



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0031276
(43) 공개일자 2025년03월07일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G02B 21/00 (2022.01) G02B 21/14 (2006.01)
G02B 21/36 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G02B 21/0092 (2013.01)
G02B 21/14 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-0112524
(22) 출원일자 2023년08월28일
심사청구일자 2023년08월28일

(71) 출원인
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암
동5가)
(72) 발명자
최영운
서울특별시 서초구 서초중앙로 242
박관준
서울특별시 동대문구 왕산로 190
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
정은열, 김태훈

전체 청구항 수 : 총 7 항

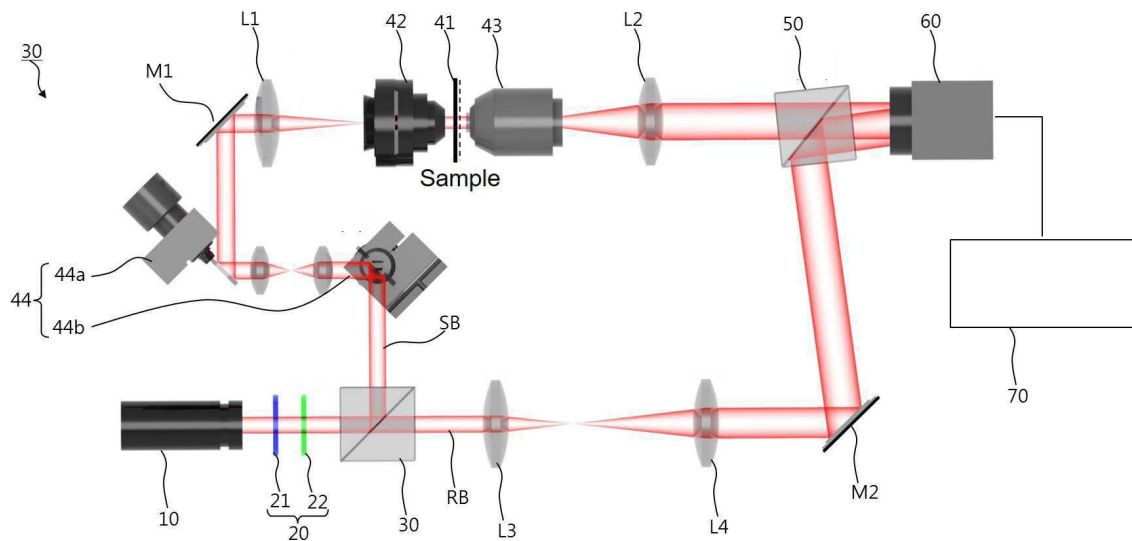
(54) 발명의 명칭 편광 위상 현미경 시스템

(57) 요약

본 발명은 편광 위상 현미경 시스템에 관한 것으로, 본 발명의 실시예에 따른 편광 위상 현미경 시스템은 레이저 빔을 조사하는 광원(10), 및 광원(10)에서 조사된 레이저 빔을 원형편광 빔으로 변환하는 원형편광 필터부(20), 원형편광 필터부(20)에서 변환된 원형편광 빔을 샘플광(SB) 및 기준광(RB)으로 분배하는 제1 광분배기(30), 제1

(뒷면에 계속)

대표도 - 도1



광분배기(30)에서 분배된 샘플광(SB)을 샘플에 입사시켜 샘플광(SB)에 샘플에 대한 영상을 형성하는 샘플 영상 형성부(40), 샘플 영상 형성부(40)를 통과한 샘플광(SB)과, 제1 광분배기(30)에서 분배된 기준광(RB)을 합쳐서 간섭 현상을 유도하는 제2 광분배기(50), 4개의 서로 다른 편광 축을 갖는 선형 편광 필터(61)를 포함하고, 제2 광분배기(50)를 통과한 샘플광(SB) 및 기준광(RB)을 수광하여 간섭 영상을 단일 촬영하는 편광카메라(60), 및 편광카메라(60)에서 단일 촬영된 간섭 영상을, 4개의 상기 선형 편광 필터(61)에 대응되도록 분할하여 서로 다른 편광 상태를 갖는 다중 편광 간섭 영상을 생성하고, 다중 편광 간섭 영상을 기반으로 샘플에 대한 존스 행렬을 구성하는 영상 처리부(70)를 포함한다.

(52) CPC특허분류

G02B 21/361 (2013.01)

G02B 21/365 (2013.01)

(72) 발명자

강용국

서울특별시 성북구 성북로4길 52

양태석

서울특별시 동작구 국사봉10길 10

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711185011
과제번호	2021R1A2C2012069
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)
연구과제명	편광 위상 영상을 통한 무 표지 생체조직 영상 분할 및 암 검출 기술 개발
기 여 율	50/100
과제수행기관명	고려대학교
연구기간	2023.03.01 ~ 2024.02.29

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711193862
과제번호	2020-0-00997-004
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	정보통신기획평가원
연구사업명	홀로그래픽심기술개발
연구과제명	(세부3)홀로그램 복원 및 측정검사용 저작 모듈 기술 개발
기 여 율	25/100
과제수행기관명	한국광기술원
연구기간	2023.01.01 ~ 2023.12.31

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1415185772
과제번호	20010031
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국산업기술평가관리원
연구사업명	차세대지능형반도체기술개발(설계제조)(R&D)
연구과제명	반도체 3D 패키징 입체구조의 대면적 검사를 위한 홀로그래피 기반 자동 광학 검사 장비 개발
기 여 율	25/100
과제수행기관명	(주)히스컴퍼니
연구기간	2023.01.01 ~ 2023.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

레이저 빔을 조사하는 광원;

상기 광원에서 조사된 상기 레이저 빔을 원형편광 빔으로 변환하는 원형편광 필터부;

상기 원형편광 필터부에서 변환된 상기 원형편광 빔을 샘플광 및 기준광으로 분배하는 제1 광분배기;

상기 제1 광분배기에서 분배된 상기 샘플광을 샘플에 입사시켜 상기 샘플광에 상기 샘플에 대한 영상을 형성하는 샘플 영상 형성부;

상기 샘플 영상 형성부를 통과한 상기 샘플광과, 상기 제1 광분배기에서 분배된 상기 기준광을 합쳐서 간섭 현상을 유도하는 제2 광분배기;

4개의 서로 다른 편광 축을 갖는 선형 편광 필터를 포함하고, 상기 제2 광분배기를 통과한 상기 샘플광 및 상기 기준광을 수광하여 간섭 영상을 단일 촬영하는 편광카메라; 및

상기 편광카메라에서 단일 촬영된 상기 간섭 영상을, 4개의 상기 선형 편광 필터에 대응되도록 분할하여 서로 다른 편광 상태를 갖는 다중 편광 간섭 영상을 생성하고, 상기 다중 편광 간섭 영상을 기반으로 상기 샘플에 대한 존스 행렬을 구성하는 영상 처리부;를 포함하는 편광 위상 현미경 시스템.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 원형편광 필터부는,

상기 광원에서 조사되어 상기 제1 광분배기를 향하는 상기 레이저 빔의 경로 상에 배치되는 반 파장판; 및

상기 반 파장판 및 상기 제1 광분배기 사이의 상기 레이저 빔의 경로 상에 배치되는 1/4 파장판;을 포함하는 편광 위상 현미경 시스템.

청구항 3

청구항 1에 있어서,

상기 샘플 영상 형성부는,

상기 샘플을 거치하는 샘플 거치대;

상기 샘플 거치대에 거치된 상기 샘플에, 상기 제1 광분배기에서 분배된 상기 샘플광을 조사하는 조명용 렌즈; 및

상기 샘플을 통과한 상기 샘플광이 입사되는 대물렌즈;를 포함하는 편광 위상 현미경 시스템.

청구항 4

청구항 3에 있어서,

상기 샘플 영상 형성부는,

상기 제1 광분배기에서 분배되어 상기 조명용 렌즈로 입사되는 상기 샘플광의 각도를 조절하는 갈바노 스캐너;를 더 포함하는 편광 위상 현미경 시스템.

청구항 5

청구항 1에 있어서,

상기 제2 광분배기를 통과한 상기 샘플광과 상기 기준광이 서로 소정의 각도를 이루는 탈축(off-axis) 방식으로 상기 편광카메라에 입사되는 편광 위상 현미경 시스템.

청구항 6

청구항 1에 있어서,

상기 영상 처리부는,

상기 다중 편광 간섭 영상을 힐버트 변환(Hilbert transform) 하여 편광 필드 영상을 생성하고,

상기 편광 필드 영상을 분석하여 상기 샘플의 위상지연, 회전각 및 위상 정보에 관한 정보를 추출하며,

추출된 상기 샘플의 위상지연, 회전각 및 위상 정보를 기반으로, 상기 존스 행렬을 구성하는 편광 위상 현미경 시스템.

청구항 7

청구항 6에 있어서,

상기 편광 필드 영상은,

상기 4개의 서로 다른 편광 상태별 진폭 영상 및 위상 영상을 포함하는 편광 위상 현미경 시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 편광 위상 현미경 시스템에 관한 것으로, 보다 상세하게는 편광 카메라를 활용하여 기존보다 현저히 간소화된 광학계 구성에서 단일 촬영으로 샘플의 편광 반응 특성인 존스 행렬을 구성하는 편광 위상 현미경 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 편광은 전자기파의 일종인 빛이 특정한 진동 방향으로 정렬되어 진행하는 현상으로, 빛의 전기장 진동 방향에 따라 선형 편광, 원형 편광, 타원 편광의 형태로 구분된다. 편광은 빛의 전기장 진동 방향을 나타내는 물리량이며, 완전한 편광 정보를 얻기 위해서는 빛의 세기와 위상 정보를 모두 측정해야 한다. 빛과 물체 사이의 상호작용으로 인해 발생하는 편광 상태의 변화를 시각화하는 장비로서 편광현미경이 사용되지만, 빛의 세기만을 측정하므로 편광 상태에 대해 완전히 기술할 수 없다. 따라서 편광현미경은 샘플의 편광 상태를 정성적으로 파악할 수 있지만, 완전한 편광 정보와 위상 정보를 제공할 수 없다.

[0004] 한편, 편광 위상 현미경은 편광에 대한 완전한 정보를 얻을 수 있는 장비로 알려져 있다. 편광 위상 현미경은 빛의 세기와 위상 정보를 모두 측정하는 디지털 홀로그래피라는 간섭 이미징 기술을 활용한다. 디지털 홀로그래피는 물체와 상호작용한 빛의 편광 상태를 세기와 위상 정보가 포함된 복소수 형태로 기록하여 정량적인 편광 반응을 측정할 수 있다. 디지털 홀로그래피 기법은 빛의 간섭 현상을 이용하여 물체에 대한 세기와 위상 정보를 동시에 측정할 수 있는 영상 기술이다. 이를 통해 물체의 형태적 정보인 두께, 부피, 건조 질량, 굴절률 분포 등을 정량적으로 획득할 수 있다.

[0005] 편광 위상 현미경에서는 존스 행렬 (Jones matrix)을 사용하여 샘플의 편광 반응을 정량화한다. 존스 행렬은 2

×2 행렬로, 빛의 편광 상태에 대한 입출력 관계를 설명한다. 존스 행렬은 네 개의 원소를 가지고 있어서 편광 필터의 조합을 변경하면서 최소 네 장의 편광 위상 영상을 측정해야 한다. 이로 인해 한 번에 편광 반응을 측정하는 것이 아니라, 하기 선행기술문헌의 특허문헌에 개시된 바와 같이 여러 영상을 차례로 측정해야 하는 단점이 있다.

[0006] 신속한 측정을 위해 존스 행렬과 같은 다중 영상을 단일 촬영으로 획득할 수 있는 광학계가 필요하며, 이를 해결하기 위한 여러 방법이 제안되었다. 하나는 회절격자를 영상 면에 배치하여 다양한 각도로 회절된 네 개의 기준 빔을 생성하고, 이를 샘플 빔과 간섭시켜 네 개의 간섭무늬 패턴을 겹쳐서 획득하는 방식(각도 다중화, Angular multiplexing)이다. 다른 하나는 회절격자를 퓨리에 면에 배치하여, 4-f 렌즈 시스템을 통과한 샘플 빔을 하나에서 네 개로 복제한 후, 이를 카메라로 획득하는 방식(공간 다중화, Spatial multiplexing)이다.

[0007] 하지만 이러한 방식들은 광원, 회절격자 및 광분배기 등의 광학 부품을 추가로 배치해야 하므로 광학 시스템의 부피 및 광학 경로 길이가 현저히 증가하게 된다. 또한, 샘플을 투과한 경로와 기준 경로 사이의 길이 차이를 통해 위상 정보를 측정하므로 이와 같은 큰 부피의 종래 시스템은 진동이나 움직임에 더욱 취약해지는 문제가 있다.

[0008] 이에 광학계의 부피, 광학 경로 및 광학 부품의 수를 감소시킨 간소화된 광학 구성에서 단일 촬영으로 존스 행렬과 같은 편광 반응을 측정할 수 있는 시스템이 절실히 요구되고 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0010] (특허문헌 0001) KR 10-2009-0079670 A

발명의 내용

해결하려는 과제

[0011] 본 발명은 상술한 종래기술의 문제점을 해결하기 위한 것으로, 본 발명의 일 측면은 편광카메라를 활용하여 단일 촬영으로 샘플의 편광 반응 특성인 존스 행렬을 구성하고, 추가적인 광학 부품 없이 단순한 단일 광원 마하-젠더 간섭계에서 측정 샘플 고유의 복굴절 정보 및 3차원 위상 정보를 획득할 수 있는 편광 위상 현미경 시스템을 제공하는 데 있다.

과제의 해결 수단

[0013] 본 발명의 실시예에 따른 편광 위상 현미경 시스템은 레이저 빔을 조사하는 광원; 상기 광원에서 조사된 상기 레이저 빔을 원형편광 빔으로 변환하는 원형편광 필터부; 상기 원형편광 필터부에서 변환된 상기 원형편광 빔을 샘플광 및 기준광으로 분배하는 제1 광분배기; 상기 제1 광분배기에서 분배된 상기 샘플광을 샘플에 입사시켜 상기 샘플광에 상기 샘플에 대한 영상을 형성하는 샘플 영상 형성부; 상기 샘플 영상 형성부를 통과한 상기 샘플광과, 상기 제1 광분배기에서 분배된 상기 기준광을 합쳐서 간섭 현상을 유도하는 제2 광분배기; 4개의 서로 다른 편광 축을 갖는 선형 편광 필터를 포함하고, 상기 제2 광분배기를 통과한 상기 샘플광 및 상기 기준광을 수광하여 간섭 영상을 단일 촬영하는 편광카메라; 및 상기 편광카메라에서 단일 촬영된 상기 간섭 영상을, 4개의 상기 선형 편광 필터에 대응되도록 분할하여 서로 다른 편광 상태를 갖는 다중 편광 간섭 영상을 생성하고, 상기 다중 편광 간섭 영상을 기반으로 상기 샘플에 대한 존스 행렬을 구성하는 영상 처리부;를 포함한다.

[0014] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 편광 위상 현미경 시스템에 있어서, 상기 원형편광 필터부는, 상기 광원에서 조사되어 상기 제1 광분배기를 향하는 상기 레이저 빔의 경로 상에 배치되는 반 파장판; 및 상기 반 파장판 및 상기 제1 광분배기 사이의 상기 레이저 빔의 경로 상에 배치되는 1/4 파장판;을 포함할 수 있다.

[0015] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 편광 위상 현미경 시스템에 있어서, 상기 샘플 영상 형성부는, 상기 샘플을 거치하는 샘플 거치대; 상기 샘플 거치대에 거치된 상기 샘플에, 상기 제1 광분배기에서 분배된 상기 샘플광을 조

사하는 조명용 렌즈; 및 상기 샘플을 통과한 상기 샘플광이 입사되는 대물렌즈;를 포함할 수 있다.

[0016] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 편광 위상 현미경 시스템에 있어서, 상기 샘플 영상 형성부는, 상기 제1 광분배기에서 분배되어 상기 조명용 렌즈로 입사되는 상기 샘플광의 각도를 조절하는 갈바노 스캐너;를 더 포함할 수 있다.

[0017] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 편광 위상 현미경 시스템에 있어서, 상기 제2 광분배기를 통과한 상기 샘플광과 상기 기준광이 서로 소정의 각도를 이루는 탈축(off-axis) 방식으로 상기 편광카메라에 입사될 수 있다.

[0018] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 편광 위상 현미경 시스템에 있어서, 상기 영상 처리부는, 상기 다중 편광 간섭 영상을 힐버트 변환(Hilbert transform) 하여 편광 필드 영상을 생성하고, 상기 편광 필드 영상을 분석하여 상기 샘플의 위상지연, 회전각 및 위상 정보에 관한 정보를 추출하며, 추출된 상기 샘플의 위상지연, 회전각 및 위상 정보를 기반으로, 상기 존스 행렬을 구성할 수 있다.

[0019] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 편광 위상 현미경 시스템에 있어서, 상기 편광 필드 영상은, 상기 4개의 서로 다른 편광 상태별 진폭 영상 및 위상 영상을 포함할 수 있다.

[0021] 본 발명의 특징 및 이점들은 첨부도면에 의거한 다음의 상세한 설명으로 더욱 명백해질 것이다.

[0022] 이에 앞서 본 명세서 및 청구범위에 사용된 용어나 단어는 통상적이고 사전적인 의미로 해석되어서는 아니되며, 발명자가 그 자신의 발명을 가장 최선의 방법으로 설명하기 위해 용어의 개념을 적절하게 정의할 수 있다는 원칙에 입각하여 본 발명의 기술적 사상에 부합하는 의미와 개념으로 해석되어야만 한다.

발명의 효과

[0024] 본 발명에 따르면, 편광카메라와 단일 광원의 마하-젠더 간섭계만을 사용하여 간소화된 광학 구성에서 샘플의 존스 행렬을 단일 촬영으로 측정함으로써 종래 기술의 한계를 극복할 수 있다.

[0025] 샘플에 입사하는 광 경로에 설치된 갈바노 스캐너를 활용하여 여러 각도에서의 편광 영상을 측정하고, 다각도 측정 결과를 합성하여 고품질의 편광 영상을 획득함으로써 회절에 의한 잡신호를 감소시키고, 민감도를 높인 정밀한 편광 측정이 가능하다.

[0026] 광학계의 간소화를 통해 일반 현미경에도 장착할 수 있는 모듈 형태로 소형화 개발이 가능하며, 다양한 분야에서의 적용 영역을 확장할 수 있고, 특히 세포나 얇은 생체조직과 같이 편광 반응이 미세하게 나타나는 샘플의 편광 정보를 정확하게 측정하는 데에 유용하게 활용될 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0028] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 편광 위상 현미경 시스템을 개략적으로 도시한 구성도이다.

도 2는 도 1에 도시된 편광 위상 현미경 시스템을 나타내는 블록도이다.

도 3은 도 1에 도시된 편광카메라를 도시한 사시도이다.

도 4 내지 도 5는 도 1에 도시된 영상 처리부의 작동 과정을 설명하는 도면이다.

도 6은 실험예 1의 복굴절 테스트 표본의 편광 영상 측정 결과로서, (a)는 단일 촬영으로 획득한 위상지연 영상, (b)는 구경 합성된 위상지연 영상, (c)는 단일 촬영으로 획득한 회전각 영상, (d)는 구경 합성된 회전각 영상을 각각 나타낸다.

도 7은 실험예 2의 샘플 회전에 따른 편광 반응 측정 결과로서, (a)는 샘플 각도별 테스트 표본의 위상지연 영상, (b)는 샘플 각도에 따른 평균 위상지연 값의 변화를 각각 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0029] 본 발명의 목적, 특정한 장점들 및 신규한 특징들은 첨부된 도면들과 연관되어지는 이하의 상세한 설명과 바람

직한 실시예들로부터 더욱 명백해질 것이다. 본 명세서에서 각 도면의 구성요소들에 참조번호를 부가함에 있어서, 동일한 구성 요소들에 한해서는 비록 다른 도면상에 표시되더라도 가능한 한 동일한 번호를 가지도록 하고 있음에 유의하여야 한다. 또한, "제1", "제2" 등의 용어는 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하기 위해 사용되는 것으로, 구성요소가 상기 용어들에 의해 제한되는 것은 아니다. 이하, 본 발명을 설명함에 있어서, 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있는 관련된 공지 기술에 대한 상세한 설명은 생략한다.

[0030] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시형태를 상세히 설명하기로 한다.

[0032] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 편광 위상 현미경 시스템을 개략적으로 도시한 구성도이고, 도 2는 도 1에 도시된 편광 위상 현미경 시스템을 나타내는 블록도이며, 도 3은 도 1에 도시된 편광카메라를 도시한 사시도이고, 도 4 내지 도 5는 도 1에 도시된 영상 처리부의 작동 과정을 설명하는 도면이다.

[0033] 도 1 내지 도 5에 도시된 바와 같이, 본 발명의 실시예에 따른 편광 위상 현미경 시스템은 레이저 빔을 조사하는 광원(10), 및 광원(10)에서 조사된 레이저 빔을 원형편광 빔으로 변환하는 원형편광 필터부(20), 원형편광 필터부(20)에서 변환된 원형편광 빔을 샘플광(SB) 및 기준광(RB)으로 분배하는 제1 광분배기(30), 제1 광분배기(30)에서 분배된 샘플광(SB)을 샘플에 입사시켜 샘플광(SB)에 샘플에 대한 영상을 형성하는 샘플 영상 형성부(40), 샘플 영상 형성부(40)를 통과한 샘플광(SB)과, 제1 광분배기(30)에서 분배된 기준광(RB)을 합쳐서 간섭 현상을 유도하는 제2 광분배기(50), 4개의 서로 다른 편광 축을 갖는 선형 편광 필터(61)를 포함하고, 제2 광분배기(50)를 통과한 샘플광(SB) 및 기준광(RB)을 수광하여 간섭 영상을 단일 촬영하는 편광카메라(60), 및 편광 카메라(60)에서 단일 촬영된 간섭 영상을, 4개의 상기 선형 편광 필터(61)에 대응되도록 분할하여 서로 다른 편광 상태를 갖는 다중 편광 간섭 영상을 생성하고, 다중 편광 간섭 영상을 기반으로 샘플에 대한 존스 행렬을 구성하는 영상 처리부(70)를 포함한다.

[0035] 본 발명은 샘플의 편광 반응을 정량화하는 존스 행렬 (Jones matrix)을 단일 촬영을 통해 구성할 수 있는 편광 위상 현미경 시스템에 관한 것으로, 광원(10), 원형편광 필터부(20), 제1 광분배기(30), 샘플 영상 형성부(40), 제2 광분배기(50), 편광카메라(60), 및 영상 처리부(70)를 포함한다.

[0036] 광원(10)은 레이저 빔을 조사한다. 이러한 광원(10)은 1개의 단일 레이저로, 원형편광 필터부(20)를 향해 레이저 빔을 조사할 수 있다.

[0037] 원형편광 필터부(20)는 광원(10)에서 조사된 레이저 빔을 원형편광 빔으로 변환한다. 원형편광 필터부(20)를 거쳐 변환된 원형편광 빔은 제1 광분배기(30)로 입사된다. 원형편광 필터부(20)는 레이저 빔을 원형편광 시키기 위해서, 반 파장판(half wave plate, 21), 및 1/4 파장판(quarter-wave plate, 22)을 포함할 수 있다. 광원(10)에서 조사되어 제1 광분배기(30)를 향하는 레이저 빔의 경로 상에서, 광원(10), 반 파장판(21), 1/4 파장판(22) 및 제1 광분배기(30) 순으로 배치된다. 따라서, 광원(10)에서 조사된 레이저 빔은 반 파장판(21)을 투과한 다음에, 반 파장판(21) 및 제1 광분배기(30) 사이에 배치된 1/4 파장판(22)을 투과하면서, 원형편광되어 제1 광분배기(30)로 입사된다.

[0038] 제1 광분배기(30)는 원형편광 빔을 샘플광(SB) 및 기준광(RB)으로 분배한다. 여기서, 샘플광(SB)은 제1 광분배기(30)로 입사된 원형편광 빔 중 그 입사 방향에 대해 90도로 반사되는 광이고, 기준광(RB)은 그 입사 방향을 따라 제1 광분배기(30)를 투과하는 광이다.

[0039] 샘플 영상 형성부(40)는 샘플광(SB)을 샘플에 입사시켜 샘플광(SB)에 샘플에 대한 영상을 형성한다. 이러한 샘플 영상 형성부(40)는 샘플광(SB)의 경로 상에 위치될 수 있다. 샘플 영상 형성부(40)는 샘플 거치대(41), 조명용 렌즈(42), 및 대물렌즈(43)를 포함할 수 있다. 또한, 샘플 영상 형성부(40)는 제1 반사판(M1), 제1 렌즈(L1), 및 제2 렌즈(L2)를 더 포함할 수 있다.

[0040] 샘플 거치대(41)는 측정하고자 하는 대상인 샘플을 거치할 수 있다. 샘플 거치대(41)는 조명용 렌즈(42)와 대물렌즈(43) 사이에 위치될 수 있다.

[0041] 조명용 렌즈(42)는 제1 광분배기(30)에서 분배되어 입사되는 샘플광(SB)을 샘플 거치대(41)에 거치된 샘플에 조사한다. 이러한 조명용 렌즈(42)는 집속 렌즈(condenser lense)일 수 있다. 여기서, 제1 광분배기(30)에서 분배되어 이동하는 샘플광(SB)은 제1 반사판(M1)에 의해 제1 렌즈(L1)를 향해 반사될 수 있다. 제1 렌즈(L1)는 제1 반사판(M1)에 의해 반사된 샘플광(SB)을 조명용 렌즈(42)에 위치된 초점으로 집중시킬 수 있다. 조명용 렌즈

(42)를 통과한 샘플광(SB)은 샘플을 통과하여 대물렌즈(43)로 입사된다.

[0042] 대물렌즈(43)는 샘플을 통과한 샘플광(SB)에 대한 확대상을 만들 수 있다. 제2 렌즈(L2)는 샘플광(SB)의 경로 상에 배치될 수 있다. 이러한 제2 렌즈(L2)는 대물렌즈(43)를 통과한 샘플광(SB)을 진행 방향과 평행하게 만들 수 있다.

[0043] 한편, 샘플 영상 형성부(40)는 갈바노 스캐너(44)를 더 포함할 수 있다. 갈바노 스캐너(44)는 제1 광분배기(30)에서 분배되어 샘플로 입사되는 샘플광(SB)의 각도를 조절할 수 있다. 일례로, 갈바노 스캐너(44)는 인가되는 전압에 따라 샘플광(SB)의 광축을 X축 방향과 Y축 방향으로 변화시킬 수 있다. 즉, 갈바노 스캐너(44)는 X축 스캐너(44a)와 Y축 스캐너(44b)를 포함하는 2축 갈바노 스캐너일 수 있다. 이에 따라, 샘플로 입사되는 샘플광(SB)의 각도가 변화될 수 있다. 여기서, 갈바노 스캐너(44)에 의해 각도가 조절된 샘플광(SB)은 제1 반사판(M1)에 의해 제1 렌즈(L1)를 향해 반사되고, 제1 렌즈(L1) 및 조명용 렌즈(42)를 순차적으로 통과하여 샘플에 입사될 수 있다. 이렇게 샘플에 입사되는 샘플광(SB)의 각도 조절을 통해 샘플광(SB)에 샘플에 대한 각도별 영상을 형성할 수 있다. 이에 따라 여러 조명 각도에서의 존스 행렬 영상을 획득할 수 있고, 획득한 영상을 구경 합성하여 영상의 신호 대 잡음 비를 향상시킬 수 있다.

[0044] 제2 광분배기(50)는 샘플 영상 형성부(40)를 통과한 샘플광(SB)과 기준광(RB)을 합쳐서 간섭 현상을 유도한다. 기준광(RB)은 제1 광분배기(30)에서 분배되어 제2 광분배기(50)로 입사된다. 여기서, 제1 광분배기(30)와 제2 광분배기(50) 사이의 기준광(RB)의 경로 상에는 제3 렌즈(L3) 및 제4 렌즈(L4)가 배치될 수 있다. 제3 렌즈(L3)는 기준광(RB)을 평행광으로 변환시킬 수 있다. 제3 렌즈(L3)를 투과한 기준광(RB)은 제4 렌즈(L4)를 투과하고, 제2 반사판(M2)에 의해 제2 광분배기(50)를 향해 반사될 수 있다. 제2 광분배기(50)로 입사되는 샘플광(SB)은 그 입사 방향을 따라 그대로 제2 광분배기(50)를 투과하고, 기준광(RB)은 입사 방향에 대해 90도로 반사되어 진행하면서 서로 합쳐질 수 있다. 여기서, 제2 광분배기(50)는 샘플광(SB)과 기준광(RB)이 평행하지 않고 서로 소정의 각도를 이루는 탈축(off-axis) 방식으로 샘플광(SB)과 기준광(RB)을 합쳐서 편광카메라(60)로 전달할 수 있다. 탈축 방식을 구현하기 위해서, 제2 광분배기(50)는 기준광(RB)이 반사되는 방향과 샘플광(SB)이 입사되어 진행되는 방향이 일치하지 않도록, 기울어지게 배치될 수 있다. 제2 광분배기(50)를 통과하여 합쳐진 샘플광(SB)과 기준광(RB)은 서로 간섭되면서 간섭 영상을 생성할 수 있다.

[0045] 편광카메라(60)는 제2 광분배기(50)에서 합쳐지면서 간섭 현상이 일어나는 샘플광(SB)과 기준광(RB)을 수광하여 간섭 영상을 단일 촬영한다. 편광카메라(60)는 4개의 서로 다른 편광 축을 갖는 선형 편광 필터(61)를 포함할 수 있다(도 3 참조). 4개의 선형 편광 필터(61)는 2×2 단위 셀(도 3의 점선 박스)을 구성할 수 있다. 또한, 그 단위 셀이 반복되어 필터 어레이를 형성할 수도 있다. 편광카메라(60)는 각각의 선형 편광 필터(61)에 대응하는 광센서를 더 포함할 수 있다. 광센서는 상기 단위 셀 내지 필터 어레이 각각의 선형 편광 필터(61)에 대응되도록 정렬될 수 있다. 4개의 선형 편광 필터(61)는 서로 다른 편광 축을 가진다. 일례로, 4개의 선형 편광 필터(61) 중 제1 선형 편광 필터(61a)는 0도 선형 편광 필터(61), 제2 선형 편광 필터(61b)는 45도 선형 편광 필터(61), 제3 선형 편광 필터(61)는 90도 선형 편광 필터(61), 제4 선형 편광 필터(61)는 135도 선형 편광 필터(61)일 수 있다. 따라서, 편광카메라(60)를 통해 단일 촬영으로 4개의 서로 다른 편광 상태를 갖는 다중 편광 간섭 영상을 획득할 수 있게 된다.

[0046] 영상 처리부(70)는 편광카메라(60)에서 단일 촬영된 간섭 영상을 이용하여 샘플에 대한 존스 행렬을 구성한다. 영상 처리부(70)는 편광카메라(60)에서 단일 촬영된 간섭 영상을 4개의 선형 편광 필터(61)에 대응되도록 분할하여 서로 다른 편광 상태를 갖는 다중 편광 간섭 영상을 생성하고, 그 다중 편광 간섭 영상을 기반으로 존스 행렬을 구성할 수 있다. 일례로, 영상 처리부(70)는 서로 다른 편광 상태를 갖는 4개의 간섭 영상, 즉 다중 편광 간섭 영상을 힐버트 변환(Hilbert transform) 하여 편광 필드 영상을 생성할 수 있다(도 4 참조). 편광 필드 영상은 편광된 간섭 영상에서 힐버트 변환을 거쳐 진폭과 위상 정보를 포함하는 편광된 복소수 영상으로서, 4개의 서로 다른 편광 상태별 진폭 영상 및 위상 영상을 포함할 수 있다. 일례로, 영상 처리부(70)는 진폭과 위상 정보를 포함하는 편광 필드 영상을 분석하여 샘플의 위상지연, 회전각 및 위상 정보에 관한 정보를 추출할 수 있고, 추출된 샘플의 위상지연, 회전각 및 위상 정보를 기반으로 존스 행렬을 구성할 수 있다(도 5 참조). 영상 처리부는 하드웨어로 직접 구현되거나, 하드웨어에 의해 실행되는 소프트웨어 모듈로 구현되거나, 또는 이들의 결합에 의해 구현될 수 있다. 소프트웨어 모듈은 RAM(Random Access Memory), ROM(Read Only Memory), EPROM(Erasable Programmable ROM), EEPROM(Electrically Erasable Programmable ROM), 플래시 메모리(Flash Memory), 하드 디스크, 착탈형 디스크, CD-ROM, 또는 본 발명이 속하는 기술 분야에서 잘 알려진 임의의 형태의 컴퓨터 판독가능 기록매체에 상주할 수도 있다.

[0048] 이하에서는 영상 처리부(70)의 동작에 대해 보다 상세하게 설명한다.

[0049] 존스 행렬 영상은 아래 [식 1]과 같이 표현할 수 있다.

[0050] [식 1]

$$J = e^{i\Phi} \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\Delta} & 0 \\ 0 & e^{-i\Delta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

[0051] 여기서, J는 존스 행렬, Φ 는 샘플의 위상 정보, θ 는 회전각, Δ 는 샘플의 위상지연 정보이다.

[0052] 편광된 복소수 영상(편광 필드 영상)을 존스 연산 기법을 통해 기술하면 아래 [식 2]와 같다.

[0053] [식 2]

$$E_n = (L_n J E_i) \cdot (L_n E_i), \quad n = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$$

[0054] 여기서, E_n 은 편광된 복소수 영상, L_n 은 편광카메라의 선형 편광 필터에 대한 존스 행렬, E_i 는 샘플 경로와 기준 경로에 각각 입사하는 원형편광된 빛에 대한 존스 벡터 $[1 \ i]^T$ 을 나타낸다.

[0055] E_n 을 제공한 세기 영상 I_n 은 아래 [식 3]과 같이 표현할 수 있다.

[0056] [식 3]

$$\begin{aligned} I_{0^\circ} &= E_{0^\circ} \cdot (E_{0^\circ})^* = 1 + \sin 2\Delta \sin 2\theta \\ I_{45^\circ} &= E_{45^\circ} \cdot (E_{45^\circ})^* = 1 - \sin 2\Delta \cos 2\theta \\ I_{90^\circ} &= E_{90^\circ} \cdot (E_{90^\circ})^* = 1 - \sin 2\Delta \sin 2\theta \\ I_{135^\circ} &= E_{135^\circ} \cdot (E_{135^\circ})^* = 1 + \sin 2\Delta \cos 2\theta \end{aligned}$$

[0057] 샘플의 회전각 θ 과 위상지연 정보 Δ 을 추출하기 위해 매개변수 A_1 과 A_2 을 거쳐 아래 [식 4]와 같이 연산이 수 행될 수 있다.

$$A_1 = \frac{I_{0^\circ} - I_{90^\circ}}{I_{0^\circ} + I_{90^\circ}} = \sin 2\Delta \sin 2\theta, \quad A_2 = \frac{I_{135^\circ} - I_{45^\circ}}{I_{135^\circ} + I_{45^\circ}} = \sin 2\Delta \cos 2\theta$$

$$\therefore \theta = 0.5 \tan^{-1}(A_1/A_2), \quad \Delta = 0.5 \sin^{-1} \sqrt{(A_1^2 + A_2^2)}$$

[0061] 존스 행렬을 복원하기 위해 샘플의 위상 정보 Φ 는 아래 [식 5]를 통해 추출될 수 있다.

$$\begin{aligned} E_{0^\circ} + E_{45^\circ} + E_{90^\circ} + E_{135^\circ} &= 4e^{i\Phi} \cos 2\Delta \\ e^{i\Phi} &= (E_{0^\circ} + E_{45^\circ} + E_{90^\circ} + E_{135^\circ}) / 4 \cos 2\Delta \end{aligned}$$

$$\therefore \Phi = \text{atan}(\text{imag}(e^{i\Phi}) / \text{real}(e^{i\Phi}))$$

[0062] [식 4] 및 [식 5]에 따라 추출된 회전각 θ 과 위상지연 정보 Δ , 위상 정보 Φ 를 [식 1]의 존스 행렬 식에 대입 함으로써, 도 5와 같이 최종적으로 샘플의 존스 행렬 영상을 복원할 수 있다.

[0063] 종합적으로, 본 발명에 따른 편광 위상 현미경 시스템은 편광카메라를 이용해 기존 존스 행렬 측정 시스템을 구축하기 위한 광학 구성을 크게 단순화하였으며, 단일 촬영으로 측정된 간섭 영상으로부터 존스 행렬을 복원할

수 있고, 조명 각도를 달리하면서 여러 각도에서의 존스 행렬 영상을 획득할 수 있다. 또한, 구경 합성법 (Aperture synthesis technique)을 통해 여러 각도에서 획득한 영상을 합성함에 따라 영상의 해상도와 신호 대 잡음 비가 향상된 고품질의 존스 행렬 영상을 획득할 수 있다. 샘플의 편광 반응과 독립적인 샘플 고유의 위상 정보 Φ 를 추출할 수 있으므로, 여러 각도에서 획득한 위상 정보를 바탕으로 정량적 위상 단층 영상 복원법을 통해 샘플의 3차원 단층 정보를 획득할 수 있다.

[0068] 이하에서는 실험예를 통해 본 발명의 성능에 대해 설명한다.

[0069] 실험예 1

[0070] 본 발명에서 제안하는 광학계의 성능을 평가하기 위해 편광 정보가 잘 알려진 복굴절 테스트 표본(Thorlabs: R2L2S1B)의 편광 영상을 측정하고, 그 결과를 도 6에 나타냈다. 도 6은 실험예 1의 복굴절 테스트 표본의 편광 영상 측정 결과로서, (a)는 단일 촬영으로 획득한 위상지연 영상, (b)는 구경 합성된 위상지연 영상, (c)는 단일 촬영으로 획득한 회전각 영상, (d)는 구경 합성된 회전각 영상을 각각 나타낸다. 여기서, 표본은 2.78 ± 0.13 radian의 위상지연 값을 갖는 균일한 복굴절 물질로 구성되어 있으며, 막대 모양의 구조 영역과 배경 영역 사이에 편광 축이 다르게 구성되어 있다.

[0071] 도 6은 실험예 1의 복굴절 테스트 표본의 편광 영상 측정 결과로서, (a)는 단일 촬영으로 획득한 위상지연 영상, (b)는 구경 합성된 위상지연 영상, (c)는 단일 촬영으로 획득한 회전각 영상, (d)는 구경 합성된 회전각 영상을 각각 나타낸다.

[0072] 도 6의 (a)는 단일 촬영 영상에서 복원된 위상지연 영상이다. 측정 결과는 2.82 ± 0.04 radian으로 오차 범위 내에서 측정할 수 있음을 확인하였다.

[0073] 도 6의 (b)는 여러 조명 각도에서 획득한 단일 촬영 영상을 구경 합성한 후 복원된 위상지연 영상을 보여준다. 도 6의 (a)와 비교했을 때, 현저한 노이즈 감소가 관찰되어 고품질 편광 영상 측정이 가능함을 확인하였다. 측정 결과는 2.81 ± 0.02 radian로, 마찬가지로 오차 범위 내에서 측정할 수 있음을 확인하였다.

[0074] 도 6의 (c) 및 (d)는 각각 단일 촬영 영상 및 구경 합성 영상에서 복원된 회전각 영상이다. 구경 합성을 통해 노이즈가 현저히 감소한 것을 관찰할 수 있다. 또한, 구조 영역과 배경 영역 사이의 편광 축이 약 10도 정도 차이가 있는 것으로 측정되었다.

[0076] 실험예 2

[0077] 테스트 표본을 0도부터 90도까지 회전시키면서 편광 반응을 측정하고, 그 결과를 도 7에 나타냈다. 도 7은 실험예 2의 샘플 회전에 따른 편광 반응 측정 결과로서, (a)는 샘플 각도별 테스트 표본의 위상지연 영상, (b)는 샘플 각도에 따른 평균 위상지연 값의 변화를 각각 나타낸다.

[0078] 이를 통해 물질의 특성을 나타내는 복굴절 값과 비례하는 물리량인 위상지연은 샘플의 위치와는 관계없이 일관적으로 측정됨을 도 7의 (a)에서 확인하였다. 도 6의 (b)와 같이 샘플 각도에 따른 위상지연 평균값의 변화는 2.79 ± 0.07 radian로 일정하게 측정되었다.

[0080] 이상 본 발명을 구체적인 실시예를 통하여 상세히 설명하였으나, 이는 본 발명을 구체적으로 설명하기 위한 것으로, 본 발명은 이에 한정되지 않으며, 본 발명의 기술적 사상 내에서 당 분야의 통상의 지식을 가진 자에 의해 그 변형이나 개량이 가능함이 명백하다.

[0081] 본 발명의 단순한 변형 내지 변경은 모두 본 발명의 영역에 속한 것으로 본 발명의 구체적인 보호 범위는 첨부된 특허청구범위에 의하여 명확해질 것이다.

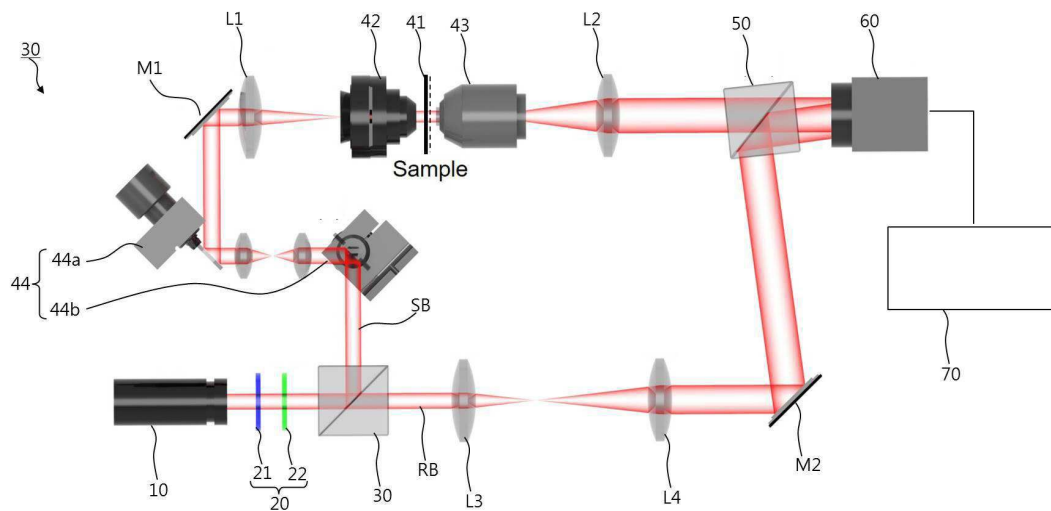
부호의 설명

[0083] 10: 광원 20: 원형편광 필터부

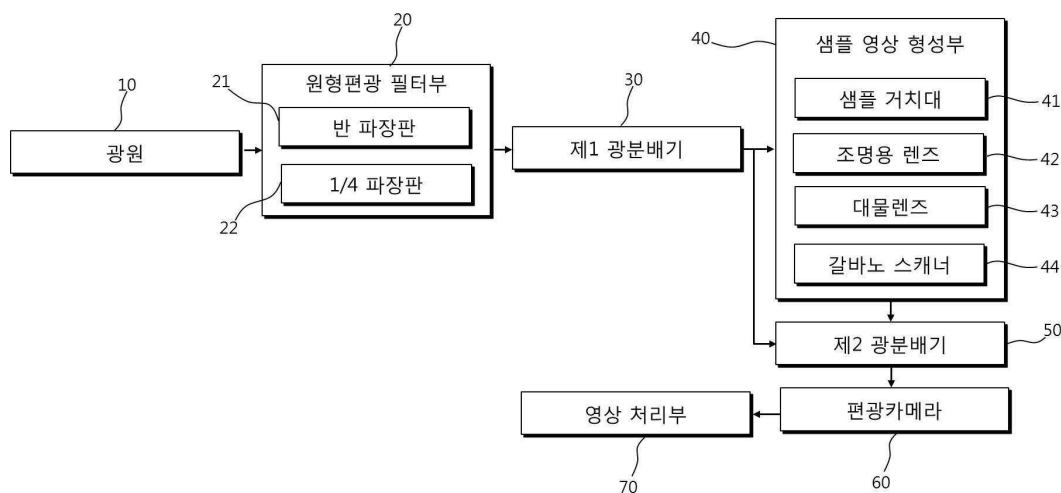
- 21: 반 파장판 22: 1/4 파장판
 30: 제1 광분배기 40: 샘플 영상 형성부
 41: 샘플 거치대 42: 조명용 렌즈
 43: 대물렌즈 44: 갈바노 스캐너
 50: 제2 광분배기 60: 편광카메라
 61: 선형 편광 필터 70: 영상 처리부
 SB: 샘플광 RB: 기준광
 L1 ~ L4: 제1 ~ 제4 렌즈 M1 ~ M2: 제1 ~ 제2 반사판

도면

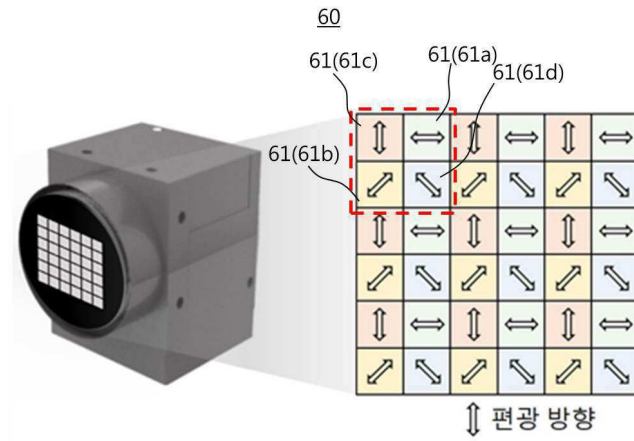
도면1



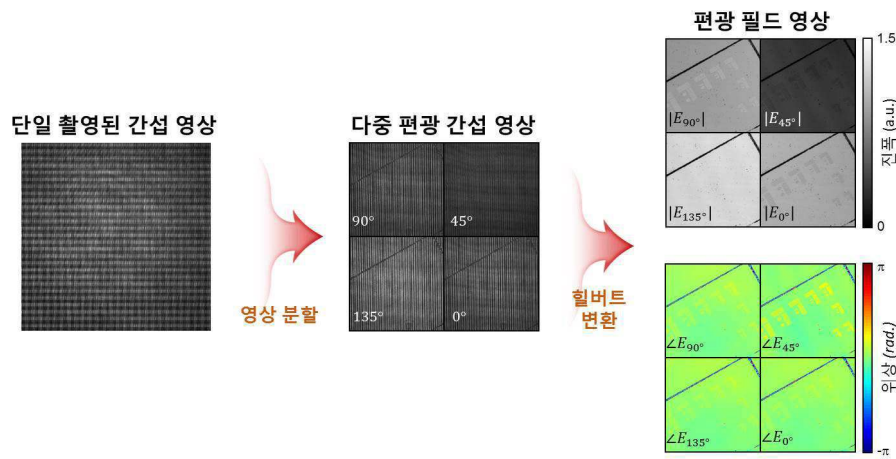
도면2



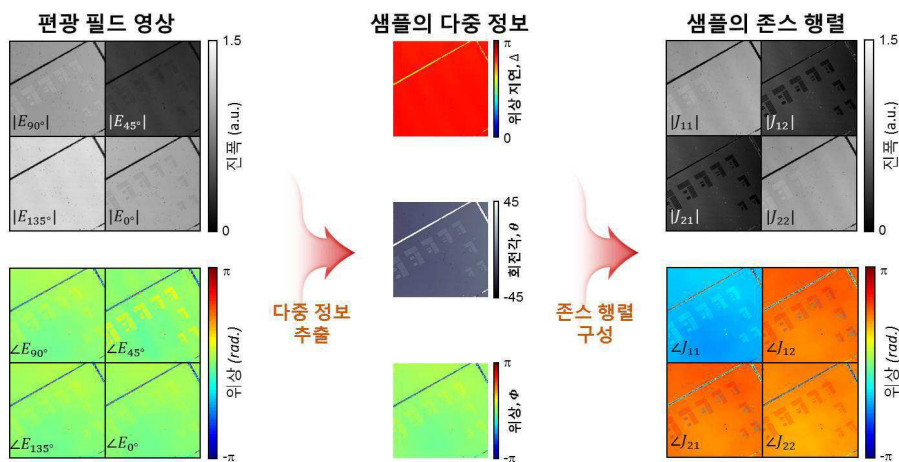
도면3



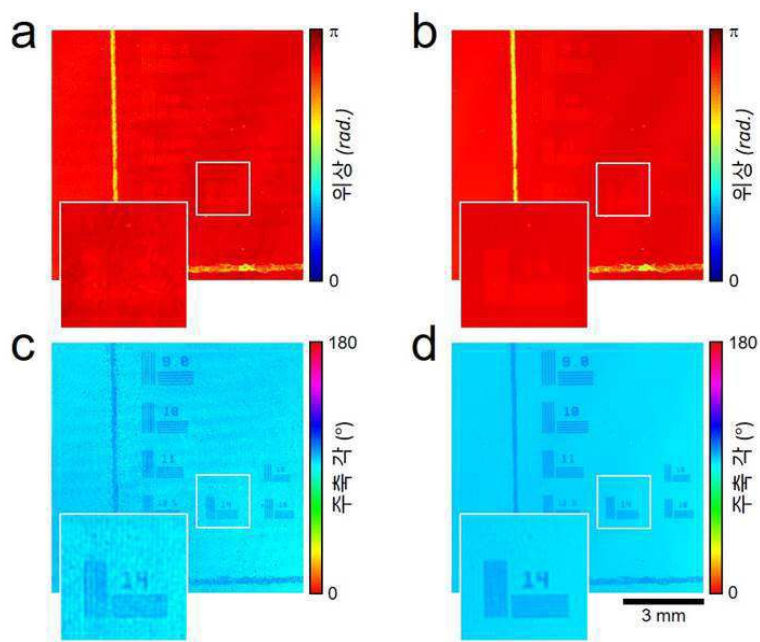
도면4



도면5



도면6



도면7

