(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0142911
(43) 공개일자 2023년10월11일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 21/41 (2006.01) *G01N 21/21* (2006.01)
G01N 21/31 (2006.01) *G01N 21/55* (2014.01)
G01N 21/59 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 21/41 (2013.01)
G01N 21/21 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2022-0041534
(22) 출원일자 2022년04월04일
심사청구일자 2022년04월04일

(71) 출원인
충남대학교산학협력단
대전광역시 유성구 대학로 99 (궁동, 충남대학교)
(72) 발명자
이기주
대전광역시 유성구 가정로287번길 21, 201호(도룡동, 럭스빌)
이성연
대전광역시 유성구 대학로 99, 336호(궁동, 충남대학교 자연과학대학 4호관)
(74) 대리인
특허법인오암

전체 청구항 수 : 총 8 항

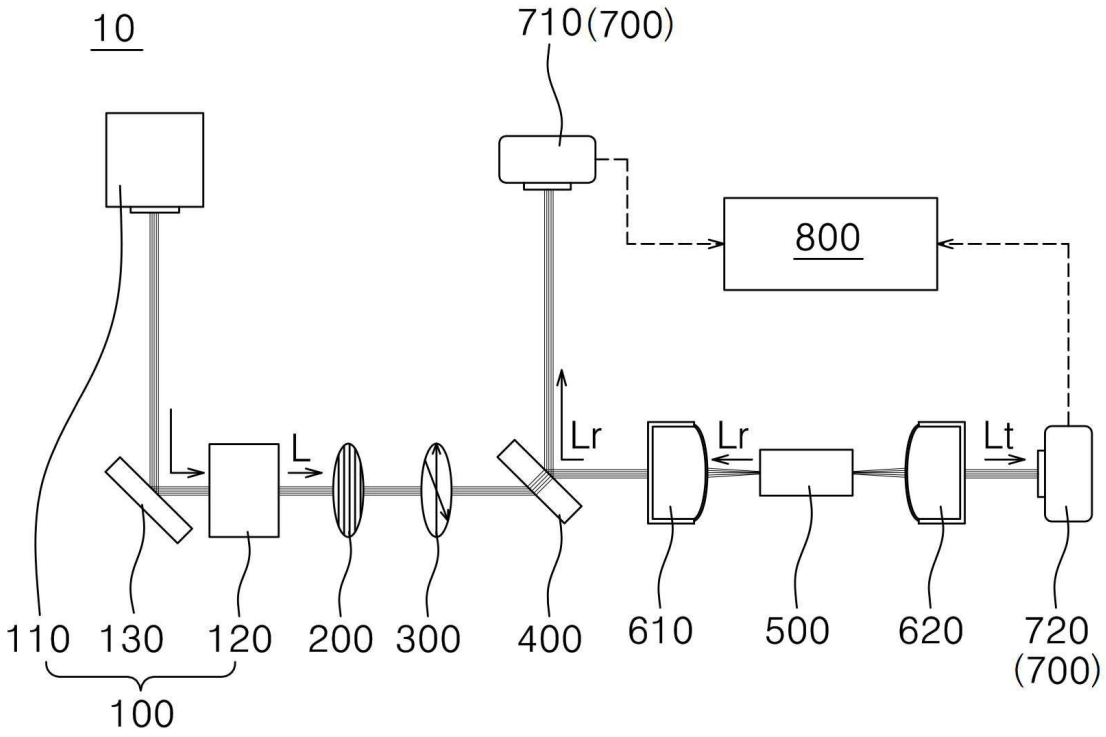
(54) 발명의 명칭 **이등방성 물질의 굴절률 측정장치 및 그를 이용한 측정방법**

(57) 요 약

파장을 선택하여 빛을 제공하는 광원부; 선택된 파장을 가지는 빛이 입사되는 편광판; 상기 편광판으로부터 선형 편광된 빛을 회전시켜주는 위상지연자; 상기 위상지연자로부터 편광 방향이 조절된 빛이 통과하는 빔스플리터; 상기 빔스플리터를 통과한 빛이 투과 및 반사되는 이등방성 시료체; 상기 이등방성 시료체로부터 반사된 빛을 감

(뒷면에 계속)

대 표 도 - 도3



지하는 제1 디텍터와, 상기 이등방성 시료체로부터 투과된 빛을 감지하는 제2 디텍터를 포함하고, 투과광과 반사광의 세기를 동시에 측정하는 검출부; 및 상기 제1 디텍터 및 제2 디텍터와 연결되어 검출된 신호를 처리하고, 투과율 및 반사율을 추출하는 신호처리부를 포함하고, 상기 투과율과 반사율로부터 반사율 스펙트럼에서의 굴절률 실수부를 추출하고, 전달매트릭스 분석 방법을 이용하여 상기 추정된 실수부로부터 반사율 스펙트럼 및 투과율 스펙트럼 값을 동시에 일치시키는 굴절률 허수부를 추출하는 것을 포함하는 이등방성 물질의 굴절률 측정장치 및 그를 이용한 측정방법을 제공한다.

(52) CPC특허분류
G01N 21/31 (2013.01)
G01N 21/55 (2013.01)
G01N 21/59 (2013.01)
G01N 2021/4173 (2013.01)
G01N 2021/558 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1345343004
과제번호 2020R1A6A1A03047771
부처명 교육부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 이공학학술연구기반구축(R&D)-대학중점연구소지원사업
연구과제명 양자제어물성연구소(나노소재 기반 진화형 환경 복합센서 연구)
기 여 율 50/100
과제수행기관명 충남대학교
연구기간 2020.06.01 ~ 2029.05.31
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711129843
과제번호 2020R1A2C1008368
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 이공분야기초연구사업-중견연구자지원사업
연구과제명 2 차원 반도체 이종접합구조에서 엑시톤, 포논 및 밸리의 초고속 동역학 연구
기 여 율 50/100
과제수행기관명 충남대학교
연구기간 2020.03.01 ~ 2023.02.28

명 세 서

청구범위

청구항 1

파장을 선택하여 빛을 제공하는 광원부;

선택된 파장을 가지는 빛이 입사되는 편광판;

편광판으로부터 선형편광된 빛을 회전시켜주는 위상지연자;

상기 위상지연자로부터 편광 방향이 조절된 빛이 통과하는 빔스플리터;

상기 빔스플리터를 통과한 빛이 투과 및 반사되는 이등방성 시료체;

상기 이등방성 시료체로부터 반사된 빛을 감지하는 제1 디텍터와, 상기 이등방성 시료체로부터 투과된 빛을 감지하는 제2 디텍터를 포함하고, 투과광과 반사광의 세기를 동시에 측정하는 검출부; 및

상기 제1 디텍터 및 제2 디텍터와 연결되어 검출된 신호를 처리하고, 투과율 및 반사율을 추출하는 신호처리부를 포함하고,

상기 투과율과 반사율로부터 반사율 스펙트럼에서의 굴절률 실수부를 추출하고, 전달매트릭스 분석 방법을 이용하여 추정된 실수부로부터 반사율 스펙트럼 및 투과율 스펙트럼 값을 동시에 일치시키는 굴절률 허수부를 추출하는 것을 포함하는 이등방성 물질의 굴절률 측정장치.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 광원부는, 서로 다른 파장의 빛을 선택하여 제공하고,

상기 이등방성 물질의 굴절률 측정장치는, 각각의 선택된 파장에 대한 투과율 및 반사율을 각각 추출하여 파장에 따른 굴절률 분산을 측정하는 것을 포함하는 이등방성 물질의 굴절률 측정장치.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 광원부는, 광대역의 파장을 가지는 빛을 제공하는 광원과, 광원으로부터 제공된 빛 중 특정 파장을 선택하는 분광기를 포함하는 이등방성 물질의 굴절률 측정장치.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 편광판 또는 위상지연자는, 회전가능하도록 구비되어 빛의 편광 방향을 선택하는 것을 포함하는 이등방성 물질의 굴절률 측정장치.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 이등방성 물질의 굴절률 측정장치는, 상기 이등방성 시료체의 전방에 형성된 빛의 경로 상에 배치되는 제1 렌즈와, 이등방성 시료체의 후방에 형성된 빛의 경로 상에 배치되는 제2 렌즈를 포함하는 이등방성 물질의 굴절

률 측정장치.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 이등방성 시료체는, 용융실리카를 포함하는 베이스 시료와, 상기 베이스 시료 상의 일부 영역에 형성되고 결정 비대칭성을 가지는 측정 시료를 포함하는 이등방성 물질의 굴절률 측정장치.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 이등방성 물질의 굴절률 측정장치는, 상기 베이스 시료에 대한 투과광 및 반사광의 세기를 측정한 제1 측정값과, 상기 측정 시료에 대한 투과광 및 반사광의 세기를 측정한 제2 측정값을 구하고, 제1 측정값과 제2 측정값을 연산하여 측정 시료의 굴절률을 실험적으로 얻는 것을 포함하는 이등방성 물질의 굴절률 측정장치.

청구항 8

제1항의 이등방성 물질의 굴절률 측정장치를 이용하는 이등방성 물질의 굴절률 측정방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 파장에 따른 굴절률 측정과 굴절률 분산 도출의 정확성이 더욱 향상될 수 있는 이등방성 물질의 굴절률 측정장치 및 그를 이용한 측정방법에 대한 것이다.

[0002]

배 경 기 술

[0003] 최근 수십 년 동안 그래핀(Graphene), 육방정계 질화붕소(HBN), 전이금속 디칼코게나이드(TMDC), 흑린(Black Phosphorus) 등과 같은 2차원(2D) 재료가 광범위하게 연구되고 있다. 그 중, 흑린(BP)은 높은 캐리어 이동도, 두께 의존 밴드갭 변화, 이방성 재료 특성과 같은 흥미로운 물성으로 인해 큰 관심을 받고 있다. 특히, 흑린의 전기적, 기계적, 광학적 특성이 결정 방향에 민감하다는 사실이 조사되어 새로운 나노 광전기 응용 분야로 이어지고 있다.

[0004] 단일층의 흑린의 결정구조는 도 1과 같이, 안락의자축(AC)과 지그재그축(ZZ)에 따라 비대칭의 결정질을 가지며, 그로 인해 독특한 이등방성을 가진다. 즉, 흑린은 안락의자축(AC)을 따라 이방성으로 큰 흡수계수를 가지며, 이러한 선형 이색성(linear dichroism)은 선형 편광판으로 활용되고 있다. 한편, 상대적으로 덜 연구된 흑린의 복굴절성에 대해서는 광학 위상지연기 또는 원형 편광판으로 개발될 가능성이 있다고 볼 수 있다.

[0005] MoS_2 및 WSe_2와 같은 TMDC에서 특정 밴드 밸리는 원형 편광에 의해 여기될 수 있으며, 흑린의 복굴절성은 TMDC의 밸리 선택적 여기에 활용될 수 있으므로 BP/TMDC 이종 구조가 밸리트로닉스에서 밸리 생성을 위한 좋은 플랫폼을 제공할 가능성이 있다. 이와 관련하여 흑린의 이방성 굴절률 분산을 정확하게 특성화하고 광학 위상 지연을 입증하는 것이 필요하다.

[0006] 도 2는 4가지의 논문에서 보고된 흑린의 굴절률 분산값에 대한 그래프이다. 도 2를 참조하면, 굴절률은 허수를 포함하는 복소수로써, 반사율과 관계된 실수부분(도2의 (a))과 흡수계수와 관련된 허수부분(도2의 (b))을 포함한다. 여러 연구에서 이방성 굴절률에 대한 실험적 또는 이론적 추정을 보고했지만, 도 2와 같이 현재까지 결과는 각각의 레퍼런스마다 다른 종류의 물질이라 말할 수 있을 정도의 편차를 보인다. 이는 결정 비대칭성을 가지는 물질, 즉 이등방성 물질의 정확한 굴절률 측정이 어려움을 보여준다.

[0007] 광학 실험 결과 분석, 박막의 두께 측정, 광학적 부품 성능 향상 등을 위하여 정확한 굴절률 측정은 과학기술

개발의 기초적인 요소라 할 수 있으므로, 흑린과 같은 결정 비대칭성을 가지는 물질의 굴절률 측정방법을 개선할 수 있는 굴절률 측정장치가 필요하다고 볼 수 있다. 또한, 최근의 반도체 물질 또는 2차원 물질의 개발 추세에 따라 소형 박막의 시료에도 적용 가능한 굴절률 측정 기술개발이 요구되고 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0008] (특허문헌 0001) 일본공개특허 제2008-64691호(공개일: 2008년 03월 21일)

(특허문헌 0002) 일본등록특허 제4728830호(등록일: 2011년 4월 22일)

(특허문헌 0003) 한국공개특허 제10-2015-0005455호(공개일: 2015년 01월 14일)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는, 비대칭성을 가지는 물질 또는 박막형 물질의 굴절률 측정의 정확성이 향상될 수 있는 이등방성 물질의 굴절률 측정장치 및 그를 이용한 측정방법을 제공하는 것에 목적이 있다.

[0010] 또한, 본 발명이 이루고자 하는 다른 기술적 과제는, 파장에 따른 굴절률 분산(스펙트럼) 도출의 정확성이 더욱 향상될 수 있는 이등방성 물질의 굴절률 측정장치 및 그를 이용한 측정방법을 제공하는 것에 목적이 있다.

[0011] 본 발명의 목적은 이상에서 언급한 목적으로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 목적들은 아래의 기재로부터 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0012] 상기의 문제를 해결하기 위하여 본 발명은 파장을 선택하여 빛을 제공하는 광원부; 선택된 파장을 가지는 빛이 입사되는 편광판; 상기 편광판으로부터 선형편광된 빛을 회전시켜주는 위상지연자; 상기 위상지연자로부터 편광 방향이 조절된 빛이 통과하는 빔스플리터; 상기 빔스플리터를 통과한 빛이 투과 및 반사되는 이등방성 시료체; 상기 이등방성 시료체로부터 반사된 빛을 감지하는 제1 디텍터와, 상기 이등방성 시료체로부터 투과된 빛을 감지하는 제2 디텍터를 포함하고, 투과광과 반사광의 세기를 동시에 측정하는 검출부; 및 상기 제1 디텍터 및 제2 디텍터와 연결되어 검출된 신호를 처리하고, 투과율 및 반사율을 추출하는 신호처리부를 포함하고, 상기 투과율과 반사율로부터 반사율 스펙트럼에서의 굴절률 실수부를 추출하고, 전달매트릭스 분석 방법을 이용하여 상기 추정된 실수부로부터 반사율 스펙트럼 및 투과율 스펙트럼 값을 동시에 일치시키는 굴절률 허수부를 추출하는 것을 포함하는 이등방성 물질의 굴절률 측정장치를 제공할 수 있다.

[0013] 상기 광원부는, 서로 다른 파장의 빛을 선택하여 제공하고, 상기 이등방성 물질의 굴절률 측정장치는, 각각의 선택된 파장에 대한 투과율 및 반사율을 각각 추출하여 파장에 따른 굴절률 분산을 측정하는 것을 포함할 수 있다,

[0014] 상기 광원부는, 광대역의 파장을 가지는 빛을 제공하는 광원과, 상기 광원으로부터 제공된 빛 중 특정 파장을 선택하는 분광기를 포함할 수 있다.

[0015] 상기 편광판 또는 위상지연자는, 회전가능하도록 구비되어 빛의 편광 방향을 선택할 수 있다.

[0016] 상기 이등방성 물질의 굴절률 측정장치는, 상기 이등방성 시료체의 전방에 형성된 빛의 경로 상에 배치되는 제1 렌즈와, 이등방성 시료체의 후방에 형성된 빛의 경로 상에 배치되는 제2 렌즈를 포함할 수 있다.

[0017] 상기 이등방성 시료체는, 용융실리카를 포함하는 베이스 시료와, 상기 베이스 시료 상의 일부 영역에 형성되고 결정 비대칭성을 가지는 측정 시료를 포함할 수 있다.

[0018] 상기 이등방성 물질의 굴절률 측정장치는, 상기 베이스 시료에 대한 투과광 및 반사광의 세기를 측정한 제1 측정값과, 상기 측정 시료에 대한 투과광 및 반사광의 세기를 측정한 제2 측정값을 구하고, 제1 측정값과 제2 측정값을 연산하여 측정 시료의 굴절률을 실험적으로 얻는 것일 수 있다.

[0019] 또한, 상기의 문제를 해결하기 위하여 본 발명은 상기 이등방성 물질의 굴절률 측정장치를 이용하는 이등방성

물질의 굴절률 측정방법을 제공할 수 있다.

발명의 효과

[0020] 본 발명의 실시예에 따른 이등방성 물질의 굴절률 측정장치 및 그를 이용한 측정방법은 파장에 따라 이등방성 시료체로부터 투과광과 반사광을 동시에 검출하여 비대칭성을 가지는 물질 또는 박막형 물질의 굴절률 측정의 정확성이 향상될 수 있으며, 파장에 따른 굴절률 분산 도출의 정확성이 더욱 향상될 수 있는 장점이 있다.

도면의 간단한 설명

[0021] 도 1은 단일층의 흑린의 결정구조를 나타낸 사시도 및 측면도,

도 2는 종래의 공지된 흑린의 굴절률 분값에 대해 정리한 그래프,

도 3은 본 발명의 실시예에 따른 이등방성 물질의 굴절률 측정장치를 나타낸 개략도,

도 4는 본 발명의 실시예에 따른 이등방성 시료에 대한 빛의 반사와 투과에 대한 것을 나타낸 단면도,

도 5는 본 발명의 실시예에 따른 이등방성 물질의 굴절률 측정장치의 시험예에 사용된 흑린을 나타낸 사진,

도 6은 도 5의 지점 S1에 대해 550㎚에서 편광 각도의 함수로서 투과율의 극좌표를 나타낸 그래프,

도 7은 도 5의 흑린을 시료로 사용한 ZZ 방향의 입사 파장과 AC 방향의 입사 파장에 따른 반사와 투과에 대한 실험값과 이론값을 나타낸 그래프,

도 8은 파장에 따른 굴절률(n)과 흡광계수(κ)와, ZZ방향과 AC방향의 파장에 따른 굴절률과 흡광계수의 차이를 나타낸 그래프,

도 9는 흑린을 편광자로 사용한 실험을 나타낸 개략도,

도 10은 도 9의 실험에 있어서 흑린을 통과하기 전과 후에 분석기 각도(??)에 따라 측정된 광 강도 그래프,

도 11은 도 5의 흑린에 대한 빛의 입사 편광각도 및 입사 파장에 따른 편광도의 실험값과 이론값을 나타낸 그래프,

도 12는 도 5의 흑린에 대한 AC방향과 ZZ방향 편광 사이의 위상지연 시뮬레이션 및 AC와 ZZ 편광 사이의 감쇠비율 시뮬레이션을 나타낸 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0022] 이하, 첨부한 도면들을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예들을 상세히 설명한다. 다음에 소개되는 실시예들은 당업자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 예로서 제공되어지는 것이다. 따라서, 본 발명은 이하 설명되어지는 실시예들에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화될 수도 있다. 그리고, 도면들에 있어서, 층 및 영역의 길이, 두께 등은 편의를 위하여 과장되어 표현될 수도 있다. 명세서 전체에 걸쳐서 동일한 참조번호들은 동일한 구성요소들을 나타낸다.

[0023] 도 1은 단일층의 흑린의 결정구조를 나타낸 사시도 및 측면도이고, 도 2는 종래의 공지된 흑린의 굴절률 분값에 대해 정리한 그래프이고, 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 이등방성 물질의 굴절률 측정장치를 나타낸 개략도이고, 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 이등방성 시료에 대한 빛의 반사와 투과에 대한 것을 나타낸 단면도이고, 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 이등방성 물질의 굴절률 측정장치의 시험예에 사용된 흑린을 나타낸 사진이고, 도 6은 도 5의 지점 S1에 대해 550㎚에서 편광 각도의 함수로서의 투과율의 극좌표를 나타낸 그래프이고, 도 7은 도 5의 흑린을 시료로 사용한 ZZ 방향의 입사 파장과 AC 방향의 입사 파장에 따른 반사와 투과에 대한 실험값과 이론값을 나타낸 그래프이고, 도 8은 파장에 따른 굴절률(n)과 흡광계수(κ)와, ZZ방향과 AC방향의 파장에 따른 굴절률과 흡광계수의 차이를 나타낸 그래프이고, 도 9는 흑린을 편광자로 사용한 실험을 나타낸 개략도이고, 도 10은 도 9의 실험에 있어서 흑린을 통과하기 전과 후에 분석기 각도(??)에 따라 측정된 광 강도 그래프이고, 도 11은 도 5의 흑린에 대한 빛의 입사 편광각도 및 입사 파장에 따른 편광도의 실험값과 이론값을 나타낸 그래프이고, 도 12는 도 5의 흑린에 대한 AC와 ZZ 편광 사이의 위상지연 시뮬레이션 및 AC와 ZZ 편광 사이의 감쇠 비율 시뮬레이션을 나타낸 그래프이다.

[0024] 도 1 내지 도 12를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 이등방성 물질의 굴절률 측정장치(10)는 파장을 선택하여 빛(L)을 제공하는 광원부(100); 선택된 파장을 가지는 빛이 입사되는 편광판(200); 상기 편광판(200)으로부

터 선형편광된 빛을 회전시켜주는 위상지연자(300); 상기 위상지연자(300)로부터 편광 방향이 조절된 빛이 통과하는 빔스플리터(400); 상기 빔스플리터(400)를 통과한 빛이 투과 및 반사되는 이등방성 시료체(500); 상기 이등방성 시료체(500)로부터 반사된 빛을 감지하는 제1 디텍터(710)와, 상기 이등방성 시료체(500)로부터 투과된 빛을 감지하는 제2 디텍터(720)를 포함하고, 투과광(Lt)과 반사광(Lr)의 세기를 동시에 측정하는 검출부(700); 및 상기 제1 디텍터(710) 및 제2 디텍터(720)와 연결되어 검출된 신호를 처리하고, 투과율 및 반사율을 추출하는 신호처리부(800)를 포함하고, 상기 투과율과 반사율로부터 반사율 스펙트럼에서의 굴절률 실수부를 추출하고, 전달매트릭스 분석 방법을 이용하여 상기 추정된 실수부로부터 반사율 스펙트럼 및 투과율 스펙트럼 값을 동시에 일치시키는 굴절률 허수부를 추출하는 것을 포함할 수 있다. 따라서, 파장에 따라 이등방성 시료체(500)로부터 투과광(Lt)과 반사광(Lr)을 동시에 검출하여 굴절율을 추정함으로써 비대칭성을 가지는 물질 또는 박막형 물질의 굴절률 측정의 정확성이 향상될 수 있으며, 파장에 따른 굴절률 분산(굴절률 스펙트럼) 도출의 정확성이 더욱 향상될 수 있는 장점이 있다.

[0025] 상세히 설명하면, 광원부(100)는 파장을 선택하여 빛을 제공하는데, 상기 광원부(100)는, 광대역의 파장을 가지는 빛을 제공하는 광원(110)과, 상기 광원(110)으로부터 제공된 빛 중 특정 파장을 선택하는 분광기(120)를 포함할 수 있다. 광원(110)은 540 내지 1500 nm의 스펙트럼 범위에서 반사 및 투과 스펙트럼을 동시에 측정할 수 있도록 빛을 제공할 수 있다. 예로써, 분광기(120)로는 모노크로메이터를 이용하여 분광 여과하여 편광판(200)으로 제공할 수 있다. 또한, 상기 광원부(100)는 빛의 광원(110)으로부터 분광기(120) 사이의 빛의 경로 변경을 위해 미러(130)가 배치될 수 있다.

[0026] 나아가서, 상기 광원부(100)는, 서로 다른 파장의 빛을 선택하여 제공하고, 상기 이등방성 물질의 굴절률 측정장치(10)는, 각각의 선택된 파장에 대한 투과율 및 반사율을 각각 추출하여 파장에 따른 굴절률 분산을 측정하는 것을 포함할 수 있다. 따라서, 이등방성 시료체(500)에 대해 투과율 스펙트럼과 반사율 스펙트럼을 실험적으로 제공할 수 있다.

[0027] 상기 분광기(120)로부터 분광 여과되어 선택된 파장을 가진 빛(L)은 편광판(200)으로 입사되며, 상기 편광판(200)과 빔스플리터(400) 사이에는 위상지연자(300)가 회전가능하도록 구비되어 빛의 편광 방향을 선택할 수 있다. 즉, 상기 편광판(200) 또는 위상지연자(300)는, 회전가능하도록 구비되어 빛의 편광 방향을 선택할 수 있으며, 예로써 상기 위상지연자(300)는 반파장 위상지연자일 수 있다.

[0028] 상기 편광판(200)으로부터 편광 방향이 조절된 빛은 빔스플리터(400)를 통과할 수 있다. 빔스플리터(400)는 이후 설명하는 이등방성 시료체(500)의 반사광 경로를 제1 디텍터(710)로 정렬하는데 필요하다.

[0029] 상기 빔스플리터(400)를 통과한 빛이 투과 및 반사되는 이등방성 시료체(500)는 예로써 흑린을 포함한 것일 수 있다.

[0030] 상기 이등방성 물질의 굴절률 측정장치(10)는, 상기 이등방성 시료체(500)의 전방에 형성된 빛의 경로 상에 배치되는 제1 렌즈(610)와, 이등방성 시료체의 후방에 형성된 빛의 경로 상에 배치되는 제2 렌즈(620)를 포함할 수 있다. 이등방성 시료체의 크기에 따라서 제1 렌즈(610) 또는 제2 렌즈(620)를 다른 배율의 렌즈로 대체 할 수 있으며 수 마이크로미터 이하의 작은 시료도 정확하게 광학 상수를 측정할 수 있다. 즉, 제1 렌즈(610) 및 제2 렌즈(620)로 인해 기존의 물질 뿐만 아니라 크기가 작은 2차원 층상 물질 및 박막형 물질에도 적용하여 굴절률 분산 측정을 수행할 수 있다.

[0031] 상기 이등방성 시료체(500)는, 용융실리카를 포함하는 베이스 시료(510)와, 상기 베이스 시료(510) 상의 일부 영역에 형성되고 결정 비대칭성을 가지는 측정 시료(520)를 포함할 수 있다. 상기 측정 시료(520)는 흑린일 수 있으며, 상기 흑린은 접착테이프를 사용하여 흑린 벌크에서 흑린 플레이크를 기계적으로 박리하거나, 플라즈마 처리를 통한 층별 박막을 제조하여 마련할 수 있다. 측정 시료(520)의 두께는 주어진 파장에서 위상 지연과 선형 이색성을 결정하는 중요한 매개변수이며 흑린의 경우 원자력현미경(AFM) 등을 통해 두께를 측정할 수 있다. 이후 설명될 실험예에서 는 무작위 두께 분포를 갖는 박리된 플레이크 중에서 흑린 샘플을 선택했지만 플라즈마 처리를 통한 층별 박막화와 같은 제조 방법을 사용하여 흑린 샘플의 두께를 제어할 수 있다.

[0032] 검출부(700)는 상기 이등방성 시료체(500)로부터 반사된 빛(Lr)을 감지하는 제1 디텍터(710)와, 상기 이등방성 시료체(500)로부터 투과된 빛(Lt)을 감지하는 제2 디텍터(720)를 포함하고, 투과광(Lt)과 반사광(Lr)의 세기를 동시에 측정할 수 있다.

[0033] 신호처리부(800)는 상기 제1 디텍터(710) 및 제2 디텍터(720)와 연결되어 검출된 신호를 처리하고, 투과율 및 반사율을 추출하고, 상기 투과율과 반사율로부터 굴절률의 실험값을 도출할 수 있다. 그리고, 상기 투과율과 반

사율로부터 반사율 스펙트럼에서의 굴절률 실수부를 추정하고, 전달매트릭스 분석 방법을 이용하여 상기 추정된 실수부로부터 반사율 스펙트럼 및 투과율 스펙트럼 값을 동시에 일치시키는 굴절률 허수부를 추정하고, 굴절률을 추출할 수 있다. 즉, 상기 굴절률 측정은, 상기 다중 매질에 대한 전달매트릭스 분석 방법을 적용하여 연산한 이론적인 투과율 및 반사율과, 상기 신호처리부(800)에서 실험적으로 얻은 투과율 및 반사율을 비교하고, 이론적인 값과 실험적인 값을 만족시키는 굴절률을 추출하는 것을 포함할 수 있다.

[0034] 나아가서, 상기 이등방성 물질의 굴절률 측정장치(10)는, 상기 베이스 시료(510)에 대한 투과광 및 반사광의 세기를 측정한 제1 측정값과, 상기 측정 시료(520)에 대한 투과광 및 반사광의 세기를 측정한 제2 측정값을 구하고, 제1 측정값과 제2 측정값을 연산하여 측정 시료의 굴절률을 실험적으로 얻는 것을 포함할 수 있다.

[0035] 도 4를 참조하면, 측정 시료(520)가 흑린이고, 베이스 시료(510)가 용융실리카인 경우, 각 파장에서 획득한 RC 및 TC 값에서 전달매트릭스 분석을 역으로 적용하여 흑린의 복소 굴절률의 실수 성분과 허수 성분을 추출할 수 있다. 전달매트릭스 분석에서 용융실리카 영역의 전기장 진폭(A4, B4)은 2x2 전달 행렬(M)을 공기 영역에서의 전기장 진폭(A1, B1)에 곱하여 계산할 수 있다. 용융 실리카의 굴절률(n_{fs})은 잘 알려져 있기때문에 매트릭스 M은 흑린의 복소 굴절률($\tilde{n}$)과 흑린의 두께 L의 함수이다. 전달매트릭스 분석을 역으로 적용하면 RC 및 TC값이 해당하는 흑린의 복소 굴절률로 변환될 수 있다.

[0036] 도 4와 같이, 공기/흑린/용융실리카의 성층 매질을 통한 파동 전파의 경우 각 계면에서 연속적인 횡방향 전기장과 자기장이 필요한 경계 조건을 풀면 전방 (Ai) 및 후방(Bi) 파동은 다음 식을 따른다.

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1+\tilde{n}}{2\sqrt{\tilde{n}}} & \frac{1-\tilde{n}}{2\sqrt{\tilde{n}}} \\ \frac{1-\tilde{n}}{2\sqrt{\tilde{n}}} & \frac{1+\tilde{n}}{2\sqrt{\tilde{n}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \end{bmatrix}$$

[0037] -------- 식(1)

$$\begin{bmatrix} A_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{i\frac{\tilde{n}\omega L}{c}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\tilde{n}\omega L}{c}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_3 \\ B_3 \end{bmatrix}$$

[0038] ---------식(2)

$$\begin{bmatrix} A_3 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{n_{fs}+\tilde{n}}{2\sqrt{n_{fs}}} & \frac{n_{fs}-\tilde{n}}{2\sqrt{n_{fs}}} \\ \frac{n_{fs}-\tilde{n}}{2\sqrt{n_{fs}}} & \frac{n_{fs}+\tilde{n}}{2\sqrt{n_{fs}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_4 \\ B_4 \end{bmatrix}$$

[0039] ----------식(3)

[0040] 여기서 $\tilde{n}$ (nfs)는 흑린(용융실리카)의 굴절률, L은 흑린의 두께이다. 따라서 (A1, B1)에서 (A4, B4)로의 빛의 이동을 설명하는 총 이동 행렬 M_{tot}는 다음과 같이 개별 행렬의 곱으로 주어질 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1+\tilde{n}}{2\sqrt{\tilde{n}}} & \frac{1-\tilde{n}}{2\sqrt{\tilde{n}}} \\ \frac{1-\tilde{n}}{2\sqrt{\tilde{n}}} & \frac{1+\tilde{n}}{2\sqrt{\tilde{n}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\frac{\tilde{n}\omega L}{c}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\tilde{n}\omega L}{c}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{n_{fs}+\tilde{n}}{2\sqrt{n_{fs}}} & \frac{n_{fs}-\tilde{n}}{2\sqrt{n_{fs}}} \\ \frac{n_{fs}-\tilde{n}}{2\sqrt{n_{fs}}} & \frac{n_{fs}+\tilde{n}}{2\sqrt{n_{fs}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_4 \\ B_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} M_{12} \\ M_{21} M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_4 \\ B_4 \end{bmatrix}$$

[0041] -- ---

- 식(4)

$$\begin{bmatrix} M_{11} M_{12} \\ M_{21} M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1+\tilde{n}}{2\sqrt{\tilde{n}}} & \frac{1-\tilde{n}}{2\sqrt{\tilde{n}}} \\ \frac{1-\tilde{n}}{2\sqrt{\tilde{n}}} & \frac{1+\tilde{n}}{2\sqrt{\tilde{n}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\frac{\tilde{n}\omega L}{c}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\tilde{n}\omega L}{c}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{n_{fs}+\tilde{n}}{2\sqrt{n_{fs}}} & \frac{n_{fs}-\tilde{n}}{2\sqrt{n_{fs}}} \\ \frac{n_{fs}-\tilde{n}}{2\sqrt{n_{fs}}} & \frac{n_{fs}+\tilde{n}}{2\sqrt{n_{fs}}} \end{bmatrix}$$

[0042] --- 식(5)

[0043] 따라서, 공기의 진폭 $\begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{bmatrix}$ 은 용융 실리카의 진폭 $\begin{bmatrix} A_4 \\ B_4 \end{bmatrix}$ 과 전체 전달 매트릭스 $\begin{bmatrix} M_{11} M_{12} \\ M_{21} M_{22} \end{bmatrix}$ 의 곱이며, 반사율 R_{BP+FS}는 $|B_1/A_1|^2 = |M_{21}/M_{11}|^2$ 로 계산되고 투과 T_{BP+FS}는 $|A_4/A_1|^2 = |1/M_{11}|^2$ 로 주어진다. 이로써, 측정된 RC 및 TC 값을 동시에 가장 잘 설명할 수 있는 흑린의 복소굴절률 $\tilde{n}$ 과 전체 행렬 M_{tot}를 추출할 수 있다.

[0044] 복소 굴절률을 추출하기 위해 먼저 MATLAB에서 비선형 최소 제곱 솔버 방법을 사용하여 실험적으로 측정된 RC(반사율) 스펙트럼에서 굴절률의 실수부를 추정할 수 있다. 그 다음 굴절률 분산의 추정된 실수 부분으로 측정된 RC 스펙트럼 및 TC(투과율) 스펙트럼 값을 동시에 가장 잘 일치시키는 수치적 방법을 통해 복소 굴절률을 추출할 수 있다. 따라서 본 발명의 실시예에 따른 이등방성 물질의 굴절률 측정장치는 실험을 통하여 광원부(100)가 제공하는 소정의 파장범위에서 각 파장에 따른 반사율과 투과율을 동시에 측정할 수 있으며, 상기 투과율과 반사율로부터 반사율 스펙트럼에서의 굴절률 실수부를 추출하고, 전달매트릭스 분석 방법을 이용하여 상기 추정된 실수부로부터 반사율 스펙트럼 및 투과율 스펙트럼 값을 동시에 일치시키는 굴절률 허수부를 추출할 수 있다. 따라서 비대칭성을 가지는 물질 또는 박막형 물질의 굴절률 측정의 정확성이 향상될 수 있으며, 파장에 따른 굴절률 분산 도출의 정확성 및 재현성이 더욱 향상될 수 있다.

[0045] AC 및 ZZ 편광 모두에 대해 복소 굴절률이 결정되면 흑린의 굴절률에 대해 $\tilde{n}_{AC}$ 및 $\tilde{n}_{ZZ}$ 를 삽입하여 위의 행렬 계산을 수행하여 투과율 T_{AC} 및 T_{ZZ}를 얻을 수 있다.

[0046] 그러면 ZZ 편광의 투과율을 AC 편광의 투과율로 나눈 감쇠비는 T_{ZZ}/T_{AC}로 주어진다. 한편, 용융 실리카에서 투과된 전기장과 공기에서 입사 전기장 사이의 진폭 비율 A_4/A_1 은 복소수 변수이며 $A_4/A_1 = x + iy$ $= |A_4/A_1| \times \exp(i\theta)$ 로 쓸 수 있다. 여기서 $\theta = \tan^{-1}\frac{y}{x}$ 이고, 입사 영역에 대한 전송 영역의 상대적 위상을 설명한다. 흑린의 이방성 복소 굴절률을 고려하면서 전달 매트릭스 분석 형식을 적용하여 AC 및 ZZ 편광 모두에 대해 진폭 비율 A_4/A_1 이 계산되면 $\delta = \theta_{ZZ} - \theta_{AC}$ 인 위상 지연(δ)을 얻을 수 있다.

[0047] 흑린의 광학 분산을 공식화하기 위해 다음 방정식으로 설명되는 Cauchy 흡수 모델을 채택하였다. 먼저 실험적으로 반사율과 투과율 스펙트럼을 측정하고 전달 매트릭스 분석(TMM)을 통해 흑린의 복소 굴절률을 획득할 수 있다. 그리고, 540~1500nm의 가시광선 및 근적외선 영역에서 획득한 굴절률은 AC 및 ZZ 편광 성분에 대해서 모두 Cauchy 흡수 방정식으로 모델링될 수 있다. 흑린을 통과하는 선형 편광이 이방성 복합 굴절률의 결과로 타원 편광이 되며, 편광도(DOP)는 흑린 샘플 두께 및 파장뿐만 아니라 입력 편광 각도에 크게 의존할 수 있다.

[0048] 흑린의 경계면에서의 관측된 다중 반사는 사인파 파장 의존성을 유도할 수 있다.

$$n(\lambda) = A + B\frac{10^4}{\lambda^2} + C\frac{10^9}{\lambda^4}$$

[0049] ----------식(6)

$$\kappa(\lambda) = D \times 10^{-5} + E\frac{10^4}{\lambda^2} + F\frac{10^9}{\lambda^4}$$

[0050] ----------식(7)

[0051] 여기서, 파장(λ)은 nm 단위이고, (A, B, C) 및 (D, E, F)는 각각 굴절률 및 소광계수에 사용되는 계수이다.

표 1

[0052]

	A	B	C	D	E	F
ZZ direction	3.57	6.79	39.99	3206	-0.521	10.26
AC direction	3.48	6.76	35.48	32780	-10.98	50.71

[0053] 따라서 흑린의 경우, TMDC의 밸리 선택적 여기를 위한 원형 편광을 생성하는 수단으로 위상 지연을 제공할 수 있으며, 본 발명의 실험예로써 입증된 흑린의 복굴절성은 흑린/TMDC 이종 구조 형태의 새로운 밸리트로닉스 요소 개발에 활용될 수 있다.

[0054] 흑린 결정의 광학 위상 지연 및 편광 조작에 대해 하기와 같이 설명한다. AC 축에 대해 각도 Θ만큼 기울어진 선형 편광된 빛이 두께 L의 흑린 결정에 입사하면, 계면 반사를 무시하는 가정에서 전달된 전기장은 다음과 같다.

[0055] $\mathbf{E} = E_0 . \cos\Theta \cdot e^{-2\pi L\kappa/\lambda} \cdot \cos(\omega t)x + E_0 . \sin\Theta . e^{-2\pi L\kappa/\lambda} . \cos(\omega t - \delta)y,$

[0056] $\delta \equiv (n_{ZZ} - n_{AC}) . 2\pi L/\lambda$ ---------- 식(8)

[0057] 여기서 E_0는 입사 전계 진폭, ω는 주파수, x 및 y는 각각 AC 및 ZZ 축을 따른 단위 벡터이다. 이때 유도위상지연(δ)은 복굴절에 두께를 곱한 값에 비례하고 선형 이색성(Linear dichroism)으로 인해 진폭이 이방성으로 감쇠된다. 그러나 air/BP(공기/흑린) 및 BP/FS(흑린/용융실리카) 경계면 모두에서 발생하는 반사가 복잡성을 추가하므로 전송된 전기장을 해결하려면 전달매트릭스 분석이 필요하다고 볼 수 있다.

[0058] 또한, 상기의 문제를 해결하기 위하여 본 발명은 상기 이등방성 물질의 굴절률 측정장치(10)를 이용하는 이등방성 물질의 굴절률 측정방법을 제공할 수 있다. 이등방성 물질의 굴절률 측정방법은 하기 실험예를 통하여 구체적으로 설명하도록 한다.

[0059] 이하, 본 발명에 따른 이등방성 물질의 굴절률 측정장치 및 그를 이용한 측정방법을 하기 실험예를 통해 설명하겠는 바, 하기 실험예는 본 발명을 설명하기 위한 예시일 뿐 본 발명이 이에 한정되는 것은 아니다.

[0060] **실험예**

[0061] **1) 샘플제작**

[0062] 접착테이프를 사용하여 흑린 벌크에서 흑린 플레이크를 기계적으로 박리하고 투명한 용융 실리카(FS) 기판 상에 형성하였다. 본 실험예에 제작한 두 가지 흑린 플레이크의 광학 이미지는 도 5와 같다. S1에서 S4로 표시된 비교적 평평한 영역은 추가 광학 조사를 위해 선택하였다. 샘플 두께는 원자 현미경을 사용하여 단면 표면 프로파일에서 선험적으로 획득한 것이다. 지점 S1은 226 nm, 지점 S2는 171 nm, 지점 S3은 484 nm, 지점 S4는 488 nm로 두께가 측정되었다. 상온 대기 환경에서 일어나는 표면 열화를 방지하기 위해 제작된 샘플은 진공 조건에서 보관하고 측정하였다.

[0063] **2) 실험 셋업**

[0064] 상기 샘플의 이등방성 굴절률과 흡수계수를 얻기 위해 도 3의 장치를 이용하였으며, 두 편광 상태에서, 540~1500 nm의 스펙트럼 범위에서 RC(반사) 및 TC(투과) 스펙트럼을 동시에 측정하였다. 광원으로 수퍼컨티늄

광원(SuperK compact, NKT Photonics)을 이용하였고, 분광기로는 모노크로메이터(DK240, CVI)를 이용하여 분광하여 빔스플리터와 대물렌즈(M Plan Apo NIR × 20, Mitutoyo)를 통과하도록 하며 빛을 시료에 입사시켰다. 검출부로는 가시광선 파장영역은 Si 포토다이오드, 근적외선 파장영역은 Ge 포토다이오드를 이용하여 반사광 및 투과광 세기를 동시에 측정하였다. 그리고, 선형 편광자와 나란히 위치한 위상지연자(반파장판)를 회전시켜 선형 편광을 변화시켰다. 흑린 플레이크와 용융실리카 기판 모두에서 반사 및 투과된 빛의 세기를 측정했으며, RC는 용융 실리카 기판에서의 반사 강도에 대한 흑린 플레이크에서의 반사 강도 비율, TC는 용융 실리카 기판에서의 투과 강도에 대한 흑린 플레이크에서의 투과 강도 비율로 정의하였다.

[0065] **3) 흑린을 편광자로 사용한 실험**

[0066] TMDC의 밸리 선택적 여기를 위한 원형 편광을 생성하는 수단으로써 흑린을 이용하기 위한 검증을 위해 실험을 하였다. 도 9는 흑린을 편광자로 사용한 실험을 나타낸 개략도이다. 도 9와 같이 편광자(201)를 이용하여 AC 방향에서 14° 의 편광 각도를 가지도록 빛을 선형 편광하고, 488nm 두께의 흑린(501)으로 통과시키며 검출기(701)를 이용하여 분석기(900) 각도(Analyzer angle,ϕ)에 따른 광강도를 측정하였다. 그리고, 흑린이 제공하는 위상 지연에 대해 실험하기 위해, 입력 광의 파장과 편광 각도를 변화시키면서 출력 편광을 조사하였다.

[0067] **비교예**

[0068] 도2에 정리된 논문 4가지(하기 참조)의 실험결과를 비교예로 참조하였다.

[0069] Ref.1) Mao N et al 2016 Optical anisotropy of black phosphorus in the visible regime. J. Am. Chem. Soc. 138 300-5

[0070] Ref.2) Schuster R, Trinckauf J, Habenicht C, Knupfer M and Buchner B 2015 Anisotropic particle-hole excitations in black phosphorus. Phys. Rev. Lett. 115 026404

[0071] Ref.3) Wang X and Lan S 2016 Optical properties of black phosphorus. Adv. Opt. Photon. 8. 618-55

[0072] Ref.4) Jiang H, Shi H, Sun X and Gao B 2018 Optical anisotropy of few-layer black phosphorus visualized by scanning polarization modulation microscopy. ACS Photon. 5 2509-15

[0073] **결과1**

[0074] 도 6은 도 5의 지점 S1에 대해 550nm에서 편광 각도의 함수로서의 투과율의 극좌표를 나타낸 그래프이다. 예상 두께가 226nm인 지점 S1에 대해 550nm에서 편광의 함수로서의 투과율의 극좌표 그래프로써, 광흡수의 강한 이등방성 때문에 흑린 결정의 두 주축인 AC와 ZZ 방향은 각각 최소 투과율과 최대 투과율의 편광을 통해 확인되었다.

[0075] **결과2**

[0076] 도 7은 도 5의 흑린을 시료로 사용한 ZZ 방향의 입사 파장과 AC 방향의 입사 파장에 따른 반사와 투과에 대한 실험값과 이론값을 나타낸 그래프로써, 도 5의 S1 지점에서 편광에 민감한 RC 및 TC 스펙트럼을 나타낸 것이다. 여기서, 반사율은 용융 실리카 기판보다 흑린에서 더 강하기 때문에 RC는 1보다 크며, AC 방향과 평행한 편광의 TC(도8의 b)가 ZZ 방향과 평행한 편광의 TC(도 7의 b)보다 작다는 것은 흑린의 선형 이색성이 크다는 것을 나타낸다. 또한, 도 7을 볼 때, 실험적 RC 및 TC 스펙트럼을 잘 재현하는 복소 굴절률 분산을 얻어내었음을 알 수 있다.

[0077] **결과3**

[0078] 도 8은 파장에 따른 굴절률(n)과 흡광계수(κ)와, ZZ방향과 AC방향의 파장에 따른 굴절률과 흡광계수의 차이를 나타낸 그래프이다. 지점 S2 내지 S4에 대해서도 결과 2와 같이 ZZ 방향 및 AC 방향의 입사 파장에 따른 반사와 투과에 대한 실험값과 이론값을 도출한 후, 굴절률(n)과 소광 계수(κ) 분산을 AC 방향의 입사 및 ZZ 방향의 입사 모두에 대해 시뮬레이션하여, 도 9와 같이 나타났다. 여기서 평균 분산은 점선으로 표시된 것이다.

[0079] 도 8에서 실선으로 표시된 바와 같이, 표 1의 편광 의존적 A-E 계수는 540~1500 nm 파장 영역에서 이방성 굴절률과 소광 계수 분산을 설명할 수 있다. 도 10에서는 $\Delta n = n_{ZZ} - n_{AC}$인 복굴절의 파장 의존성과 $\Delta \kappa = \kappa_{AC} - \kappa_{ZZ}$의 선형 이색성을 보여준다. AC 편광의 소광 계수는 ZZ 편광의 것보다 실질적으로 크고, ZZ 편광의 굴절률은 AC 편광의 굴절률보다 약간 더 크며 그 굴절률 차이는 540 nm에서 0.15, 1500 nm에서 0.1로 다양함을 알 수 있

다.

[0080] 본 실험예에서 얻은 흑린의 광학 상수를 비교예의 논문들과 비교하면, 비교예(도2)에서는 논문 간의 불일치가 다소 크지만, 본 발명에서는 본 발명의 굴절률 측정장치(10)로부터 정확하게 측정된 투과율 및 반사율 스펙트럼과, 일관성을 가진 실험 결과를 기반으로 하는 신뢰성을 보여주고 있다.

[0081] **결과 4**

[0082] 도 10은 도 9의 실험에 있어서 흑린을 통과하기 전과 후에 분석기 각도(ϕ)에 따라 측정된 광 강도 그래프이다.

[0083] 도 9 및 10을 참조하면, 선형 입사광에 대한 강도는 흑색선이고, 출력광에 대한 광도는 적색선으로 표시하였으며, 광파장은 630nm이었다. 이 때 입사광과 출력광에 대한 편광 모양은 굴절률 분산으로부터 계산한 시뮬레이션 결과로 도 9에 나타난 바와 같다. 투과광의 위상 지연을 입증하기 위해 선형 편광 빛이 흑린를 통과할 때 발생하는 편광 변화를 조사하였다. 즉, 도9에서 보는 바와 같이 검출기(701)와 흑린(501) 사이에서 분석기(900)를 회전시키면서 투과 강도를 측정하여 출력 편광 상태를 검증하였다. 도 9(a)는 488nm 두께의 흑린 통과한 후 파장 630nm에서 입사하는 선형 편광이 어떻게 변화되는지 보여준다. 여기에서 AC 및 ZZ 편광이 흑린을 통과한 후 강도가 비슷해지도록 14° 의 편광 각도를 선택하였다. 흑린을 통과한 후 선형 편광이 0.49의 타원율로 타원 편광되고 선형 이색성으로 인해 주축이 14° 에서 44.5° 로 변경된다. 이 편광 변화는 주로 광학 위상 지연으로 인해 발생하며 단일 통과 지연은 실험된 파장과 두께에 대해 0.61 라디안이다.

[0084] 도 11은 도 5의 흑린에 대한 빛의 입사 편광각도 및 입사 파장에 따른 편광도의 실험값과 이론값을 나타낸 그래프이다.

[0085] 흑린이 제공하는 위상 지연에 대한 추가 실험을 위해 입력 광의 파장과 편광 각도를 변화시키면서 출력 편광을 조사하였으며, 이 때 편광 선형성의 척도로써 $(I_{max} - I_{min})/(I_{max} + I_{min})$으로 정의되는 편광도(DOP)를 사용하였다. 여기서 I_{max} 및 I_{min}은 편광의 분석기 각도 의존성의 최대 및 최소 강도이다. 측정된 DOP 등고선 맵은 각각 수평 및 수직 축에서 광 파장 및 입력 선형 편광 각도의 함수로, 도11의 (a)와 같다. 그림 11(a)의 오른쪽 패널은 630nm 파장에서 DOP를 입력 편광 각도의 함수로 보여주며, DOP 실험 결과와 그에 따른 흑린의 광학 상수를 검증하기 위해 도 8의 굴절률과 소광 계수의 Cauchy 흡수 모델을 사용하여 DOP의 TMM 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 도 11과 같이, 시뮬레이션 결과(b)는 실험 결과(a)와 모양 및 절대 크기 모두에서 유사성을 보여주었다. 이는 Cauchy 흡수 모델이 신뢰할 수 있다는 것을 증명하며 흑린 기반 광전소자 장치에도 응용될 수 있음을 알 수 있다. 색이 보라색에 가까울수록 흑린을 투과하면서 편광변화가 크다는 것을 의미하는데, 실험으로 측정한 편광변화값이 측정한 굴절률로 계산한 편광변화 시뮬레이션과 거의 일치하였다. 즉, 본 발명의 이등방성 물질의 굴절률 측정장치 및 그를 이용한 측정방법은 투과율과 반사율을 동시에 측정하여 정확한 굴절률을 알아냈다는 것을 의미한다. 즉, 전달매트릭스 분석방법을 통해 광학 위상 지연 및 해당 DOP 스펙트럼을 재현할 수 있음을 알 수 있다.

[0086] 도 12는 도 5의 흑린에 대한 AC방향과 ZZ방향 편광 사이의 위상지연 시뮬레이션 및 AC와 ZZ 편광 사이의 감쇠비율 시뮬레이션을 나타낸 그래프이다. 도 12는 위상 지연과 감쇠비의 실험적으로 추출된 결과와 시뮬레이션된 결과를 모두 보여주며 전체적인 일치를 보여준다. 여기서 감쇠비는 ZZ 편광의 세기 투과율을 AC 편광의 투과율로 나눈 값으로 정의되며 위상 지연은 두 출력 편광 사이의 유도 위상차이다. 도 12에 나타난 바와 같이, 스펙트럼 변조는 박막 간섭이 흑린의 위상 지연과 이방성 흡수 모두에 강한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 흑린의 선형 이색성으로 인한 감쇠비는 큰 감쇠비에도 불구하고 짧은 파장에서 낮은 DOP가 달성되도록 입력 편광 각도를 제어하여 보상할 수 있다. 궁극적으로 큰 편광 상태 변화(또는 낮은 DOP 영역)는 감쇠비에서 비롯된 주 편광 축 회전과 두 축의 복굴절로 인한 위상 지연 모두에서 발생한다.

[0087] 상기 실험예들의 결과로부터 가시광선 및 근적외선 영역에서 흑린의 이등방성 굴절률 및 흡수계수 분산은, 동시에 측정된 굴절률 및 투과율 스펙트럼의 실험값과 전달매트릭스 분석으로부터 추출하여 구할 수 있다. 본 발명에 따른 Cauchy 흡수 모델의 편광 의존 계수는 흑린 나노 소자의 이방성 광학 특성을 이해하는 데 널리 사용될 수 있다. 또한, 488nm 두께의 흑린 결정을 통과한 후 선형 편광이 0.61만큼 낮은 DOP로 타원 편광된다는 것을 보여주는 프로토타입 2D 재료 광학 위상 지연기를 시연하였다. 그리고, 박막 간섭이 흑린 결정의 위상 지연과 편광에 민감한 흡수 모두에 상당한 영향을 미친다는 것을 실험적으로 보여주었으며, 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 통하여 광학 상수와 흑린의 위상 지연의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

[0088] 본 발명의 실시예에 따른 이등방성 물질의 굴절률 측정장치 및 그를 이용한 측정방법은 파장에 따라 이등방성

시료체로부터 투과광과 반사광을 동시에 검출하여 비대칭성을 가지는 물질 또는 박막형 물질의 굴절률 측정의 정확성이 향상될 수 있으며, 파장에 따른 굴절률 분산 도출의 정확성이 더욱 향상될 수 있는 장점이 있다.

[0089] 상기에서는 본 발명의 바람직한 실시예를 참조하여 설명하였지만, 해당 기술 분야의 숙련된 당업자는 하기의 특허 청구의 범위에 기재된 본 발명의 사상 및 영역으로부터 벗어나지 않는 범위 내에서 본 발명을 다양하게 수정 및 변경시킬 수 있음을 이해할 수 있을 것이다.

부호의 설명

[0090] 10; 이등방성 물질의 굴절률 측정장치

100; 광원부

110; 광원

120; 분광기

130; 미러

200; 편광판

300; 위상지연자

400; 빔스플리터

500; 이등방성 시료체

510; 베이스 시료

520; 측정 시료

610; 제1 렌즈

620; 제2 렌즈

700; 검출부

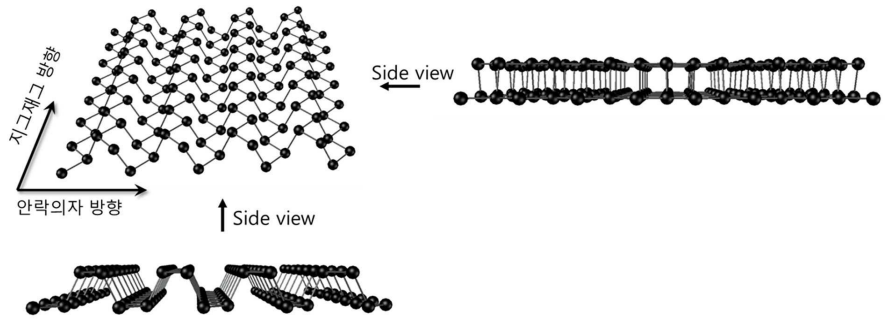
710; 제1 디텍터

720; 제2 디텍터

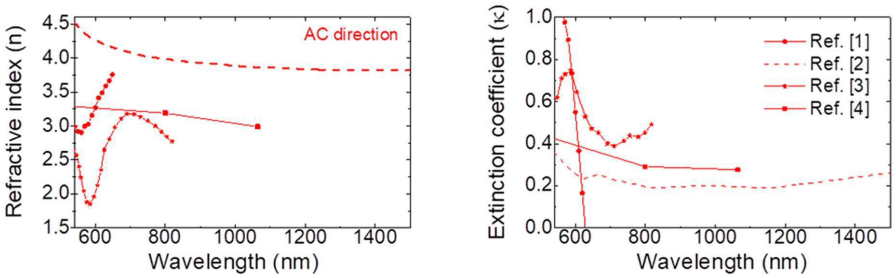
800; 신호처리부

도면

도면1

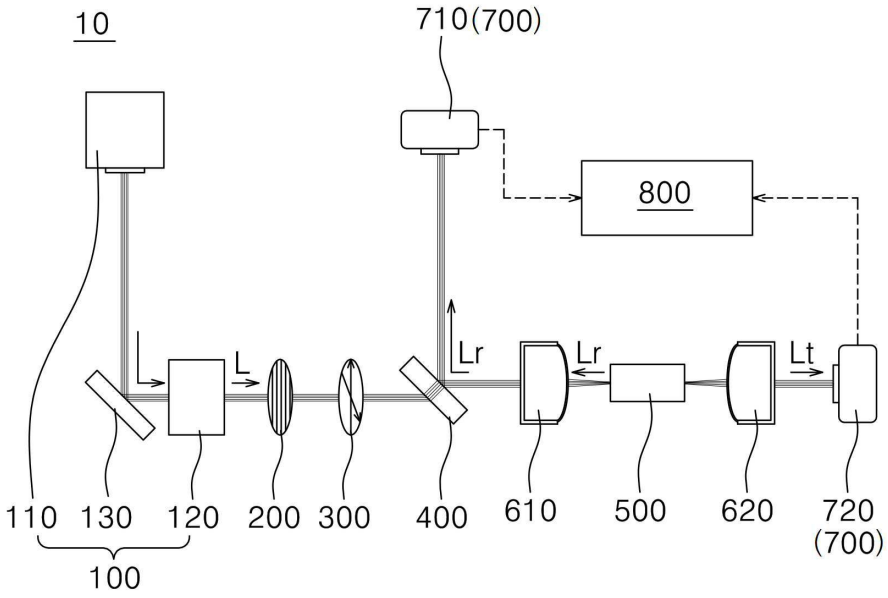


도면2

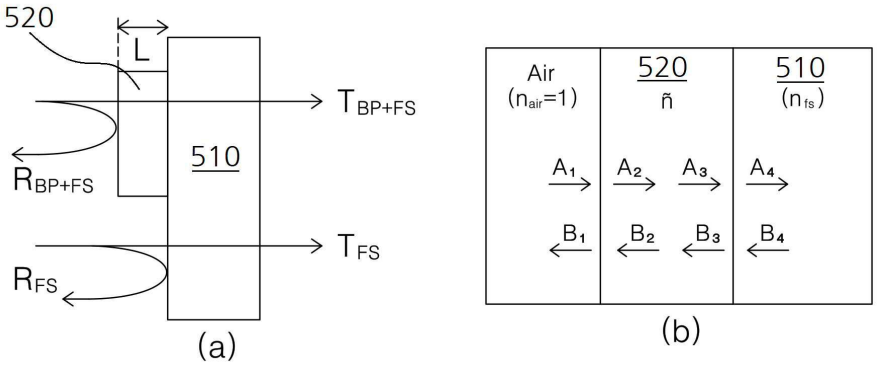


Ref [1] doi.org/10.1021/jacs.5b10685
Ref [2] doi:10.3390/nano9020168
Ref [3] doi.org/10.1364/AOP.8.000618
Ref [4] DOI: 10.1021/acsphotonics.8b00341

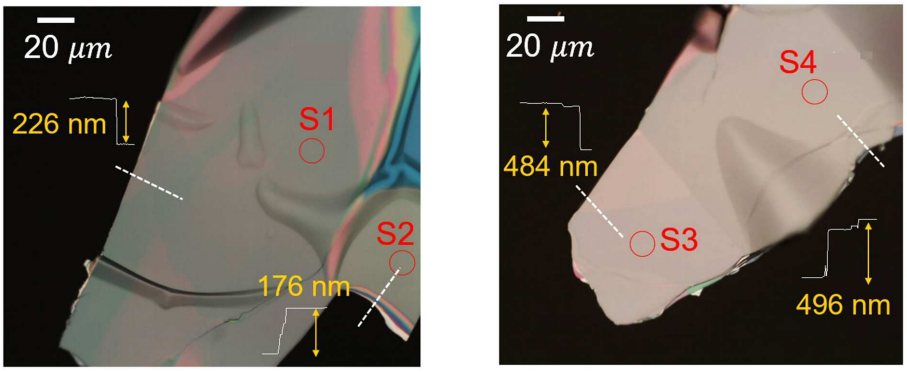
도면3



도면4

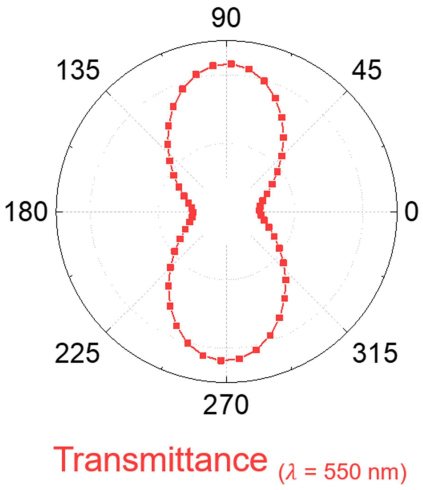


도면5

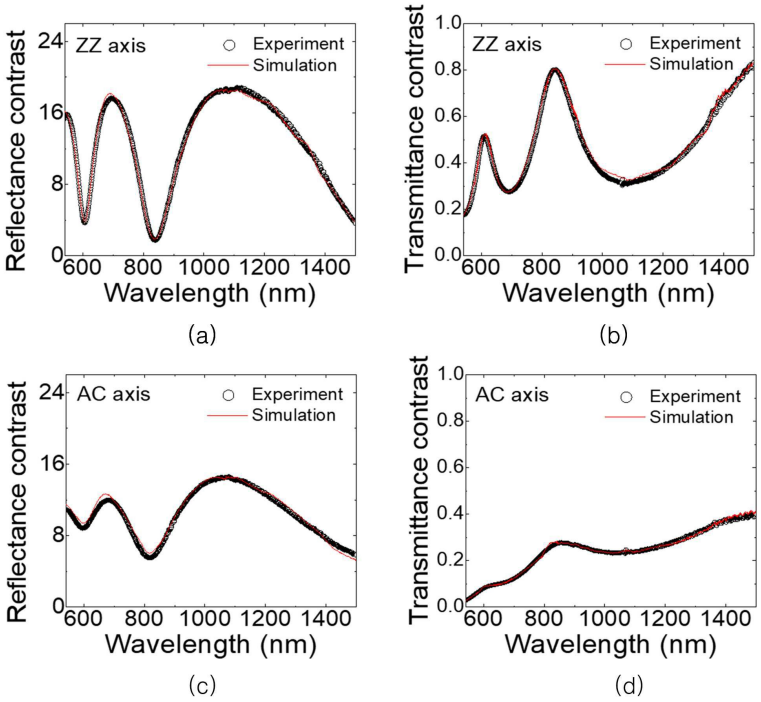

20 μm
226 nm
S1
S2
176 nm
20 μm
S4
484 nm
S3
496 nm

(a) (b)

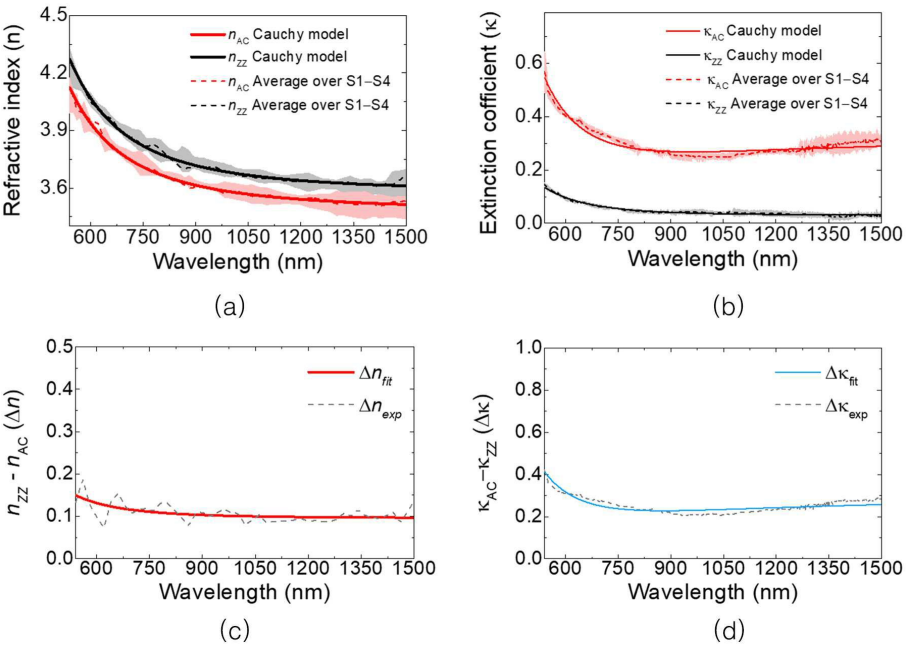
도면6


90
135
45
180
0
225
315
270
Transmittance (λ = 550 nm)

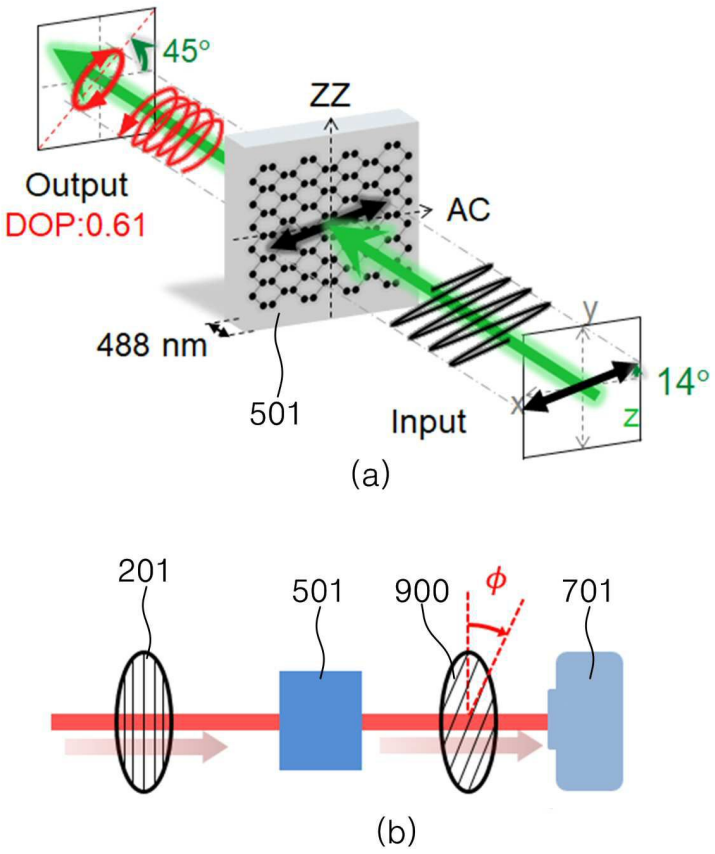
도면7


ZZ axis
Experiment
Simulation
Reflectance contrast
Transmittance contrast
Wavelength (nm)
(a)
(b)
AC axis
(c)
(d)

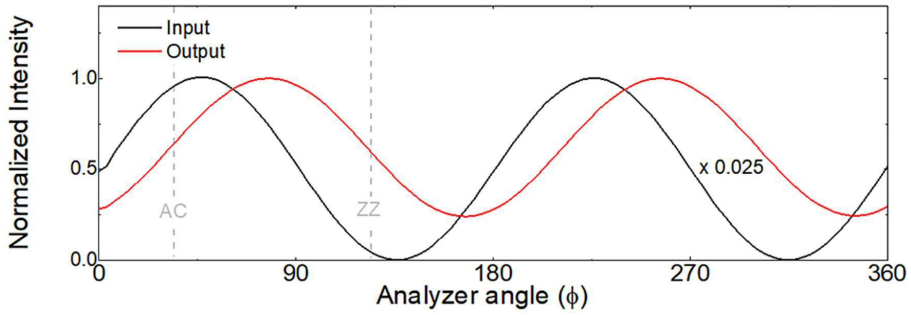
도면8


Refractive index (n)
Extinction cofficient (κ)
Wavelength (nm)
(a)
(b)
(c)
(d)

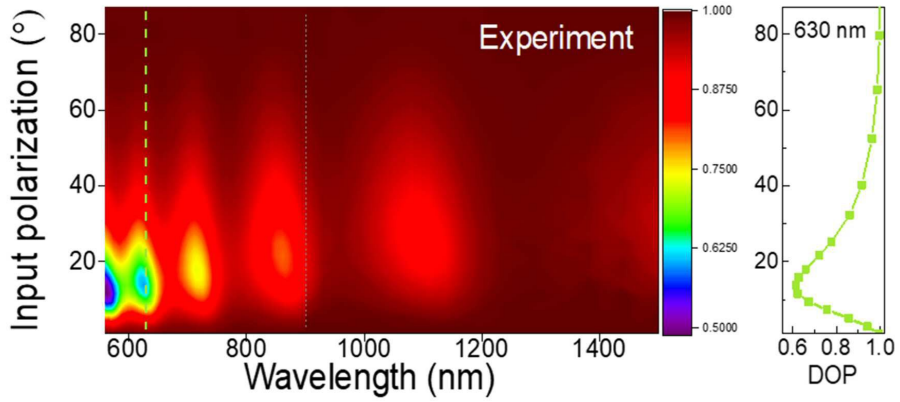
도면9


45°
ZZ
Output
DOP:0.61
AC
488 nm
501
Input
y
x
z
14°
(a)
201
501
900
ϕ
701
(b)

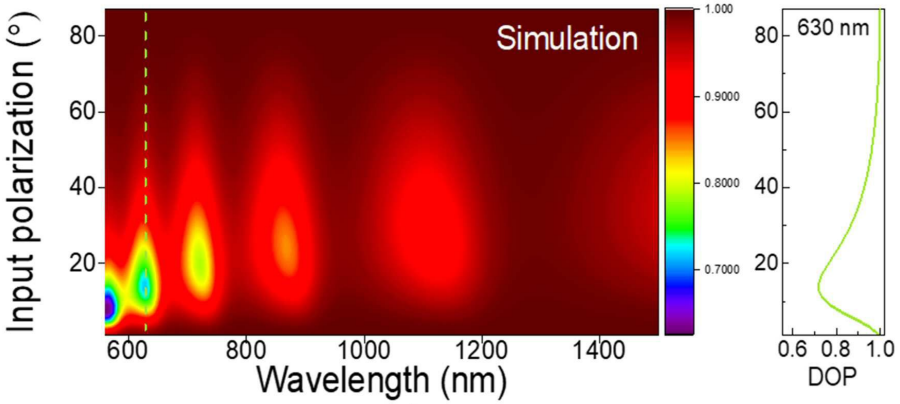
도면10


Input
Output
Normalized Intensity
1.0
0.5
0.0
AC
ZZ
x 0.025
0
90
180
270
360
Analyzer angle (ϕ)

도면11

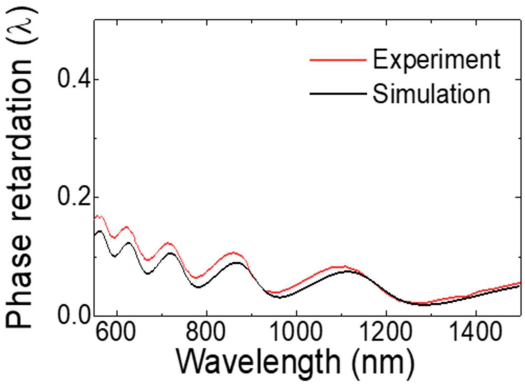

Experiment
Input polarization (°)
Wavelength (nm)
630 nm
DOP

(a)

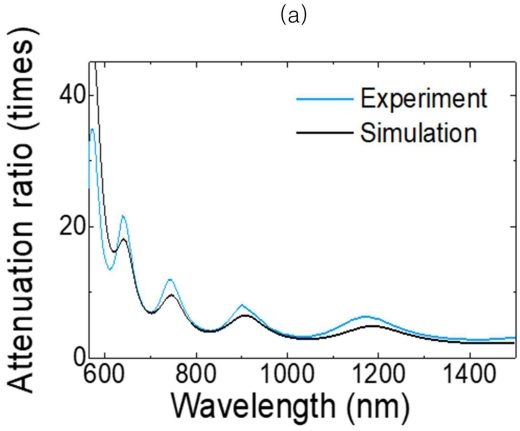

Simulation
Input polarization (°)
Wavelength (nm)
630 nm
DOP

(b)

도면12


Phase retardation (λ)
0.0
0.2
0.4
600
800
1000
1200
1400
Wavelength (nm)
Experiment
Simulation

(a)


Attenuation ratio (times)
0
20
40
600
800
1000
1200
1400
Wavelength (nm)
Experiment
Simulation

(b)