카이랄 나노소재의 광학 및 구조 분석법

Optical and Structural Characterization of Chiral Nanomaterials

권준영·엽지현 | Junyoung Kwon·Jihyeon Yeom Department of Materials Science and Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), 291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Korea E-mail: jhyeom@kaist.ac.kr

1. 서론

최근 전세계적으로 자연을 모방하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 자연의 카이랄성을 나노 소재에 유도했을 경우, 새로운 광학적, 물리적, 화학적 성질들이 발견됨에 따라 카이랄 나노소재 개발에 관한 연구가 나날이 증가하고 있다.¹ 카이랄성이란 그리스어 '손'에서 유래된 말로, 왼손과 오른손처럼 서로 거울 상을 갖는 물체가 회전이나 평행이동에 의해 겹쳐지지 않는 성질을 일컫는다. 우리 몸은 손 뿐만 아니라 아미 노산, 당류, DNA 등 다양한 카이랄 물질들로 이루어져 있는데, 놀랍게도 이 중 아미노산의 경우 L-카이랄성 으로, 당류는 D-카이랄성으로만 존재한다(여기서 L-, D-는 왼쪽, 오른쪽 방향을 의미한다). 이처럼 특정 방향 의 물질이 반대 방향 물질보다 우세하게 존재하는 경우 호모카이랄성이 있다고 말한다. 호모카이랄성은 100%의 입체선택성을 보여주는 생리학적 프로세스와 연관되어 있다고 여겨지면서 생명의 기원을 밝히기 위 한 시나리오 중 하나로 중요하게 다루어져 왔다. 뿐만 아니라 생체의 호모카이랄성을 역이용해 약물의 분자수 준 방향성에 따라 약물의 효율이 달라지는 연구도 진행되었다. 이는 지난 10년 동안 카이랄 나노소재로 확장 되면서 유의미한 결과들이 도출되었고, 이에 따라 카이랄 나노소재 개발은 매우 중요한 연구분야로 자리잡게 되었다.²

카이랄 나노물질은 원자의 비대칭적인 3차원적 배열이나 나노물질 표면에 리간드에 의한 카이랄 패턴을 유도함으로써 합성될 수 있다. 나노소재에 카이랄성이 부여되면 빛, 전자, 혹은 또 다른 카이랄 물질과의 상호 작용이 달라지면서 기존의 비카이랄 물질에서는 보지 못했던 새로운 성질들이 나타나며, 이를 이용한 다양한 응용이 가능하다. 그 예로, 합성된 카이랄 나노물질의 방향성에 따라 왼쪽 방향으로 원편광된(LCP) 빛과 오 른쪽 방향으로 원편광된(RCP) 빛을 흡수하는 정도에 차이가 생기게 되는데, 이를 이용한 광학적 모듈레이션 이 가능하다.³ 또한, 열역학적으로 같은 방향성을 갖는 물질과의 반응이 더 안정적이라는 특성은 촉매에 카이 랄성을 부여하여 활성도 높은 물리화학적 촉매 합성에도 접목할 수 있다.⁴ 뿐만 아니라 나노소재를 이루는 전 자 스핀의 카이랄성은 카이랄 메모리 디바이스 개발에도 활용되는 등, 카이랄 나노소재는 광범위한 분야에서 응용 가능성이 높아 학계 및 산업에서도 주목받고 있다.⁵⁶

Author



2020

2021-현재

부산대학교 나노메디컬공학과 (학사) 부산대학교 인지메카트로닉스공학과 (석사) 부산대학교 인지메카트로닉스공학과 (박사) KAIST 신소재공학과 연구조교수 (염지현 교수 연구실)



염지현 2009 KAIST 2017 미시간 (박사) 2020-현재 KAIST

KAIST 신소재공학과(학사) 미시간대학교 고분자공학과 (박사) KAIST 신소재공학과 조교수

다양한 카이랄 나노소재를 개발하는 것이 중요해지면서 이와 함께 합성된 나노소재의 구조적, 광학적 특성을 분석 하는 것 또한 핵심연구로 자리잡았다. 특히, 나노소재의 크 기를 고려했을 때, 비슷한 수준의 파장대를 갖는 빛(200-1.000 nm)과의 상호작용이 강하기 때문에 광학적인 분석법 들이 주로 사용되고 있다. 카이랄 나노물질은 LCP. RCP 빛 에 대해 서로 다른 복소 굴절률을 가짐으로써 여러가지 광 학적 특성을 보이는데, 대표적으로 앞서 소개된 흡광 정도 의 차이인 원편광 이색성(CD)과 선형 편광된 빛을 회전시 키는 광회전 분산(ORD)이 있다. CD와 ORD 분석법은 접근 성이 높기 때문에 널리 사용되는 광학적 카이랄 분석법이 다. 하지만 이러한 광학적 특성의 근본적인 원인인 카이랄 성이 나노물질로부터 어떻게 유래되었는지 밝히기 위해서 는 구조적 분석법이 필수적이다. 따라서 투과전자현미경 (TEM) 등을 이용한 원자 배열의 방향성을 분석하는 방법 등이 함께 사용되고 있다. 본 총설에서는 위 방법들을 포함 한 카이랄 나노소재의 여러 가지 광학적, 구조적 분석법에 대해 소개한다.

2. 본론

2.1 카이랄 광학적 분석법

2.1.1 광학 회전 분산(ORD), 원편광이색성(CD) 분광기 ORD와 CD는 주로 물질의 바닥상태(ground state)에서 3 차원적 카이랄 구조 정보를 보여주는 것으로 알려져 있다.

ORD특성은 LCP와 RCP에 대한 물질의 복소 굴절률 (complex refractive index)의 실수부 차이로부터 온다. 선 형 편광(linearly polarized light)은 LCP와 RCP 빛의 중첩 으로 표현될 수 있고, 선형 편광 빛이 광학 활성을 띠는(카 이랄성) 물질을 통과하게 되면 굴절률의 차이로 인해 두 원 편광 사이의 위상 변위가 생기면서 선편광 축이 회전하게 되고 이 정도를 측정하는 것이 ORD로 다음과 같이 표현된 다(그림 1a).

$$\alpha = \frac{180 \times l}{\lambda} (n_L - n_R) \tag{1}$$

(l: 셀 경로 길이, λ : 빛의 파장, $n_L - n_R$: 물질의 LCP와 RCP에 대한 굴절률 차이)

CD는 LCP에 대한 흡광에서 RCP에 대한 흡광을 뺀 값으 로 정의된다. 이는 복소 굴절률에서 허수 부분의 차이에 의 해 발생하고 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta A = A_L - A_R = (\varepsilon_L - \varepsilon_R)cl \qquad (2)$$

(A: 흡광, ɛ: 몰흡광계수, c: 샘플농도, l: 셀 경로 길이)

ORD와 CD는 복소 굴절률의 실수부와 허수부 사이의 관 계식과 비슷하게 다음 식과 같은 K-K(Kramers-Kronig) 관계식으로 상호변환이 가능하므로 수학적으로 동등한 량 으로 여겨진다.

$$[\phi(\lambda)] = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty [\Theta(\nu)] \frac{\mu}{(\lambda^2 - \nu^2)} d\nu \qquad (3)$$

 $(\phi(\lambda))$: 몰 회전량, $[\Theta(\nu)]$: 파장 μ 에 대한 몰 타원률)



그림 1. (a) ORD, (b) CD, (c) CPL 측정기기의 광학 배치 도식.

$$\left[\Theta\left(\nu\right)\right] = \frac{\theta(\nu)}{10 \cdot c \cdot l} , \quad \theta(\nu) = 32980 \cdot \Delta A \quad (4)$$

CD 값은 샘플 농도와 셀 경로 길이에 비례하기 때문에 이 러한 외부적인 요인을 배재하고 물질의 본질적인 광학 활성 크기만을 판단하기위해 CD 스펙트럼을 흡광 스펙트럼으로 나누면 차원이 없는 비대칭 계수(dissymmetry factor, gabs) 가 정의되며 다음과 같이 나타낸다.

$$g_{abs} = \frac{\Delta A}{A} = \frac{2(\varepsilon_L - \varepsilon_R)}{(\varepsilon_L + \varepsilon_R)} = \frac{4R}{cD}$$
(5)

(ɛ: 몰흡광계수, R: 광학 회전 강도(optical rotational strength), D: 쌍극자 강도(dipole strength), c: 빛의 속도)

CD 측정 장비의 원리를 간단히 살펴보면, 광원에서 나온 편광되지 않은 빛이 선형 필터에 의해 선형 편광되고, 이 빛 은 PEM(photoelastic modulator)에서 약 50 kHz의 주기로 왼쪽 및 오른쪽 원형 편광으로 번갈아가며 변환된다(그림 1b). PEM에서 좌우 원편광을 만들 수 있는 이유는 PEM을 구성하는 재료의 특성에서 기인한다. PEM은 대부분 압전 재료를 사용하여 제작되기 때문에 전압이 가해지면 기계적 응력이 생겨 복굴절을 띠게 된다. 이 특성을 이용하면 빔의 전파 방향과 수직으로 적절한 크기의 응력을 발생시켜 원하 는 크기의 복굴절로 -λ/4 와 +λ/4 위상 지연을 만들수 있 게 된다. 이와 같은 방법으로 LCP와 RCP를 주기적으로 발 생시켜 샘플에 입사하면 각 빛이 다른 정도로 흡수되고 난 후 남은 빛이 detector로 들어가 신호가 감지된다. 그 후 샘 플에 흡수되기 전의 빛과 흡수 후의 편광의 차이는 lock in amplifier로 들어가 신호로 처리된다.

최근 높은 광학 활성을 갖는 카이랄 나노입자들이 합성 되면서 CD 측정 결과와 함께 ORD 현상을 직관적으로 보여 주는 연구가 보고되고 있다. 그림 2b는 비대칭계수 스펙트 럼으로, Co₃O₄ 자성 나노입자가 카이랄성을 띄고 있음을 보 여준다. Kotov 그룹은 합성된 카이랄 자성 나노입자를 두 편광자 사이에 위치시킨 후 편광자의 각도를 -10도에서 +10도까지 조절하면서 샘플을 투과하는 빛을 촬영하였다 (그림 2a). 그 결과, D-cysteine(Cys)-Co₃O₄ 나노입자는 녹 색 빛을 반시계방향으로, L-Cys-Co₃O₄ 나노입자는 시계방 향으로 회전시키는 것을 통해 나노입자의 방향성에 따른 ORD 효과를 시각적으로 관측했다.^{7,8} ORD 현상은 카이랄 분자 센싱으로 응용될 수 있는데, 동일연구진은 금 나노막대가 카이랄 분자와 만났을 때 카이랄성을 갖는 구조체로 자가 조립되는 현상과 수직으로 배치된 두 선형편광자를 이용했 다(그림 2c). 자가조립 전 카이랄성이 없는 금 나노막대는 ORD 특성이 없기 때문에 첫 번째 선형편광자에 의해 선형 편광된 빛이 두 번째 선형편광자를 통과하지 못해 어둡게 나타난다. 하지만 자가조립을 통해 카이랄성이 생기게 되 면, 처음 선형 편광된 빛이 ORD 효과에 의해 회전하면서 두 번째 선형편광자를 지나 붉은 빛을 볼 수 있게 된다. 이처럼 카이랄성 나노물질은 CD와 ORD 특성을 함께 지니며 K-K 관계식을 이용해 상호변환이 가능하다. 이는 그림 2d와 같 이 CD로부터 계산된 ORD 값과 실제 ORD 스펙트럼이 매우 유사함을 통해 입증된다.

2.1.2 원편광발광(CPL) 분광기

CPL 분광기는 물질의 기하학적 구조보다는 카이랄 나노 소재의 여기 상태(excited state)의 전자구조를 반영하는 분 석법으로써 편광되지 않은 빛이 카이랄 형광 시료에 입사하 여 전자를 여기시킨 후 전자와 정공이 재결합되면서 나오는 형광의 좌우 원편광 차이를 원형 편광 분석기로 측정하는 방법이다(그림 1c). 수식으로는 왼쪽 카이랄 형광세기(*I*_L) 에서 오른쪽 카이랄 형광세기(*I*_R)의 차이로 다음과 같이 정 의된다.

$$\Delta I \equiv I_L - I_R \tag{6}$$

CD에서의 비대칭계수와 유사하게 외부적인 요인을 배재한 나노소재의 내재적 CPL 계수는 발광 비대칭 비(luminescence dissymmetry ratio, *g_{lum}*)로 다음 수식과 같이 정의된다.

$$g_{lum} = \frac{\Delta I}{\frac{1}{2}I} = \frac{2(I_L - I_R)}{(I_L + I_R)}$$
(7)



그림 2. (a) 선형편광 빛이 나노입자를 투과하고 반시계방향(-10°), 시계방향(+10°) 선형편광자를 투과한 빛의 사진, (b) L-, D-, DL-Cys Co₃O₄ 나노입자의 비선형계수 스펙트라, (c) 수직 선형편광자 사이에 위치한 금 나노막대와 조립된 hIAPP-나노막대를 통과하는 빛을 보여주 는 사진, (d) hIAPP-나노막대의 ORD 스펙트럼과 CD 스펙트럼으로부 터 K-K 변환한 ORD 스펙트럼.^{7,8}

CPL 특성을 가진 나노소재 중 한 예로 카이랄 리간드로 표면이 안정화된 나노반도체소재를 들 수 있다. 카이랄 리 간드가 소재 표면에 붙으면 나노재료의 원자가 전자대 상태 와 카이랄 리간드 분자오비탈의 혼성화에 의해 CPL 특성을 띤다고 알려져 있다.⁹

Cheng 그룹은 다양한 모양의 코어쉘 형태 CdSe/CdS 구 조체를 합성하여 카이랄 분자(Cys)로 리간드를 바꾼 후 CPL분석을 하였다(그림 3). 그 결과, 실제 발광체인 CdSe 코어와 카이랄 리간드 사이의 거리가 가장 가깝도록 만드는 것이 중요하기 때문에 얇은 CdS 쉘일수록 높은 CPL효율을 내는 것을 밝혔다. 리간드에 의해 유도된 단위체 수준의 카 이랄성 이외에도 나노반도체소재가 특정한 방향성으로 자 가조립되어 더 큰 구조체가 되었을 때에도 CPL이 발생하는 현상도 최근 보고되고 있다.¹⁰

2.1.3 광학현미경을 이용한 단일 카이랄 나노소재 분석법

상기한 광학 분석법들은 카이랄 나노소재를 콜로이드 용 액 혹은 박막, 파우더의 형태로 측정하는 방법으로, 나노입 자의 집단적인 광학 특성이 반영된 평균적인 값만을 보여준 다. 통계적으로 나노입자 합성과정에서 형태적으로 완전히 동일한 모양의 카이랄 나노소재를 합성하기 어렵기 때문에 단일 입자 각각은 다른 모양을 가질 수밖에 없다. 이를 염두 에 두면 이와 같이 집단적인 특성분석만으로는 나노소재의 모양에 의존하는 카이랄 광학특성을 정확하게 분석하기가 어렵다. 이를 극복하기 위해 최근 여러 연구팀에서 광학현



그림 3. (a-f) CdSe/CdS 나노결정의 거울상 CPL 스펙트라: (a) nanoflowers, (b) Tadpole-III, (c) Tadpole-II, (d) Tadpole-I, (e) short dot/rods(DR-1), and (f) long dot/rods(DR-2), (g) D-Cys-CdSe/CdS 나노결정의 DC 스펙트라.¹¹

미경을 이용한 단일 입자의 카이랄 광학 분석을 시도하고 있다. Link 그룹은 플라즈모닉 나노입자와 단백질 콤플렉스 의 카이랄성의 기원을 밝히기 위해 단일 입자들의 광학현미 경 분석법을 도입했고, 그 결과 2개 이상의 나노입자가 단백 질과 함께 응집되어 있는 형상만이 카이랄성을 가지는 것을 밝혔다.¹² 한편, Karst 연구팀은 카이랄 금 나노나선체를 합 성해 암시야 투과모드 광학현미경을 이용해 좌우원편광에 따라 단일 입자의 산란 스펙트럼을 얻었다(그림 4). 단일 입 자들 각각의 비대칭 계수(g-factor)를 측정해 비교해본 결 과 최대 0.8에 도달하였고, 이는 용액에서 측정한 집단적 광 학 특성의 결과보다 4배나 높은 값이었다. 이 방법으로 위 연구진은 최대 비대칭 계수를 갖는 개별 카이랄 나노입자와 형태적으로 유사한 나노입자를 균일하게 합성함으로써 전 체의 비대칭계수를 효과적으로 올릴 수 있는 가능성을 보여 주었다.

2.2 투과전자현미경을 이용한 카이랄 구조 분석법

나노소재의 카이랄 광학분석 외에도, 최근 무기나노소재 코어의 원자 배열의 뒤틀림이나 결정의 카이랄성을 직접적 으로 보여주는 구조분석법들이 제시되고 있다. 이를 통해 확인된 무기나노소재 코어의 원자배열의 카이랄성은 기존 에 없던 소재의 전자기적 특성을 보여주었다.^{8,14} 이와 같은 카이랄 무기나노결정의 분석을 위해 광학분석과 더불어 나 노소재의 카이랄 구조 분석법의 중요성이 대두되었다.

전자현미경은 나노소재의 구조분석에 많은 유용한 정보 를 제공한다. 특히 고배율 투과전자현미경 이미징은 2차원 으로 투영된 결정 구조를 보여주지만 3차원적 정보인 카이 랄성은 2차원에서 그 정보를 잃게 된다. 이 때문에 3D 홀로 그래피를 비롯한 다양한 3차원적 전자현미경 분석법이 개 발되었고, 그 중 결정 구조의 카이랄 분석에서 가장 많이 사 용되는 방법은 HRTEM tilting 방법, 수렴 빔 전자회절 (convergent beam electron-diffraction, CBED) 방법, 세차



그림 4. (a) 단일 나노입자의 카이랄광학을 측정하기위한 투과모드 광 학현미경 셋업 도식(백색광, 편광자(Pol.), 1/4 파장 판(QWP), 암시야 콘덴서(DF Cond.), 산란 빛을 모아주는 대물렌즈(Obj.), 분광계), (b) 왼손 카이랄, 비카이랄, 오른손 카이랄 구조의 단일 카이랄 플라즈모닉 나노입자의 도식, (c) 단일입자를 총 26번 측정한 g-factor의 평균값과 (d) 비교를 위해 나노입자 용액에서의 CD결과로 계산된 g-factor.¹³

전자회절(precession electron diffraction, PED) 방법 등이 있다.

2.2.1 HRTEM Tilting 방법

HRTEM tilting 방법은 2차원 이미지를 두 방향에서 얻어 카이랄 비대칭성을 결정하는 방법으로, 동일한 나노결정에 서의 특정 축을 기준으로 결정을 tilting시키면서 두 가지 다 른 zone axis에서 촬영한다. 이 이미지들을 비교하면 두 거 울상 구조에 따라 동일한 tilting 조건에서 다른 격자 패턴이 보이기 때문에 격자구조의 시뮬레이션과의 비교를 통해 카 이랄성 방향을 측정할 수 있다. 예를 들어 Terasaki 그룹에 서는 카이랄 결정구조(P6122 혹은 P6522)를 가질 수 있는 zeolite 물질을 두가지 zone-axis 방향([2110], [1100])에 서 측정한 후 시뮬레이션 결과와 비교하여 카이랄 방향성을 결정하였다¹⁵ 6차 회전대칭을 가진 zeolite를 60°씩 tilting 할 때 같은 격자를 보여주기 때문에 그림 5a의 HRTEM 이 미지 상으로는 60° tilting 후에도 동일한 모양을 보여주지 만, 카이랄 방향성에 따라 격자의 위치는 아래 방향 또는 위 방향으로 이동하는 것을 보여준다. 위 연구진은 [2110] 방 · 향을 기준으로 오른쪽으로 30°를 tilting했을 때 [2110] 방 향의 격자가 이동한 방향(위 또는 아래)을 확인하고 시뮬레 이션된 HRTEM 이미지와 비교함으로써 카이랄 방향성을



그림 5. (a, b) 두 가지 카이랄 방향성을 가진 6차 회전대칭 나선형 결정구조를 보여주는 도식화된 그림, (c, d) 시뮬레이션된 zeolite의 HRTEM 사진, 원자구조 모델(파란 공: Si 원자, 빨간 공: O 원자), (e, f) [2110]과 30° tilting한 [1100] zone axis에서 실제로 측정된 TEM 결과, 두 화살표가 결정의 같은 지점인지 특징적인 점을 나타낸다.¹⁵

확인하였다. HRTEM tilting 방법은 특별한 TEM 분석법이 필요하지 않기 때문에 범용적으로 쓰일 가능성이 높다.

2.2.2 CBED 분석법

CBED 분석법은 시료에 원뿔모양의 집속 빔을 10 nm이 하의 작은 영역으로 조사하여 디스크모양의 회절패턴을 얻 어서 구조를 분석하는 방법이다.^{16,17} CBED 분석법을 이용 해 나노소재의 카이랄 방향성을 확인하기 위해서는 실제 CBED 실험값과 시뮬레이션된 결정 구조의 CBED 패턴을 비교해야 한다. 구체적으로는 Bijvoet 쌍(*h, k, I*과 *h, k, 1*쌍) 의 빔 산란 크기의 비대칭성을 비교하면서 카이랄 방향성을 결정할 수 있는데, 이는 Bijvoet 쌍의 회절강도 차이가 진폭 이 동일하고 위상 각도가 다른 Bijvoet 쌍 간의 다중산란(전 자 회절의 동적 특성)으로 인해 발생하기 때문이다.

CBED 패턴은 크게 zero-order Laue zone(ZOLZ), higherorder Laue zones(HOLZ) 회절, Kikuchi선 등의 정보를 가 진다. 이 중에 3D 정보를 가진 HOLZ 회절(off-axis)이 영 향을 준 ZOLZ나 HOLZ 영역의 비대칭적 패턴을 분석하는 것이 카이랄 결정 분석에 중요하다.

그림 6은 Ho₂Ge₂O₇ 시료가 ZOLZ 영역에서는 대칭으로 보이지만, HOLZ ring에서는 명확한 좌우 비대칭 반사를 보 여준다. 그림에서의 물질과 반대쪽 카이랄성을 가진 물질은 수직축으로 거울 대칭된 이미지로 나타날 것이다.^{18,19}

2.2.3 PED 분석법

PED 분석법은 전자회절분석기에 세차원리를 결합한 것 으로 전자빔이 일정한 각도를 가지고 기울어져서 회전을 하 며 조사되면서 동적인 회절결과를 보여주는 분석법이다.²⁰ PED 방법은 나노결정에서 ZOLZ와 HOLZ 모두에서 반사 수를 늘리기 때문에 Laue zone들 사이의 기하학적 관계를 확인하여 3차원적 정보를 알 수 있어 나노결정의 공간군을 결정할 때 용이한 방법이다. 또한, PED 방법은 CBED 방법



그림 6. Zone axis에서 약간 기울인 Ho₂Ge₂O₇ 시료의 CBED 패턴.¹⁸



그림 7. PED (a) 좌(P6₅22)와 (b, c) 우(P6₁22) 방향성 카이랄 zeolite 의 [0001]축으로 시뮬레이션된 PED 패턴 (FOLZ), (d) P6₁22 공간그 룹을 가진 HPM-1 카이랄 zeolite의 실제 실험적 PED 패턴 결과(세차 각도: 0.1°, 세차 스텝: 0.1°).¹⁵

보다 빔 손상이 덜하기 때문에 빔 손상을 쉽게 입는 시료에 사용되기 적합하다.

PED 분석법을 이용해 카이랄 방향성을 분석하는 방법은 CBED 방법과 비슷하게 Bijvoet 쌍의 비대칭적인 세기를 비 교함으로써 이루어진다. 예를 들어, Terasaki 그룹에서는 HRTEM tilting 방법과 더불어 PED 방법을 이용하여 zeolite 의 카이랄 방향성을 결정하였다.¹⁵ 그림 7에서와 같이 ZOLZ 에서는 물질이 2D 투영 정보인 6 mm 점군에 속하는 것이 확인되고, HOLZ에서는 3D 구조 정보를 포함하기 때문에 6 차 회전대칭성을 보여준다. Zeolite는 거울대칭성이 없고, 두 거울상 이성질체는 c축을 따라 원자배열이 달라지기 때 문에 [0001] PED 패턴에서 다른 hki1 반사의 세기를 가진 다. 이 반사의 세기는 마치 거울상 이성질체처럼 비대칭을 이루기 때문에 이 결정을 시뮬레이션한 결과와 비교하여 나 노결정의 카이랄 방향성을 결정할 수 있다.

3. 결론

카이랄 나노소재는 신소재 분야에 카이랄성이라는 새로 운 차원을 부여해 기존에 없던 새로운 특성을 나타내거나 다양한 잠재적 응용분야를 보여주었다. 이렇게 카이랄 나노 소재 개발이 각광받고 있고, 그 응용분야가 무궁무진한 만큼 카이랄성 분석기술도 중요해졌다. 더욱이, 아직 밝혀지지 않은 카이랄 나노소재의 특성이 많기 때문에 이를 밝히기 위해 본 총설에 소개된 광학 및 구조적 분석방법이 유용하 게 사용될 수 있고, 또한 앞으로도 흥미로운 카이랄 분석법 이 개발될 것으로 예상된다.

참고문헌

- W. Ma, L. Xu, A. F. de Moura, X. Wu, H. Kuang, C. Xu, and N. A. Kotov, *Chem. Rev.*, **117**, 8041 (2017).
- J. Liu, L. Yang, P. Qin, S. Zhang, K. K. L. Yung, and Z. Huang, *Adv. Mater.*, 2005506 (2021).
- C. Liu, Y. Bai, J. Zhou, Q. Zhao, Y. Yang, H. Chen, and L. Qiao, *npj Comput. Mater.*, 5, 93 (2019).
- 4. X. Zhao, S.-Q. Zang, and X. Chen, *Chem. Soc. Rev.*, **49**, 2481 (2020).
- 5. S.-H. Yang, R. Naaman, Y. Paltiel, and S. S. Parkin, *Nat. Rev. Phys.*, **3**, 328 (2021).
- H. Al-Bustami, B. P. Bloom, Amir Ziv, S. Goldring, S. Yochelis, R. Naaman, D. H. Waldeck, and Y. Paltiel, *Nano Lett.*, **20**, 8675 (2020).
- J. Lu, Y. Xue, K. Bernardino, N. N. Zhang, W. R. Gomes, N. S. Ramesar, S. Liu, Z. Hu, T. Sun, A. F. de Moura, N. A. Kotov, and K. Liu, *Science*, **371**, 1368 (2021).
- J. Yeom, U. S. Santos, M. Chekini, M. Cha, A. F. de Moura, and N. A. Kotov, *Science*, **359**, 309 (2018).
- 9. U. Tohgha, K. K. Deol, A. G. Porter, S. G. Bartko, J. K. Choi, B. M. Leonard, K. Varga, J. Kubelka, G. Muller, and M. Balaz, ACS Nano, 7, 11094 (2013).
- C. Hao, Y. Gao, D. Wu, S. Li, L. Xu, X. Wu, J. Guo, M. Sun, X. Li, C. Xu, and H. Kuang, *Adv. Mater.*, **31**, 1903200 (2019).
- J. Hao, Y. Li, J. Miao, R. Liu, J. Li, H. Liu, Q. Wang, H. Liu, M.-H. Delville, T. He, K. Wang, X. Zhu, and J. Cheng, *ACS Nano*, 14, 10346 (2020).
- 12. Q. Zhang, T. Hernandez, K. W. Smith, S. A. H. Jebeli, A. X. Dai, L. Warning, R. Baiyasi, L. A. McCarthy, H. Guo, D.-H. Chen, J. A. Dionne, C. F. Landes, and S. Link, *Science*, **365**, 1475 (2019).
- J. Karst, N. H. Cho, H. Kim, H.-E. Lee, K. T. Nam, H. Giessen, and M. Hentschel, ACS Nano, 13, 8659 (2019).
- A. Ben-Moshe, S. G. Wolf, M. B. Sadan, L. Houben, Z. Fan, A. O. Govorov, and G. Markovich, *Nat. Commun.*, 5, 4302 (2014).
- 15. Y. Ma, P. Oleynikov, and O. Terasaki, Nat. Mater., 16, 755 (2017).
- A. D. Rollett and K. Barmak, in *Physical Metallurgy*, Elsevier, Oxford, pp 1113–1141 (2014).
- J.-P. Ahn and J.-K. Park, *Polym. Sci. Technol.*, **17**, 493 (2006).
- B. A. Carter, D. B. Williams, C. B. Carter, and D. B. Williams, Diffraction II, Springer Science & Business Media, 1996, Vol. 2.
- H. Inui, A. Fujii, K. Tanaka, H. Sakamoto, and K. Ishizuka, Acta Crystallogr. B: Struct. Sci., 59, 802 (2003).
- 20. J.-G. Kim, Ceramist, 16, 9 (2013).