 차세대 응용 분야에서 중요한 역할을 한다. 빛과 물질 간의 상호작용으로 인한 빛의 편광 상태의 변화는 화학 조성·구조, 표면 거칠기와 같은 물질의 특성을 반영하기 때문이다. 따라서 원편광과 같은 다양한 광학 정보를 복합적으로 감지할 수 있는 광센서의 경우, 혹독한 환경에서도 인식하려는 대상을 효율적으로 감지할 수 있다. 실제로 갯가재, 갑오징어, 꿀벌, 귀뚜라미와 같은 다양한 생명체는 망막에서 편광을 인식하여, 시각적 대비를 강화하고 더 나은 탐색 및 소통이 가능하다.⁶⁻⁸

이러한 원편광의 잠재력을 이용하기 위해서는 원편광의 고유한 광학 신호를 전기 신호로 직접 변환하는 과정이 필수적인데, 기존의 광센서는 원편광의 편광상태를 구별하기 위해 부피가 큰 외부 광학계를 도입하는 간접적인 방식을 이용하였다. 이러한 간접적인 원편광 감지 전략은 정교한 광학 설계를 해야 할 뿐 아니라 복잡한 공정과 비용 상승으로 이어진다.^{5,9} 따라서 비교적 저렴하고, 가볍고, 유연하며, 용액 공정이 용이한 유기 소재의 장점을 살려 원편광 감지 유기 전자 소자 연구에 대한 관심이 증가하였다.

본 총설에서는 카이랄 유기 반도체를 기반으로 한 광전자 소자 중 원편광 유기 광센서에 집중하여 소개한다. 먼저, 원편광 광센서의 이해를 돋기 위해 원편광과 원편광 광센서의 성능 지수(figure of merit)를 설명한다. 그 후, 다양한 유형의 원편광 광센서의 작동 원리와 연구 현황에 대해 다룰 것이다.

Author



배준호

2020-현재 중앙대학교 화학신소재공학부
(학사)



조명훈

2019-현재 중앙대학교 화학신소재공학부
(학사)



송인호

2014 울산과학기술원 나노생명화학공학부 (학사)
2019 포항공과대학교 화학공학과 (박사)
2019-2021 서울대학교 공학연구원 전문연구요원
2021-2024 Purdue University (Post-Doc.)
2024-현재 중앙대학교 화학공학과 조교수

2. 본론

2.1 원편광

빛은 전기장과 자기장이 서로 수직으로 진동하는 횡파이다. 자기장 벡터는 맥스웰 방정식에 따라 전기장 벡터와 독립적이지 않기 때문에 주로 전기장 벡터만 고려하게 된다. 빛의 진행 방향을 z 축이라고 할 때, 전기장 벡터(\vec{E})는 x 성분(\vec{E}_x)과 y 성분(\vec{E}_y)으로 분해될 수 있으며, 두 성분의 진폭과 위상차에 따라 빛의 편광 상태가 결정된다.¹⁰

\vec{E}_x 와 \vec{E}_y 의 위상차가 $\pm\pi$ 또는 0 일 경우, 전기장 벡터는 전파 방향의 수직인 평면에서 진동한다. 이러한 빛은 선형 궤적을 그리며 나아가게 되고, 이를 선편광이라고 한다(그림 1a).

\vec{E}_x 와 \vec{E}_y 의 진폭이 같고, 위상차가 $\pm\frac{\pi}{2}$ 일 경우, 전기장 벡터는 크기와 방향 모두 시간에 따라 주기적으로 변하게 된다. 이러한 빛은 원형 궤적을 그리며 나아가게 되고 이를 원편광이라고 한다(그림 1b). 원편광은 회전 방향에 따라 좌원편광과 우원편광으로 나눌 수 있다. \vec{E}_y 가 \vec{E}_x 보다 위상이 빨라 위상차가 $-\frac{\pi}{2}$ 일 경우, 왼쪽으로 회전하는 궤적을 그리게 되며, 이를 좌원편광이라고 한다. 그 반대의 경우, 위상차가 $+\frac{\pi}{2}$ 가 되며, 오른쪽으로 회전하는 궤적을 그리는 빛을 우원편광이라고 한다. 이러한 특성으로 원편광은 spin angular momentum(SAM)과 같은 고유한 스핀 신호를 갖게 된다. 원편광을 이용한 양자 컴퓨팅, 암호화 통신, 스핀트로닉스, 편광 이미지 처리와 같은 차세대 기술로의 응용은 원편광의 고유한 스핀 신호를 직접 판독하고, 전기 신호로 변환하는 것이 주요한 도전 과제이다.

2.2 원편광 광센서 성능지수

광센서의 성능을 평가하는 중요한 지표에는 감광도(photoresponsivity, R), 광전류/암전류 비율(photocurrent/dark current ratio, P), 외부 양자 효율(external quantum efficiency, EQE), 특이 검출도(specific detectivity, D^*) 등이 있다. 이러한

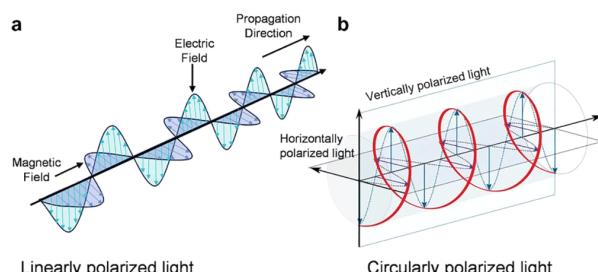


그림 1. 대표적인 편광 (a) 전기장 벡터의 x , y 성분의 위상차가 $\pm\pi$ 또는 0 일 때, 선편광, (b) \vec{E}_x 와 \vec{E}_y 의 진폭이 같고, 위상차가 $\pm\pi/2$ 일 때, 원편광.

성능지수는 광센서의 전류-전압 특성($I-V$ characteristic)으로부터 얻을 수 있다.¹¹

원편광 광센서의 성능을 평가하는 요소로는 앞서 언급한 광센서 성능지수와 더불어 원편광의 회전 방향을 구별하는 능력에 대해서도 고려해야 한다. 원편광이 소재의 카이랄성에 따라 흡광 및 산란과 같은 상호작용의 차이를 보이는 현상을 원형 이색성(circular dichroism, CD)이라고 한다. 또, 이러한 상호작용의 차이를 비율로 나타낸 값이 비대칭 계수(dissymmetry factor, g)이다.¹ 이렇듯 원편광 광센서의 성능지수는 소자가 원편광을 감지할 때, 광학 신호를 전기 신호로 바꾸는 능력에 관해 나타내는 지표이다.

R 과 P 는 일반적으로 다음과 같이 정의된다:

$$R = \frac{I_{ph}}{P_{inc}} = \frac{I_{light} - I_{dark}}{P_{inc}} \quad (1)$$

$$R = \frac{I_{ph}}{I_{dark}} = \frac{I_{light} - I_{dark}}{I_{dark}} \quad (2)$$

I_{ph} 는 광전류이며, 빛을 감지하였을 때, 생성되는 전류, I_{light} 와 빛이 없을 때도 존재하는 전류, I_{dark} 의 차이이다. P_{inc} 는 조사된 빛의 세기이다. EQE는 빛에 의해 형성되어 순환하는 전하의 수와 소자에 입사된 광자의 수의 비율로 정의한다:

$$EQE = \frac{I_{ph}hc}{eP_{inc}\lambda} = \frac{(I_{light} - I_{dark})hc}{eP_{inc}\lambda} \quad (3)$$

h 는 플랑크 상수(Plank constant), c 는 빛의 속도, e 는 단위 전하량, λ 는 조사된 빛의 파장을 의미한다.

검출도(Detectivity)는 일반적으로 검출할 수 있는 가장 작은 신호를 말한다. D^* 는 다양한 종류 또는 면적의 광센서를 비교하는 데 유용한 지표이며, 광센서의 민감도를 평가하는 척도이다. D^* 는 아래와 같은 식에 의해 $\text{cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ (Jones)라는 단위를 갖는다¹²:

$$D^* = \frac{\sqrt{A}}{\text{NEP}} \quad (4)$$

$$\text{NEP} = \frac{I_n}{R\sqrt{B}} \quad (5)$$

위 식에서 A 는 활성층의 면적, NEP(noise-equivalent power)는 잡음 전류 스펙트럼 밀도, $I_n/B^{1/2}$ 가 생성되기 위해 필요한 빛의 세기를 말한다. 여기서 I_n 은 잡음 전류, B 는 대역폭을 의미한다. 이때, I_{dark} 에 의한 산탄 잡음(shot noise)이 주된 잡음일 경우, 특이 검출도 식은 아래와 같이 정리할 수

있다:

$$D^* = \frac{R}{\sqrt{2eI_{dark}/A}} \quad (6)$$

원편광 광센서가 원편광 특성을 분별하는 지표로는 비대칭 계수가 있으며, 이는 일반적으로 실험에서 측정하고자 하는 것에 따라 광전류(g_{ph}), 감광도(g_R), 또는 단락 전류(g_{sc})로 나타낼 수 있다. 위 매개변수는 물질에 조사된 원편광의 회전 방향에 따른 흡광도 차이(g_{abs})로부터 기인한다.⁹ 그 중 g_{abs} 와 g_{ph} 를 살펴보면 좌원편광과 우원편광의 특성 차이를 정규화한 값으로 정의된다:

$$g_{abs} = 2 \left(\frac{A_L - A_R}{A_L + A_R} \right) \quad (7)$$

$$g_{ph} = 2 \left(\frac{I_L - I_R}{I_L + I_R} \right) \quad (8)$$

A_L 과 A_R 은 각각 좌원편광 흡광도, 우원편광 흡광도를 나타내며, I_L 과 I_R 은 각각 좌원편광과 우원편광에 의해 형성된 광전류를 나타낸다.

2.3 원편광 유기 광센서

Si와 InGaAs와 같은 무기 반도체를 이용한 전통적인 원편광 광센서는 그 자체로 카이랄성을 갖지 못하므로, 원편광 감지를 위해서는 선편광판과 위상지연판과 같은 외부 광학계를 사용하여야 한다. 외부 광학계를 도입한다면 정밀하게 편광 상태를 분류할 수 있지만, 이는 공정 비용 상승과 더불어 소자의 소형화와 집적화를 어렵게 하는 요소이다.^{5,6} 유기물은 무기물에 비해 저렴하고, 유연하며, 용액 공정이 가능하고, 그 자체로 강한 원형 이색성을 가지는 물질이 많기 때문에 원편광 감지 소자에 적합하다.

광센서는 전극의 개수에 따라 크게 두 종류로 분류할 수 있으며, 소자 구성에 따라 포토컨덕터, 포토다이오드, 포토트랜지스터로 나눌 수 있다. 포토컨덕터와 포토다이오드는 이단자 소자(two-terminal device)에 해당하며, 포토트랜지스터는 삼단자 소자(three-terminal device)에 해당한다.

이러한 소자 구성에 의해 소자마다 독특한 감지 특성과 한계를 갖게 된다(그림 2).¹⁰

각 소자의 원편광 감지 능력을 정확하게 판단하기 위해서는 원편광을 감지하였을 때, 소자의 전류-전압 특성과 원편광을 얼마나 즉각적으로 감지하는지 알 수 있는 실시간 측정이 수반되어야 한다.⁹

2.3.1 원편광 유기 포토컨덕터

포토컨덕터는 이단자 소자로 유기 반도체층과 양 끝에 전극이 수평적으로 존재한다(그림 2a). 포토컨덕터가 빛을 감지하면, 빛에 의해 유도된 엑시톤(exciton)이 형성되며, 전위차에 의해 자유 전하로 분리된다. 분리된 전자와 정공은 유기 반도체 내에서 유효 질량이 서로 달라 이동도(mobility)의 차이가 생기게 된다. 그 중 이동이 더 빠른 쪽이 다수 전하(major charge carrier)이며, 더 느린 쪽이 소수 전하(minor charge carrier)가 된다. 전기장이 인가되었을 때, 전하 이동도가 더 큰 다수 전하는 소수 전하와 재결합(recombination)하여 사라지기 전까지 회로를 순환할 수 있기 때문에 100% 이상의 EQE를 가질 수 있다. 그러나 포토컨덕터는 상대적으로 긴 채널의 길이와 낮은 전하 밀도로 인해 저항이 크기 때문에 상대적으로 높은 구동 전압이 필요하다.

Jiang Tang 연구진은 유기물과 무기물의 원편광 상호작용, 전하 이동 특성에서 상호보완적 관계를 유도하기 위해서 카이랄 유·무기 하이브리드 폐로브스카이트를 합성하였다(그림 3a).⁶ a-Phenylethylamine(a-PEA)의 벤젠 고리에서 π 결합은 카이랄 아민과 PbI_6^{4-} 매트릭스 간 전기적 상호작용을 용이하게 하여 원편광 흡광 특성을 향상시켰다. 유연한 polyethylene terephthalate(PET) 기판 위에 용액 공정을 통한 폐로브스카이트 박막을 형성하여 100번의 구부림 이후에도 CD, I_{ph} 비대칭 계수의 구부림 저항성 평가를 거쳤다(그림 3b,c). 또한, Mingjian Yuan 연구진은 [(R)- β -MPA]₂ MAPb₂I₇, quasi-2D 카이랄 폐로브스카이트를 합성하여 기존의 2D 카이랄 폐로브스카이트 원편광 감지 소자보다 더 나은 광전류, 감광 특성을 보였다.¹³ 나아가 PET 기판 위 카이랄 폐로브스카이트 박막을 형성하여 유연한 광센서를 만드는 연구를 진행하였다. 위 연구를 통해서 카이랄 유·무기

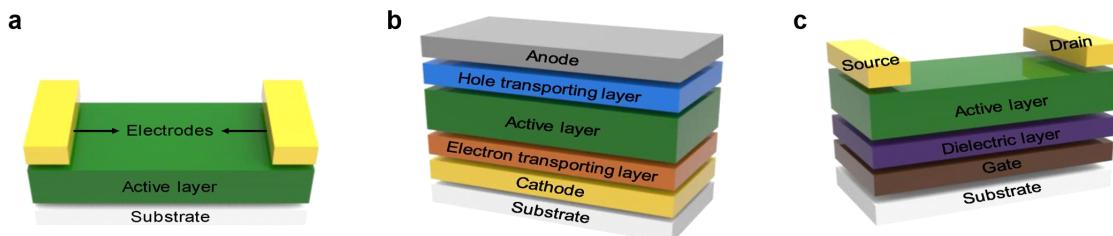


그림 2. 대표적인 원편광 감지를 위한 유기 카이랄 전자소자 구성. (a) 포토컨덕터, 유기 반도체 양 끝 전극의 수평적 구조, (b) 포토다이오드, 전극을 사이로 여러 다양한 계면층이 존재하는 수직적 구조, (c) 포토트랜지스터, 소스, 드레인, 게이트, 유기 반도체, 유전체 등으로 이루어짐.

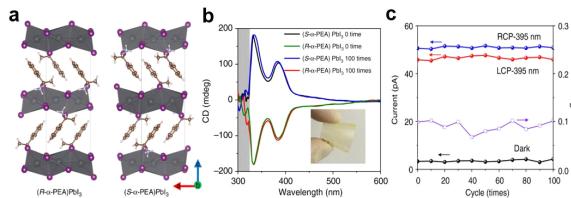


그림 3. 카이랄 페로브스카이트 결정 구조 및 (α -PEA) PbI_3 박막의 성능. (a) (R- α -PEA) PbI_3 와 (S- α -PEA) PbI_3 의 결정 구조, (b) PET 기판 위 제작된 (α -PEA) PbI_3 박막을 100번 구부린 후 CD 스펙트럼, (c) 구부림에 따른 g_{ph} , I_{light} , I_{dark} , g_{sc} 의 변화.

하이브리드 페로브스카이트의 카이랄 연성 소재 및 웨어러블 소자로의 응용 가능성을 확인하였다.

이렇듯 대부분의 카이랄 페로브스카이트는 원편광 포토컨덕터로 이용되며,¹⁴⁻¹⁶ 앞서 언급된 연구에서는 인체에 해로운 Pb를 다량 함유하고 있다. 따라서 최근에는 무연납 하이브리드 페로브스카이트를 이용한 원편광 감지 포토컨덕터 연구 또한 진행되고 있다.¹⁷

2.3.2 원편광 유기 포토다이오드

포토다이오드는 위·아래에 위치한 전극 사이에 유기 반도체 활성층이 존재하는 이단자 소자이다(그림 2b). 활성층에 빛이 조사되면, 빛 에너지에 의해 유도된 전자-정공 쌍이 생성되며, 안정적인 에너지 준위로 이동하기 위해 전자는 양극으로, 정공은 음극으로 이동하는 특징이 있다. 따라서 효과적인 엑시톤 분리를 위해 포토다이오드를 구성하는 활성층, 전하 수송층, 전극 간 에너지 준위 정렬 및 계면 특성이 중요한 역할을 한다.

포토다이오드는 전압을 인가하지 않을 때, photovoltaic mode로 작동하고, 역방향 전압을 인가하면, photoconductive mode로 작동할 수 있다. Photovoltaic mode의 경우, 낮은 암전류와 신호의 안정성이 높다. 그러나 불가피한 전하 재결합으로 인해 100% 미만의 EQE를 갖는다. Photoconductive mode의 경우, 역방향 전압이 인가되어 더 넓어진 공핍 영역으로 인해 높은 감광도를 얻을 수 있다.

2010년 Stefan C. J. Meskers 연구진은 poly(fluorene-*alt*-dithienylbenzothiadiazole)(PFDTBT)에 카이랄 결사슬을 합성하여, 카이랄 π -conjugated 고분자를 이용한 포토다이오드를 처음으로 제작하였다(그림 4a).¹⁸ 비교군으로 같은 고분자에 비카이랄 결사슬을 도입하였고, 카이랄 결사슬을 합성한 카이랄 고분자에서만 원형 이색성 현상이 나타나는 것을 확인하였다. 이중층 구조는 카이랄 고분자와 C_{60} 으로 제작하였으며, 0.01 수준의 g_{ph} 값을 기록하였다(그림 4b). 이후 같은 그룹에서 카이랄 squaraine 유도체, ProSQ-C6와 fullerene acceptor, PCBM을 혼합하여 별크 이종접합(bulk heterojunction) 포토다이오드를 제작하였다. 이렇게 얻어진 소자는 단락 회로 조건에서 0.1의 g_{ph} 값을 기록하였다(그림 5a,b).¹⁹ 초분자적

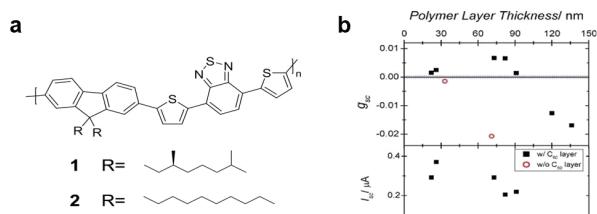


그림 4. 카이랄 결사슬 도입으로 인한 카이랄성 부여. (a) PFDTBT와 카이랄 결사슬, 비카이랄 결사슬의 분자 구조, (b) 박막 두께에 따른 g_{sc} 와 평균 단락회로 광전류.

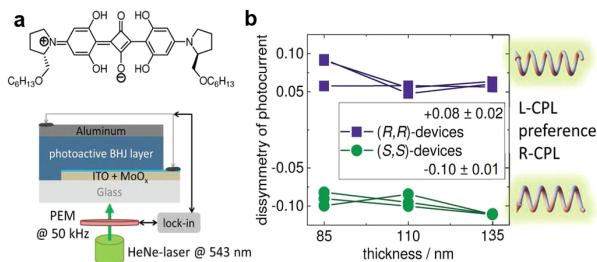


그림 5. 별크 이종접합을 이용한 포토다이오드 및 성능. (a) ProSQ-C6의 분자 구조 및 포토다이오드 구성, (b) 543 nm 원편광 조사 시 측정된 g_{sc} .

응집이 유지됨에 따라 상당한 CD 반응을 보인 것을 통해 해당 전략의 중요한 점은 별크 이종접합을 형성하는 동안 엑시톤 상호작용이 방해받지 않도록 하는 것임을 알 수 있다.

2021년 Matthew J. Fuchter 연구진은 비카이랄 고분자, poly(9,9-diethylfluorene-*alt*-bithiophene)(F8T2)에 카이랄 저분자, 1-aza[6]helicene를 혼합하였다. 이를 통해 전자 주개층(electron donor layer)을 형성하였고, C_{60} 으로 전자 받개층(electron acceptor layer)을 형성하여 평면 이종접합 구조의 포토다이오드를 제작하였다.²⁰ 본 연구에서는 D-A(도너-액셉터, donor-acceptor)층의 두께에 따른 소자의 성능에 주목하였으며 이를 조절하여 8.4% EQE, 0.72의 g_{ph} 와 7 μ s의 평균 응답속도를 보였다.

2023년 Wei Qin 연구진은 비카이랄 고분자, poly[[1,2,5]thiadiazolo[3,4-*c*]pyridine-4,7-diyl(4,4-dihexadecyl-4*H*-cyclopenta[2,1-*b*:3,4-*b*']dithiophene-2,6-diyl)][1,2,5]thiadiazolo[3,4-*c*]pyridine-7,4-diyl(4,4-dihexadecyl-4*H*-cyclopenta[2,1-*b*:3,4-*b*']dithiophene-2,6-diyl]](PCDTPT)에 카이랄 유도체, (R)/(S)-(+)limonene을 첨가하여 PCDTPT에 카이랄성을 제공하였다.²¹ PCDTPT:PCBM의 D-A 별크 이종접합 포토다이오드를 제작하였다. 이를 통해 300 nm의 자외선 영역부터 1100 nm의 근적외선 영역까지의 원편광 감지를 실현하였다. 해당 포토다이오드는 6 A W⁻¹의 감광도, 1.5×10^{12} Jones의 검출도를 기록하였다. 또한, 외부 자기장을 인가하여 0.18의 g_{ph} 를 0.23으로 향상시켰다. 카이랄성에 의해 생성된 orbital angular momentum이 spin-orbit coupling을 유발할 수 있었다. 이로 인해 빛 조사 시

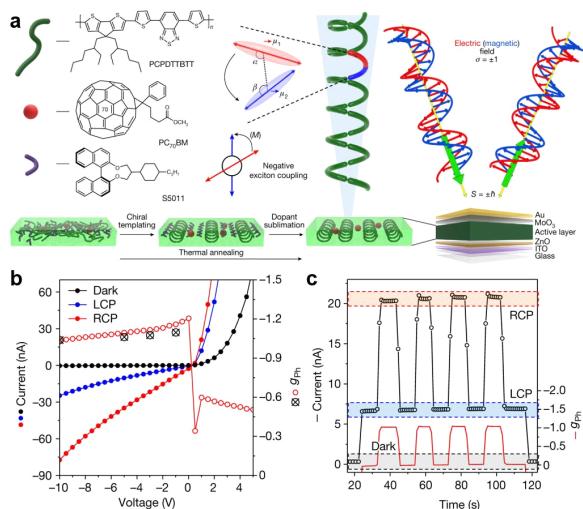


그림 6. 카이랄 doprant를 이용하여 비카이랄 고분자에 카이랄성을 부여한 방법. (a) PCPDTTBTT와 카이랄 dopant R5011, S5011의 분자 구조, (b) 포토다이오드의 전류-전압 특성과 g_{ph} , (c) 원편광에 대한 측각적인 반응을 보기 위한 실시간 측정.

생성된 singlet 전자-정공 쌍이 외부 자기장 조건에서 triplet으로 전이될 수 있는데, triplet의 경우, 전자-정공 쌍의 해리 속도가 빠르기 때문에 전체 광전류를 증가시킬 수 있다. 이러한 현상으로 인해 외부 자기장을 인가하였을 때, 원편광 감지 시, 광전류 비대칭성을 증가시킬 수 있었다.²²⁻²⁵

2023년 오준학 교수 연구진은 1.2의 높은 비대칭 계수를 가지는 포토다이오드를 제작하였다(그림 6a-c). Poly[2,6-(4,4-bis(2-ethylhexyl)-4H-cyclopenta-[2,1-b:3,4-b']dithiophene)-alt-4,7-bis(thiophen-2-yl)benzo-2,1,3-thiadiazole] (PCPDTTBTT)에 카이랄 1,1'-bi-2-naphthol 유도체인 R5011과 S5011을 섞어 높은 광학적 활성을 보이는 유기 반도체층을 제작하였다.⁵ 이렇게 제작된 박막은 열처리를 통해 카이랄 dopant를 승화시켜 비카이랄 전도성 고분자에 카이랄성을 부여하였다. 더 나아가 빛의 스핀 신호를 실시간 시공간적 시각화하여 편광 이미지 처리 및 바이오 이미지 처리의 응용 가능성을 확인하였다.

2.3.3 원편광 유기 포토트랜지스터

포토트랜지스터는 삼단자 소자로 많이 연구되었던 유기 전계 효과 트랜지스터(OFET)와 장치 구성이 동일하다(그림 2c). 따라서 소스(source), 드레인(drain), 게이트(gate)가 존재하며, 게이트에 전압을 인가하여, 소스와 드레인 사이에 형성되는 채널(channel)의 전기전도도를 조절할 수 있다. 조사된 빛 또한, 채널의 전기전도도와 전하 주입 장벽을 변화시킬 수 있기 때문에, 포토트랜지스터는 이단자 소자에 비해 증폭된 I_{ph} 와 EQE 값을 얻을 수 있다. 그러나 일반적으로 포토트랜지스터에서 수평적 전하 이동 거리는 μm 인데 반해, 포토다이오드는 수직적 구조로 nm 규모의 전하 이동을 보이므로,

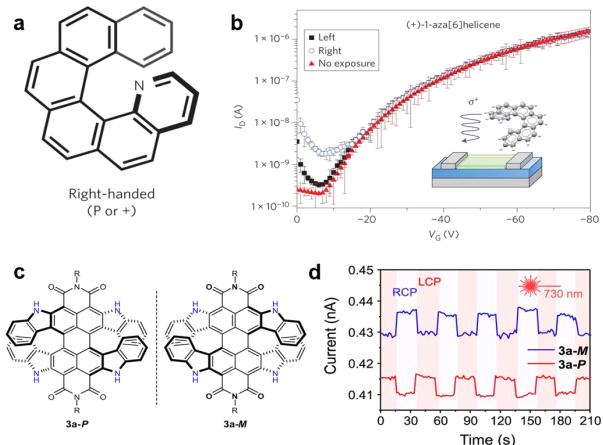


그림 7. 나선험 분자 구조의 카이랄 유기 반도체를 이용한 포토트랜지스터. (a) (+)-1-aza[6]helicene의 분자 구조, (b) 파장, 365 nm, 세기, 10 mW cm^{-2} 의 원편광이 조사될 때, (+)-1-aza[6]helicene의 전류-전압 특성($V_D = -60 \text{ V}$), (c) PDI와 helicene을 skeleton merging하여 합성한 분자 구조, (d) 실시간 원편광 감지 특성.

포토트랜지스터가 포토다이오드에 비해 응답 속도에서 불리하다.

2013년 J. Campbell 연구진은 처음으로 카이랄 유기 반도체, (+/-)-1-aza[6]helicene을 이용하여 유기 트랜지스터 기반 원편광 감지 소자를 제작하였다(그림 7a).²⁶ 순수한 1-aza[6]helicene 거울상 이성질체 박막에 원형 이색성이 가장 크게 나타나는 365 nm 파장의 빛을 조사하였을 때, 원편광의 편광 상태와 helicene의 카이랄성이 들어맞는 경우, OFF current의 값이 증가하는 특성을 관측하였다(그림 7b). 그러나 racemic helicene은 위와 같은 선택적인 원편광 반응이 나타나지 않는 사실을 밝혀내었다. 그 뒤로 카이랄 유기 반도체를 이용하여 원편광을 감지할 수 있는 다양한 접근 방식의 유기 포토트랜지스터 개발 연구가 지속되었다.

Li Zhang 연구진은 skeleton merging approach를 통해 [7]heterohelicene의 왜곡된 π 구조로 인한 우수한 원편광과의 상호작용과 PDI의 평면 π 적층 구조로 인한 높은 전하 이동도를 모두 가질 수 있는 ortho- π -extended PDI double-[7]-heterohelicene을 합성하였다(그림 7c).¹¹ 확장된 π -conjugated 구조는 균적외선 영역에서 원편광과의 상호작용이 향상되었고, 양극성 전하 이동 특성이 나타났다. 이렇게 제작된 원편광 유기 포토트랜지스터는 p-type mode와 n-type mode에서 각각 450 A W^{-1} , 120 A W^{-1} 의 감광도와 89% 외부 양자 효율을 보였다(그림 7d).

최근에 오준학 교수 연구진은 binaphthyl(BN)의 카이랄 특성과 n형 유기 반도체 naphthalenediimide(NDI)의 특성을 모두 가질 수 있도록 BN-linked NDIs를 합성하였다.²⁷ 해당 연구에서는 카이랄 물질의 순도를 나타내는 enantiomeric excess (ee)에 따라 다른 적층 특성을 보였다. ee가 100%에 가까울수록 nanowire의 형태를, 0%에 가까울수록 nanoparticle의 형태를

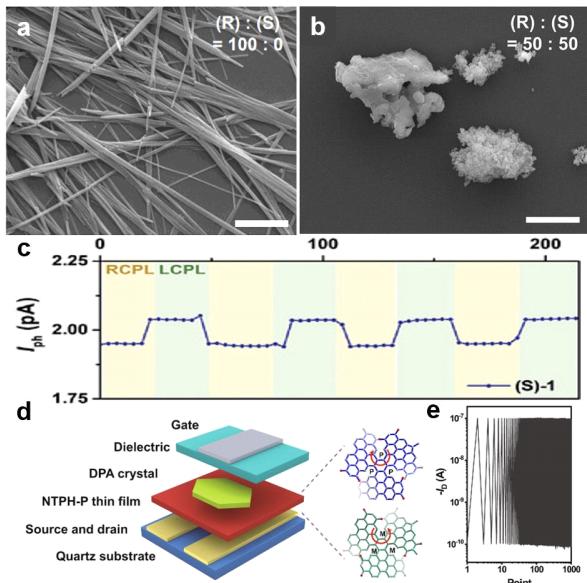


그림 8. 유기 단결정을 이용한 원편광 감지 포토트랜지스터. Enantiomeric excess에 따른 자가 조립 구조 SEM 이미지 (a) 100%, (b) 0% (scale bar: 3 μ m), (c) 385 nm의 원편광 조사 시 실시간 광전류 측정, (d) 이중층 도너-억셉터 이종접합 포토트랜지스터, (e) Cycle 검사($V_D = -60$ V, $V_G = 10 \sim -60$ V).

보였다(그림 8a,b). 이렇게 제작된 포토트랜지스터는 $0.22 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 의 전하 이동도와 3.9×10^{12} Jones의 검출도를 갖는다(그림 8c).

Lang Jiang 연구진은 chiral multiple helicene C_2 -symmetric triple [5]helicene based on N-annulated triperylene hexaimide (NTPH)와 p형 유기반도체인 2,6-diphenylanthracene(DPA)를 이용하여 이중층 D-A 이종접합을 형성하였다.²⁸ NTPH는 카이랄 억셉터 박막에 해당하며, DPA 유기 단결정 도너와 소스, 드레인 전극 사이에 위치한다(그림 8d). 해당 구조를 이용하여 원편광에 의해 형성된 엑시톤을 D-A 계면에서 효과적으로 분리할 수 있고, 반도체/유전체 계면 결합을 줄여 안정적인 소자 성능을 보였다(그림 8e). 이렇게 제작된 포토트랜지스터는 공기 중에서 0.24 의 g_{ph} , 0.28 A W^{-1} 의 R 을 가지며, 500 cycle 이후 약 3~4%의 전류 저하만을 보였다.

3. 결론

카이랄 유기 재료를 기반으로 하는 유기 카이랄 광전자 소자는 아직 초기 단계이지만, 여러 뛰어난 연구진의 노력으로 상당한 발전을 이루었다. 그러나 높은 성능을 보이는 전자 소자 개발을 위해 사용할 수 있는 카이랄 유기 전자 재료와 방법론의 다양성은 여전히 부족한 상황이다. 게다가, 원편광 감지에 대한 정확한 메커니즘 또한 해결해야 할 과제이다. 이러한 문제에도 카이랄 유기 재료의 간편한 비대칭 분자 설계 및 가공성, 자가 조립, 기계적 유연성, 대면적 처리 및

가격 경쟁력과 같은 장점을 활용한다면, 더욱 뛰어난 유기 카이랄 전자 소자의 개발로 이어질 것이라고 예상한다. 이 분야의 연구가 더욱 활발해지고 무르익게 되면, 카이랄 유기 소재는 차세대 기술로 주목받는 양자 기술, 바이오 기술에서도 이용될 것이다.

참고문헌

- Y. Tang and A. E. Cohen, *Phys Rev Lett*, **104**, 163901 (2010).
- J. F. Sherson, H. Krauter, R. K. Olsson, B. Julsgaard, K. Hammerer, I. Cirac, and E. S. Polzik, *Nature*, **443**, 557 (2006).
- Q. Wang, J. Bao, Y. Zhang, Y. Wang, D. Qiu, J. Yang, J. Zhang, H. Gao, Y. Wu, H. Dong, H. Yang, and Z. Wei, *Adv Mater*, **36**, e2312396 (2024).
- F. Pulizzi, *Nat Mater*, **11**, 367 (2012).
- I. Song, J. Ahn, H. Ahn, S. H. Lee, J. Mei, N. A. Kotov, and J. H. Oh, *Nature*, **617**, 92 (2023).
- C. Chen, L. Gao, W. Gao, C. Ge, X. Du, Z. Li, Y. Yang, G. Niu, and J. Tang, *Nat Commun*, **10**, 1927 (2019).
- M. Dong, Y. Zhang, J. Zhu, X. Zhu, J. Zhao, Q. Zhao, L. Sun, Y. Sun, F. Yang, and W. Hu, *Adv Mater*, **36**, e2409550 (2024).
- Q. Liu, Q. Wei, H. Ren, L. Zhou, Y. Zhou, P. Wang, C. Wang, J. Yin, and M. Li, *Nat Commun*, **14**, 7179 (2023).
- J. Ahn, S. H. Lee, I. Song, P. Chidchob, Y. Kwon, and J. H. Oh, *Device*, **1**, 100176 (2023).
- M. Zhang, X. Wu, Z. Wang, L. Sun, Y. Ren, Y. Liu, R. Li, R. Ding, Y. Wei, F. Yang, J. Feng, and W. Hu, *Adv Funct Mater*, DOI: 10.1002/adfm.202423932 (2025).
- L. Zhang, I. Song, J. Ahn, M. Han, M. Linares, M. Surin, H.-J. Zhang, J. H. Oh, and J. Lin, *Nat Commun*, **12**, 142 (2021).
- F. P. García de Arquer, A. Armin, P. Meredith, and E. H. Sargent, *Nat Rev Mater*, **2**, 16100 (2017).
- L. Wang, Y. Xue, M. Cui, Y. Huang, H. Xu, C. Qin, J. Yang, H. Dai, and M. Yuan, *Angew Chem Int Ed*, **59**, 6442 (2020).
- T. Liu, W. Shi, W. Tang, Z. Liu, B. C. Schroeder, O. Fenwick, and M. J. Fuchter, *ACS Nano*, **16**, 2682 (2022).
- W. Wu, X. Shang, Z. Xu, H. Ye, Y. Yao, X. Chen, M. Hong, J. Luo, and L. Li, *Adv Sci*, **10**, 2206070 (2023).
- Y. Zhao, Y. Qiu, J. Feng, J. Zhao, G. Chen, H. Gao, Y. Zhao, L. Jiang, and Y. Wu, *J Am Chem Soc*, **143**, 8437 (2021).
- D. Li, X. Liu, W. Wu, Y. Peng, S. Zhao, L. Li, M. Hong, and J. Luo, *Angew Chem Int Ed*, **60**, 8415 (2021).
- J. Gilot, R. Abbel, G. Lakhwani, E. W. Meijer, A. P. H. J. Schenning, and S. C. J. Meskers, *Adv Mater*, **22**, E131 (2010).
- M. Schulz, F. Balzer, D. Scheunemann, O. Arteaga, A. Lützen, S. C. J. Meskers, and M. Schiek, *Adv Funct Mater*, **29**, 1900684 (2019).
- M. D. Ward, J. Wade, X. Shi, J. Nelson, A. J. Campbell, and M. J. Fuchter, *Adv Opt Mater*, **10**, 2101044 (2022).

● 특집 | 원편광 감지를 위한 유기 카이랄 전자소자

21. R. Hu, X. Lu, X. Hao, and W. Qin, *Adv. Mater.*, **35**, 2211935 (2023).
22. O. B. Dor, S. Yochelis, S. P. Mathew, R. Naaman, and Y. Paltiel, *Nat. Commun.*, **4**, 2256 (2013).
23. R. Naaman, Y. Paltiel, and D. H. Waldeck, *Nat. Rev. Chem.*, **3**, 250 (2019).
24. K. Ray, S. P. Ananthavel, D. H. Waldeck, and R. Naaman, *Science*, **283**, 814 (1999).
25. S. G. Ray, S. S. Daube, G. Leitus, Z. Vager, and R. Naaman, *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 036101 (2006).
26. Y. Yang, R. C. da Costa, M. J. Fuchter, and A. J. Campbell, *Nat. Photonics*, **7**, 634 (2013).
27. Y. Kwon, J.-Y. Jung, W. B. Lee, and J. H. Oh, *Adv. Sci.*, **11**, 2308262 (2024).
28. D. Zhu, W. Jiang, Z. Ma, J. Feng, X. Zhan, C. Lu, J. Liu, J. Liu, Y. Hu, D. Wang, Y. S. Zhao, J. Wang, Z. Wang, and L. Jiang, *Nat. Commun.*, **13**, 3454 (2022).