



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0074036
(43) 공개일자 2020년06월24일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G02B 26/08 (2006.01) G02B 26/02 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G02B 26/08 (2013.01)
G02B 26/02 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0166255
(22) 출원일자 2019년12월13일
심사청구일자 2019년12월13일
(30) 우선권주장
1020180162463 2018년12월14일 대한민국(KR)
1020180164638 2018년12월18일 대한민국(KR)

(71) 출원인
기초과학연구원
대전광역시 유성구 엑스포로 55(도룡동)
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
암블라호 프랑수아
대전광역시 유성구 엑스포로 55(도룡동)
카시아니 기욤
대전광역시 유성구 엑스포로 55(도룡동)
(74) 대리인
특허법인 고려

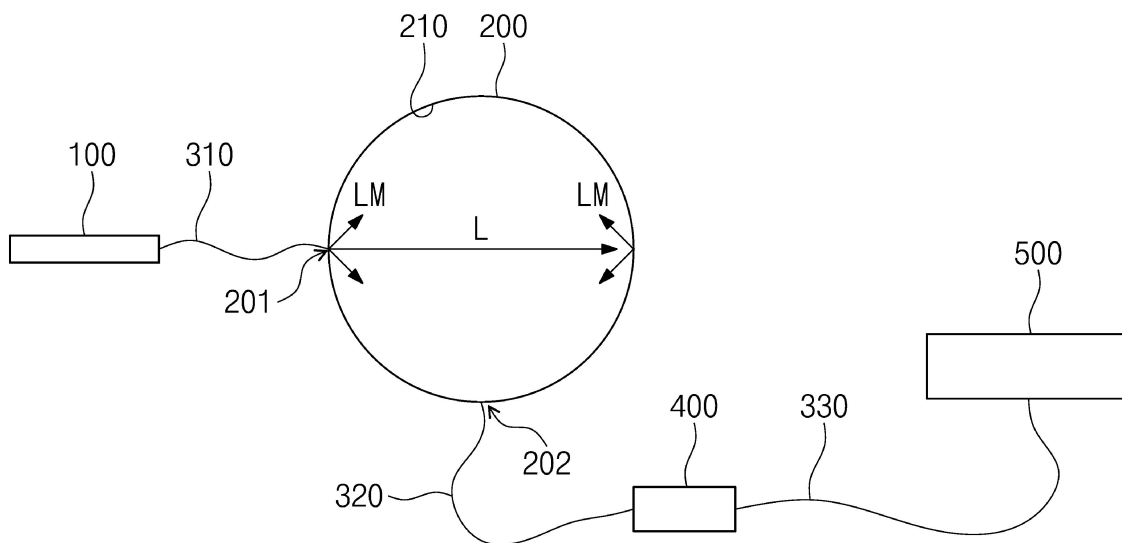
전체 청구항 수 : 총 18 항

(54) 발명의 명칭 랜덤 간섭계 및 랜덤 간섭분석 방법

(57) 요약

본 발명의 랜덤 간섭계는 입사 광을 방출하는 광원; 상기 입사 광이 그의 내부 벽에서 반사되어 생성된 광 모드들의 간섭으로부터 스펙클 필드를 생성하는 캐비티; 상기 스펙클 필드로부터 방출되는 광 강도를 검출하는 검출부; 및 상기 광 강도로부터 상기 스펙클 필드의 변동을 분석하는 데이터 분석부를 포함하고, 상기 데이터 분석부는 상기 광 강도의 변동을 분석한다.

대표도 - 도1



명세서

청구범위

청구항 1

코히어런트 입사 광을 방출하는 광원;
상기 입사 광이 그의 내부 벽에서 반사되어 생성된 광 모드들의 간섭으로부터 스펙클 필드를 생성하는 캐비티;
상기 스펙클 필드로부터 방출되는 광 강도를 검출하는 검출부; 및
상기 광 강도로부터 상기 스펙클 필드의 변동을 분석하는 데이터 분석부를 포함하는 랜덤 간섭계.

청구항 2

청구항 1에 있어서,
상기 캐비티는 상기 입사 광 및 상기 광 모드들을 램버시안 반사시키는 랜덤 간섭계.

청구항 3

청구항 1에 있어서,
상기 데이터 분석부는 상기 스펙클 필드의 변동을 분석하여, 상기 입사 광의 위상 노이즈 또는 강도 노이즈를 측정하는 랜덤 간섭계.

청구항 4

청구항 1에 있어서,
상기 데이터 분석부는 상기 스펙클 필드의 변동을 분석하여, 상기 캐비티의 변형을 측정하는 랜덤 간섭계.

청구항 5

청구항 4에 있어서,
상기 캐비티의 변형으로부터 상기 캐비티 주변의 진동을 감지하는 랜덤 간섭계.

청구항 6

청구항 5에 있어서,
상기 캐비티 주변의 진동은 음향 또는 지진인 랜덤 간섭계.

청구항 7

청구항 1에 있어서,
상기 데이터 분석부는 상기 스펙클 필드의 변동을 분석하여, 상기 캐비티 내에 제공된 샘플의 광학적 특성의 동적 변동을 측정하는 랜덤 간섭계.

청구항 8

청구항 1에 있어서,
상기 데이터 분석부는 상기 광 강도를 시계열로 측정하거나 이미지를 얻는 랜덤 간섭계.

청구항 9

청구항 1에 있어서,
상기 데이터 분석부는, 지연시간의 변화에 따른 상기 광 강도의 상관 관계를 획득하는 랜덤 간섭계.

청구항 10

청구항 9에 있어서,

상기 검출부는 하나의 포토 디텍터를 포함하고,

상기 광 강도의 상관 관계를 획득하는 것은 상기 하나의 포토 디텍터에서의 상기 광 강도의 자기 상관 관계를 획득하는 것을 포함하는 랜덤 간섭계.

청구항 11

청구항 9에 있어서,

상기 검출부는 2개의 포토 디텍터들을 포함하고,

상기 광 강도의 상관 관계를 획득하는 것은 상기 2개 포토 디텍터들에서의 상기 광 강도의 상호 상관 관계를 획득하는 것을 포함하는 랜덤 간섭계.

청구항 12

코히어런트 광원으로부터의 입사 광을 캐비티 내로 제공하는 것;

상기 입사 광이 상기 캐비티의 내벽에서 반사되어 생성된 광 모드들 사이의 간섭으로부터의 스펙클 필드로부터 방출되는 방출 광을 검출하는 것; 그리고

상기 방출 광의 감도 변화로부터 상기 스펙클 필드의 변동을 분석하는 것을 포함하고,

상기 스펙클 필드의 변동을 분석하는 것은 상기 방출 광의 강도 변동을 분석하는 것을 포함하는 랜덤 간섭 분석 방법.

청구항 13

청구항 12에 있어서,

상기 스펙클 필드의 변동을 분석하는 것은, 지연시간의 변화에 따른 상기 방출 광 강도의 상관 관계를 획득하는 것을 포함하는 랜덤 간섭 분석 방법.

청구항 14

청구항 12에 있어서,

상기 스펙클 필드의 변동을 분석하는 것은, 상기 광 강도를 시계열로 측정하거나 이미지를 얻는 것을 포함하는 랜덤 간섭 분석 방법.

청구항 15

청구항 12에 있어서,

상기 분석으로부터 상기 입사 광의 위상 노이즈 또는 강도 노이즈를 측정하는 랜덤 간섭 분석 방법.

청구항 16

청구항 12에 있어서,

상기 분석으로부터 상기 캐비티의 변형을 측정하는 랜덤 간섭 분석 방법.

청구항 17

청구항 12에 있어서,

상기 분석으로부터 상기 캐비티 주변의 진동을 감지하는 랜덤 간섭 분석 방법.

청구항 18

청구항 12에 있어서,

상기 분석으로부터 상기 캐비티 내에 제공된 샘플의 광학적 특성의 동적 변동을 측정하는 랜덤 간섭 분석 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 랜덤 간섭계에 대한 것으로, 더욱 상세하게는, 스펙클 필드의 강도 변동을 측정할 수 있는 랜덤 간섭계 및 랜덤 간섭분석 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 간섭계는, 여러 측정 목적을 위해, 파의 간섭 현상을 사용하는 광학적 방법에 기초하는 장치이다. 간섭계는 음파, 전자빔(electron beams), 또는 광(photon beams)과 같은 다양한 (특히, 전자기파에 기반하는) 파를 이용하여 간섭 현상을 일으킬 수 있다. 광 간섭계는 매우 다양한 분야(특히, 수 많은 장치들 및 응용)에서 이용될 수 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0003] 본 발명은 캐비티 내의 스펙클 필드의 강도 변동을 민감하게 측정할 수 있는 랜덤 간섭계 및 랜덤 간섭분석 방법을 제공하기 위한 것이다.

과제의 해결 수단

[0004] 본 발명의 일 실시예에 따른 랜덤 간섭계는 코히어런트 입사 광을 방출하는 광원; 상기 입사 광이 그의 내부 벽에서 반사되어 생성된 광 모드들의 간섭으로부터 스펙클 필드를 생성하는 캐비티; 상기 스펙클 필드로부터 방출되는 광 강도를 검출하는 검출부; 및 상기 광 강도로부터 상기 스펙클 필드의 변동을 분석하는 데이터 분석부를 포함할 수 있다.

[0005] 상기 캐비티는 상기 입사 광 및 상기 광 모드들을 램버시안 반사시킬 수 있다.

[0006] 일 예로, 상기 데이터 분석부는 상기 스펙클 필드의 변동을 분석하여, 상기 입사 광의 위상, 파장 또는 강도 변동을 측정할 수 있다.

[0007] 일 예로, 상기 데이터 분석부는 상기 스펙클 필드의 변동을 분석하여, 상기 캐비티의 변형을 측정할 수 있다.

[0008] 일 예로, 상기 캐비티의 변형으로부터 상기 캐비티 주변의 진동을 감지할 수 있다.

[0009] 일 예로, 상기 데이터 분석부는 상기 스펙클 필드의 변동을 분석하여, 상기 캐비티 내에 제공된 샘플의 광학적 특성을 측정할 수 있다.

[0010] 상기 데이터 분석부는, 지연시간(τ)의 변화에 따른 상기 광 강도의 상관 관계를 획득할 수 있다. 상기 검출부는 하나의 포토 디텍터를 포함하고, 상기 광 강도의 상관 관계를 획득하는 것은 상기 하나의 검출기에서의 상기 광 강도의 자기 상관 관계를 획득하는 것을 포함할 수 있다. 상기 검출부는 2개의 포토 디텍터를 포함하고, 상기 광 강도의 상관 관계를 획득하는 것은 상기 2개 검출기들에서의 상기 광 강도의 상호 상관 관계를 획득하는 것을 포함할 수 있다.

[0011] 본 발명의 일 실시예에 따른 랜덤 간섭 분석 방법은 코히어런트 광원으로부터의 입사 광을 캐비티 내로 제공하는 것; 상기 입사 광이 상기 캐비티의 내벽에서 반사되어 생성된 광 모드들 사이의 간섭으로부터의 스펙클 필드로부터 방출되는 방출 광을 검출하는 것; 그리고 상기 방출 광의 감도 변화로부터 상기 스펙클 필드의 변동을 분석하는 것을 포함할 수 있다. 상기 스펙클 필드의 변동을 분석하는 것은 상기 방출 광의 강도 변동을 분석하는 것을 포함할 수 있다.

[0012] 상기 스펙클 필드의 변동을 분석하는 것은, 지연시간(τ)의 변화에 따른 상기 방출 광 강도의 상관 관계를 획득하는 것을 포함할 수 있다.

[0013] 일 예로, 상기 방법은 상기 분석으로부터 상기 입사 광의 위상, 파장 또는 강도 변동을 측정할 수 있다.

[0014] 일 예로, 상기 스펙클 필드의 변동을 분석하는 것은, 상기 광 강도를 시계열로 측정하거나 이미지를 얻는 것을

포함할 수 있다.

[0015] 일 예로, 상기 방법은 상기 분석으로부터 상기 캐비티의 변형을 측정할 수 있다.

[0016] 일 예로, 상기 방법은 상기 분석으로부터 상기 캐비티 주변의 진동을 감지할 수 있다.

[0017] 일 예로, 상기 방법은 상기 분석으로부터 상기 캐비티 내에 제공된 샘플의 광학적 특성을 측정할 수 있다.

발명의 효과

[0018] 본 발명에 따른 랜덤 간섭계는 램버시안 반사를 일으키는 캐비티를 사용하여, 캐비티 내의 스펙클 필드의 강도 변동을 민감하게 측정할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0019] 도 1은 본 발명의 실시 예에 따른 랜덤 간섭계를 설명하기 위한 도면이다.

도 2는 본 발명에 따른 캐비티의 출력 포트에서 광 강도의 각도분포를 도시한다.

도 3은 레이저 펄스가 본 발명에 따른 캐비티를 통과할 때 늘어지는 현상을 보여준다.

도 4는 본 발명에 따른 간섭계에서 측정된 상호 상관 베이스 레벨에 대한 입사 광의 영향을 보여준다.

도 5는 캐비티들에서의 스펙클 필드 강도의 상관관계 변화를 설명하기 위한 그래프이다

도 6은 직접 조명 하에서의 레이저 광의 상호 상관을 측정한 결과이다.

도 7a는 본 발명에 따른 캐비티의 일 예이다.

도 7b는 도 7a의 A-A'선에 따른 단면도이다.

도 8a는 본 발명에 따른 간섭계를 구현하는 실험예를 설명하기 위한 도면이다.

도 8b는 도 8a의 B-B'선에 따른 단면도이다.

도 9는 도 8a의 간섭계의 압전 액추에이터에 인가되는 전압 변화에 따른 상호 상관의 변화를 나타내는 그래프이다.

도 10은 도 8a의 간섭계의 압전 액추에이터에 인가되는 전압에 따른 스펙클 필드의 강도 변동을 설명하기 위한 그래프이다.

도 11은 본 발명에 따른 간섭계에서의 외부 진동 및 지진 잡음에 대한 감도의 예를 도시한다.

도 12는 본 발명에 따른 캐비티 내의 샘플의 광학적 특성을 측정한 것을 도시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0020] 본 발명의 기술적 사상의 구성 및 효과를 충분히 이해하기 위하여, 첨부한 도면을 참조하여 본 발명의 기술적 사상의 바람직한 실시 예들을 설명한다. 그러나 본 발명 기술적 사상은 이하에서 개시되는 실시 예들에 한정되는 것이 아니라, 여러 가지 형태로 구현될 수 있고 다양한 변경을 가할 수 있다. 단지, 본 실시 예들의 설명을 통해 본 발명의 기술적 사상의 개시가 완전하도록 하며, 본 발명이 속하는 기술 분야의 통상의 지식을 가진 자에게 발명의 범주를 완전하게 알려주기 위하여 제공되는 것이다.

[0021] 명세서 전체에 걸쳐서 동일한 참조번호로 표시된 부분은 동일한 구성요소들을 나타낸다. 본 명세서에서 기술하는 실시 예들은 본 발명의 기술적 사상의 이상적인 예시도인 개념도를 참고하여 설명될 것이다.

[0022] 본 명세서에서 사용된 용어는 실시 예들을 설명하기 위한 것이며 본 발명을 제한하고자 하는 것은 아니다. 본 명세서에서, 단수형은 문구에서 특별히 언급하지 않는 한 복수형도 포함한다. 명세서에서 사용되는 '포함한다(comprises)' 및/또는 '포함하는(comprising)'은 언급된 구성요소는 하나 이상의 다른 구성요소의 존재 또는 추가를 배제하지 않는다.

[0023] 본 명세서에서, 광 간섭계(optical interferometry)의 기본 개념은 하나의 코히어런트한(coherent) 입사 광을 캐비티에 조사하는 것에 기초한다. 입사 광은 캐비티 내에서의 확산 반사에 의하여 수천 개의 광들(광 모드들)로 분리될 수 있다. 이하의 실시예에서는, 수천 개의 광 모드들 중 2 개의 광 모드들(OP1, OP2) 만이 고려된다.

상기 광 모드들(OP1, OP2)은 다른 광 경로들(P1, P2)을 따라 주행하고 재결합(recombine)하여, 간섭을 일으킨다. 광 모드들(OP1, OP2)은 다른 광 경로 길이들을 가질 수 있다. 간섭 패턴은 다양한 방법들에 의하여 측정될 수 있으며, 측정 값(observables)의 공간적 구조, 특정 지점에서의 강도, 표면에서의 총 강도, 또는 일시적인 변동 등이 추출될 수 있다. 광 경로들(P1, P2)의 변동은 광 경로 차이($\Delta P = |P1 - P2|$)의 변동을 야기하고, 측정 값의 변동을 일으킨다. 광 경로 차이(ΔP)의 변동은 여러 가지의 요인들에 의해 야기될 수 있다. 광 경로들(P1, P2)의 물리적 길이의 변화, 광 경로들에서의 매질의 굴절률 변화, 굴절률 타원체(refraction ellipsoid)의 변화, 입력광의 파장(또는 위상, 강도) 변화 등이 있다.

[0024] 광 모드들 사이의 간섭은 그들이 상호 코히어런트(mutually coherent)인 것을 요구한다. 이것은 광 모드들의 위상(phase)이 시간적으로 관련되어(correlated) 있다는 것을 의미한다. 이는 간섭계 내에서, 초기의 하나의 광이 여러 개의 광들로 분리되는 경우, 상기 하나의 광은 최소한의 시간적 코히어런스(temporal coherence)를 갖는다는 것을 의미한다. 즉, 광의 조화 진동(harmonic oscillation) 위상은 코히어런스 시간(coherence time)이라 불리는 특정 시간 스케일의 시간보다 짧은 시간 동안 일정하거나, 또는 코히어런스 길이(coherence length)라 불리는 특정 시간 스케일의 거리보다 짧은 시간 거리의 파면에서 균일(uniform)하다.

[0025] 코히어런스 시간(τ_c)은 코히어런스 길이(l_c)와, $l_c = \tau_c c$ (c 는 빛의 속도)로, 관련된다. 코히어런스 시간(τ_c)은 광이 지연시간(τ)에서 자기 자신과 간섭하는 정도(즉, 광 강도($E(t)$)와 시간 지연된 광 강도($E(t-\tau)$) 사이의 자기 상관(autocorrelation)의 정도)로부터 통계적으로 예측될 수 있다. 만약 광 경로 차이(ΔP)가 너무 크지 않다면(즉, $\Delta P < l_c$), 광 경로 차이(ΔP)의 변동($\delta \Delta P$)과 간섭 강도(I)의 변동(δI) 사이의 간단한 관계식이 얻어질 수 있다.

[0026] 본 명세서에서, 캐비티는 확산 반사(diffuse reflectance) 특성이 우수한 내벽을 갖도록 구성된다. 확산 반사는 종이, 백색 페인트, 또는 거친 표면과 같은 물질에서, 또는 많은 산란 입자가 있는 매체(예를 들면, 먼지가 있는 공기 또는 흐린 액체 등)에서 발생할 수 있다. 이에 따라, 캐비티로 입사하는 광은 연속적으로 랜덤 반사된다. 입사 광의 대부분은 캐비티의 출력 포트에 출력된다. 복수개의 출력 포트들이 사용되어, 측정 효율이 향상될 수 있다.

[0027] 랜덤 확산 반사 특성을 갖는 캐비티는 출력 포트들 전체로 균일하고 램버시안(Lambertian) 반사를 일으킬 수 있다. 광 모드들의 각각은 캐비티의 내벽에서 복수 회 반사되므로, 광 모드들은 캐비티 내에서 복수 회 주행(travel)한다. 캐비티 증배 계수(cavity multiplier: M)는 광 모드들이 캐비티 내벽에 흡수되기 전에 반사되는 평균 횟수를 의미하고, 아래와 같이 결정될 수 있다.

$$M = \frac{\rho}{1 - \rho(1 - S)}$$

[0029] 여기서, ρ 는 캐비티 내벽의 알베도(albedo)이고, S 는 캐비티 전체 내표면에서 포트들이 차지하는 표면의 비율이다. S 가 충분히 작으면, 캐비티 증배 계수 M 은 캐비티의 알베도에 의해 결정될 수 있다. (즉, $M \sim \rho$)

[0030] 본 명세서의 캐비티에서, 광의 경계 조건(boundary condition)은 Fabry-Perot 캐비티와는 매우 다르다. 확산 반사에 의하여, 평면파는 과도하게 무질서한 파면을 갖고 반사된다. 이에 따라, 복수개의 반사광들의 평균 광 경로를 초과하는 코히어런트 길이를 갖는 코히어런트 입사 광이 주입될 때, 확산 반사 캐비티(diffuse reflective cavity)는 랜덤 공진기(random resonator)로 행동한다. 캐비티 내의 반사광의 모드들의 수는 $\sigma_{cavity} / \lambda^2$ (여기서, σ_{cavity} 는 캐비티의 내부 면적, λ 는 광의 파장)로 스케일될 수 있다.

[0031] 본 명세서의 캐비티에서, 한 세트의 파면(wavefront)에서의 광 간섭에 의하여, 스펙클(speckle)이 생성될 수 있다. 스펙클은 레이저 광과 같은 단색광의 확산 반사에서 발생할 수 있다.

[0032] 전술한 바와 같이, 본 발명에 따른 간섭계는 Random Dynamic Interferometry (RDI)라고 불리는 랜덤 간섭 측정(random interferometry), 및 Cavity Amplified Speckle Spectroscopy(CASS)라고 불리는 랜덤 간섭 측정 분석(random interferometric analysis)에 기초한다. 본 발명에 따른 간섭계는 고확산 반사도를 갖는 캐비티에 기초하여 구성된다. 본 발명에 따른 간섭계는 캐비티 내부의 랜덤 광 간섭을 생성하고, 그들의 일시적인 변동을 증폭하고, 그리고 그들의 변동을 만드는 원인들을 검출할 수 있다. 간섭이 두 개의 경로들에서의 광 간섭에 의하여 얻어지는 일반적인 광 간섭계에 비하여, 본 발명에 따른 광 간섭계는 무질서 속의 무한하게 많은 캐비티 증배 계수(M)로 분리되는 코히어런트 광에 기초한다. 상기 광은 Fabry-Perot 캐비티에서와 같은 수많은 캐비티 경

계들에서의 반사들을 겪는다. 수많은 반사에 의한 수많은 광 모드들을 갖는 본 발명의 간섭계는 간섭 패턴의 변동을 증폭할 수 있다. 나아가, 간섭계의 정밀한 디자인 또는 정열 과정 없이, 랜덤 캐비티의 감도가 향상될 수 있다.

[0033] 이와 같이, 간섭 패턴의 변동에 따른 스펙클 필드의 변동은 증폭되어 검출될 수 있다. 스펙클 필드의 변동에 의한 광 강도의 변동은 광 강도의 상관 함수(correlation function)와 관련된다. 즉, 광 강도의 표준편차 변화(mean square variation)은 자기 상관(auto-correlation) 값에 비례한다.

[0034] 자기 상관($g(\tau)$)는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$g(\tau) = \frac{G(\tau) - n_o^2}{n_o^2}$$

[0035] 여기서, $G(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n(t_i)n(t_i - \tau)$, 그리고 $n_o = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n(t_i)$, $n(t_i)$ 는 샘플링 시간 동안 검출된 광자의 평균이고, N은 지연 시간(τ) 동안 검출된 광자의 수이다.

[0037] 출력 포트에 결합된 검출기(예를 들면, 포톤 디텍터) 자체의 노이즈 때문에 광 강도의 자기 상관으로는 좋은 결과를 얻을 수 없는 경우가 있다. 때문에, 자기 상관과 유사하게, 동일 감도를 갖는 2개의 검출기들로부터의 광 강도들의 상호 상관(cross-correlation)이 얻어진다. 이로부터 스펙클 필드의 변동이 검출 가능하다.

[0038] 이하, 첨부한 도면을 참조하여 본 발명의 기술적 사상의 바람직한 실시 예들을 설명함으로써 본 발명을 상세히 설명한다.

[0039] 도 1은 본 발명의 실시 예에 따른 랜덤 간섭계를 설명하기 위한 도면이다.

[0040] 도 1을 참조하면, 본 발명의 실시 예에 따른 랜덤 간섭계는 광원(100), 캐비티(200), 제1 광섬유(310), 제2 광섬유(320), 제3 광섬유(330), 검출부(400), 및 데이터 분석부(500)를 포함할 수 있다.

[0041] 실험 예로, 광원(100)은 660nm의 파장, 100mW의 출력, 1MHz의 밴드 폭, 및 0.2%의 강도 노이즈를 가지는 단파장 레이저가 사용되었다.

[0042] 광원(100)은, 예를 들어 제1 광섬유(310)를 통해 캐비티(200) 내로 입사 광(L)을 주입될 수 있다. 제1 광섬유(310)는 캐비티(200)의 입력 포트(201)에 결합된다. 입사 광(L)은 캐비티 내벽에서 반사되는 광 모드들(LM)의 경로 길이보다 긴 코히어런스 길이를 갖는다.

[0043] 캐비티(200)의 형태는 한정되지 않을 수 있다. 캐비티(200)는 구형일 수도 있고, 원통형일 수도 있고, 오목한 모양일 수도 있다. 캐비티(200)는, 예를 들어 스펙트랄론 구(spectralon sphere)일 수 있다. 이와는 달리, 캐비티(200)는 하부가 리세스된 상부 바디와 상부가 리세스된 하부 바디를 포함할 수 있다. 상부 바디와 하부 바디는 서로 결합하여 캐비티를 구성할 수 있다. 캐비티(200)은 테프론 또는 압축된 퀴즈 파우더로 구성될 수 있다.

[0044] 캐비티(200) 내로 주입된 입사 광(L)은 캐비티(200) 내에서 광 모드들(LM)로 나누어질 수 있다. 캐비티(200) 내에서, 입사 광(L) 및 광 모드들(LM)은 램버시안(Lambertian) 반사될 수 있다. 캐비티(200) 내에서, 광 모드들(LM)의 분포는 등방적이고, 균일할 수 있다. 캐비티(200) 내에서, 광 모드들(LM)은 랜덤하게 간섭할 수 있다. 입사 광(L)의 코히어런트 길이는 광 모드들(LM)의 평균 경로 길이보다 크므로, 캐비티(200)의 내벽(210)에서 광 모드들(LM)이 반사되는 횟수가 클 수 있다. 이에 따라, 광 모드들(LM) 간의 간섭이 극대화될 수 있다. 광 모드들(LM)의 간섭에 의해, 랜덤한 강도 및 랜덤 극성을 가지는 3D 스펙클 필드가 형성될 수 있다. 스펙클 필드는 캐비티(200) 내에서 균일하고, 대칭적으로 분포될 수 있다.

[0045] 캐비티 증배 계수 M을 상대적으로 크게 함으로써, 스펙클 필드의 변동이 증폭될 수 있다. 스펙클 필드 변동의 증폭은 캐비티(200)의 형태와 무관할 수 있다.

[0046] 검출부(400)는 스펙클 강도를 검출할 수 있다. 검출부(400)는, 예를 들어 제2 광섬유(320)를 통해, 캐비티(200) 내의 스펙클 필드로부터 방출된 방출 광의 강도를 검출할 수 있다. 제2 광섬유(320)는 캐비티(200)의 출력 포트(202)에 연결된다. 출력 포트(202) 및 검출부(400)가 하나인 것으로 도시되어 있지만, 이에 한정되지 않고 다수 개일 수 있다. 검출부(400)는 포토 디텍터일 수 있다. 여기서, 검출부(400)는, 제2 광섬유(320) 없이, 캐비티(200)의 출력포트(202)에 직접 결합될 수 있다.

- [0047] 데이터 분석부(500)는 검출부(400)에서 검출된 스펙클 강도의 변동을 시간 영역 및 주파수 영역에서 분석할 수 있다. 검출부(400) 및 데이터 분석부(500)는 제3 광섬유(330)를 통해 서로 연결될 수 있다. 데이터 분석부(500)는 디지털 또는 아날로그 상관기(correlator)일 수 있다. 스펙클 필드의 변동은 전술한 광 강도의 자기 상관 또는 상호 상관으로부터 얻어질 수 있다.
- [0048] 도 2는 본 발명에 따른 캐비티의 출력 포트에서 광 강도의 각도분포(angular profile)를 도시한다. 점들은 실험 측정 값이고, 실선은 피팅 결과이다. 광 강도는 코사인의 램버시안 프로파일을 나타낸다. 본 발명에서의 캐비티 내벽에서, 램버시안 확산 반사(Lambertian diffuse reflection)가 일어남을 알 수 있다.
- [0049] 도 3은 피코초의 아주 짧은 레이저 펄스(short picosecond laser pulse)가 본 발명에 따른 캐비티를 통과할 때 상당히 늘어지는 것을 보여주는 도시한다. 수치 계산에 의한 피팅 곡선으로부터, 본 발명의 테프론 캐비티는 대략 99.96% ($\pm 0.005\%$)의 알베도를 갖는 것이 확인되었다.
- [0050] 도 4는 본 발명에 따른 간섭계에서 측정된 상호 상관 베이스 레벨(cross-correlation base level)에 대한 입사 광의 영향을 보여준다. 입사 광의 변동 하에서 검출 광의 상호 상관 측정의 결과이다. 지연 시간(τ)은 0 초였다. 가로축은 $\text{std}^2/\text{mean}^2$, 세로축은 상호 상관 베이스 레벨을 나타낸다. std는 입사 광 강도의 표준편차, mean은 입사 광 강도의 평균이었다. 상호 상관 베이스 레벨은 $\text{std}^2/\text{mean}^2$ 에 비례하였다.
- [0051] 추가적으로, 고유 노이즈로 인한 상호 상관은 제거되어, 외부 섭동(external perturbation)으로 인한 상관관계만 남겨질 필요가 있다.
- [0052] 도 5는 캐비티들에서의 스펙클 필드 강도의 상관관계 변화를 설명하기 위한 그래프이다. (a)는 본 발명에 따른 테프론 캐비티의 랜덤 간섭계에 대한 것이고, (b)는 랜덤 간섭계가 아닌 Diffusive Wave Spectroscopy (DWS)에 대한 것이다.
- [0053] 캐비티(200) 내에 투입된 샘플은 3.5ml의 수크로스(sucrose, 굴절률 1.405) 용액에 함유된 지름 $5.5\mu\text{m}$ 의 PMMA(polymethylmethacrylate, 굴절률 1.488) 입자를 포함하였다. 샘플에서, PMMA 입자의 수는 일정하였다. 스펙클 필드의 강도는 1시간 동안 100kHz의 sampling rate으로 측정되었다.
- [0054] 도 5를 참조하여, 본 발명에 따른 랜덤 간섭계(a)는 DWS(b) 보다 스펙클 필드의 변동이 약 100배 빨리 검출되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 본 발명에 따른 랜덤 간섭계가 일반적인 DWS 보다 높은 민감도를 가짐을 알 수 있다.
- [0055] 본 발명에 따른 랜덤 간섭계는 캐비티(200) 내의 스펙클 필드의 변동을 일으키는 원인을 검출할 수 있다. 스펙클 필드의 변동을 일으키는 원인은 여러 가지가 있을 수 있다. 아래에서, 그에 따른 랜덤 간섭계의 용도를 3가지 설명한다.
- [0056] 일 예로, 본 발명에 따른 랜덤 간섭계는 레이저 진단기 및 스펙트럼 변동 계측기로 사용될 수 있다. 캐비티가 완전히 정적인 경우(즉, 캐비티 자체의 변형이 없고, 캐비티 내의 매질의 변동이 없는 경우), 이상적으로 완전히 코히어런트한 모노크로매틱(infinitely coherent monochromatic) 입사 광은 완전히 일정한 스펙클 필드를 생성할 수 있다. 이 경우, 입사 광의 양자역학적 변동을 벗어나는 스펙클 필드의 변동이 검출되지 않는다. 따라서, 입사 광이 완전히 코히어런트 하지 않거나(finite coherence) 노이즈를 포함하는 경우, 스펙클 필드의 변동이 검출될 수 있다.
- [0057] 스펙클 필드의 변동은, 입사 광 스펙트럼의 밴드 폭(τ_c^{-1})보다 큰 주파수(f)에서, 증폭될 수 있다. 특히, 입사 광의 위상 변동에 의한 스펙클 필드의 변동이 증폭되어, 입사 광(즉, 레이저 소스)의 분광 품질(spectral quality) 및 분광 노이즈(spectral noise)가 검출될 수 있다. 입사 광(L)의 강도 변동에 의한 스펙클 필드의 변동 역시 증폭되어, 입사 광의 강도 노이즈가 검출될 수 있다. 입사 광 스펙트럼의 밴드 폭 보다 작은 주파수에서 즉, $f\tau_c < 1$, 본 발명에 따른 랜덤 간섭계는 입사 광의 위상 변동들(또는, 입사 광의 파장 및 강도 변동들)을 거의 검출 수 없다.
- [0058] 도 6은 직접 조명 하에서의 레이저 광의 3 시간 상호 상관을 측정한 결과이다. 연한 실선은 raw data, 굵은 점선은 피팅 라인이다. 상관 관계는 2kHz에서 갑자기(기하 급수적으로) 감소하는 피팅(fitting) 결과를 보인다. 이는 레이저 펌핑 강도(pump intensity)의 변동으로 인한 레이저 여기 상태(laser excited state)의 이완 진동(relaxation oscillation)에 기인한다.

- [0059] 이와 같이, 본 발명에 따른 랜덤 간섭계는 입사 광(L)의 위상 및 강도의 변동을 측정 및 진단하고, 파장 변동을 검출할 수 있다. 나아가, 서로 다른 파장을 갖고 서로 코히어런트하지 않는 입력 광들이, 본 발명에 따른 하나의 랜덤 간섭계를 이용하여, 분석될 수 있다. 이와 같이, 본 발명에 따른 랜덤 간섭계는 각각의 서로 다른 파장들에서 정밀하게 튜닝하여야 하는 일반적인 간섭계보다 우수한 성능을 갖는다.
- [0060] 일 예로, 본 발명에 따른 랜덤 간섭계는 음향, 기계적 힘 또는 기계적 진동의 센서로 사용될 수 있다. 입사 광(L)의 위상 및 강도가 안정적이고 도 1의 캐비티(200)가 변형되지 않는다면, 스펙클 필드의 파워 스펙트럼은 안정적이다. 본 발명에 따른 랜덤 간섭계는 캐비티(200)의 변형에 따른 스펙클 필드의 변동을 검출할 수 있다. 본 발명에 따른 랜덤 간섭계는 주변 환경의 압력 변화, 음파 또는 기계적 진동을 측정하는 것에 사용될 수 있다.
- [0061] 예를 들어, 도 7a와 같이, 캐비티(200)가 두 개의 바디들(210, 220)로 이루어진 경우, 두 개의 바디들의 상대적 움직임은 피코미터(pm) 단위의 민감도로 측정될 수 있다. 도 7a는 본 발명에 따른 캐비티의 일 예이고, 도 7b는 도 7a의 A-A'선에 따른 단면도이다. 두 개의 바디들이 탄성 물질(215)에 의해 결합되는 경우, 캐비티(200)는 기계적 공진기(mechanical resonator)로 이용될 수 있다. 이와 같이, 본 발명에 따른 랜덤 간섭계는 탄성 물질의 특성(compliance)을 측정할 수 있다.
- [0062] 도 8a는 본 발명에 따른 랜덤 간섭계의 캐비티를 구현하는 실험 예를 설명하기 위한 도면이다. 도 8b는 도 8a의 B-B'선에 따른 단면도이다.
- [0063] 도 8a 및 8b 에서의 캐비티(200)는 상부 바디(210) 및 하부 바디(220)를 포함한다. 상부 바디(210) 및 하부 바디(220) 사이에 압전 액추에이터들(230)이 배치되었다. 제어기(240)에서 인가되는 전압에 의해, 압전 액추에이터들(230)이 진동하였다. 이에 따라, 캐비티(200)에 기계적 변형(mechanical deformation)이 발생하고, 캐비티(200) 내에서의 스펙클 필드의 강도 변동이 발생하였다. 상기 과정을 통해, 압전 액추에이터들(230)에 의한 스펙클 필드의 강도 변동이 측정될 수 있다. 다시 말하면, 압전 액추에이터들(230)을 이용하여, 본 발명에 따른 랜덤 간섭계의 감도(sensitivity)가 캘리브레이션(calibration)될 수 있다. 상기 캘리브레이션 결과를 바탕으로, 캐비티(200)의 변형을 일으키는 진동 및 기계적 힘을 측정할 수 있다.
- [0064] 도 9는 도 8a의 간섭계의 압전 액추에이터에 인가되는 전압 변화에 따른 상호 상관의 변화를 나타내는 그래프이다. 압전 액추에이터들(230)에서의 진동은 1kHz이고, 제어기(240)에서 인가되는 전압은 1V에서 10V로 변화되었다.
- [0065] 도 10은 도 8a의 간섭계의 압전 액추에이터에 인가되는 전압에 따른 스펙클 필드의 강도 변동을 설명하기 위한 그래프이다. 인가 전압에 따른 도 9의 1차 상관 진폭(first correlation amplitude)의 변화가 도 10에 도시된다. 압전 액추에이터들(230)에 의해 가해지는 기계적 변형(mechanical deformation)에 대하여 캐비티가 선형적으로 반응하는 것이 보여진다. 즉, 스펙클 필드의 상호 상관의 첫 번째 피크의 진폭은 제어기(240)가 인가하는 전압에 선형적으로 반응함을 확인할 수 있다. 다시 말하면, 캐비티(200)의 변형이 클수록, 스펙클 필드의 강도 변동이 큰 것을 확인할 수 있다.
- [0066] 나아가, 도 11은 도 1의 간섭계에서의 외부 진동 및 지진 잡음에 대한 감도의 예를 도시한다. (a)의 캐비티는 실험실 바닥 위에 직접 배치되어, 지진 잡음을 암시하는 유사한 주파수에서 매우 큰 상관 피크가 보인다. (b)의 캐비티는 고립되어 있지 않은 (압축 공기가 제거된) 광학 테이블에 배치되어, 지진 잡음에 의한 피크가 보인다. (c)의 캐비티는 수동적으로 격리된 광학 테이블(passively isolated optical table) 상에 배치되어, 약 100Hz에서 작은 상관 피크가 보인다. (d)의 캐비티는 (c) 조건의 광학 테이블 상에 놓여진 적극적으로 격리된 브레드보드(actively isolated breadboard) 위의 수제 아크릴 상자 (열, 음향 및 전자기로부터의 격리) 내에 배치되어, 아주 적은 크기의 노이즈를 제외하면, 가시적인 진동이 없는 것이 보인다.
- [0067] 일 예로, 본 발명에 따른 랜덤 간섭계는 캐비티 내에 제공된 샘플들의 광학적 특성 측정에 사용될 수 있다. 캐비티가 비어있는 상태이면(즉, 진공 상태이면), 광 모드들(LM)의 경로는 캐비티 내벽의 구조에 따라 결정될 수 있다. 캐비티 내에 공기가 존재하는 경우, 캐비티 내의 공기가 캐비티 내의 굴절률을 약간 변화시켜, 광 모드들의 유효 광 경로가 변경됨에 따라 광 모드들을 변화시킬 수 있다. 일 예로, 캐비티 내의 평균 굴절률을 10^{-8} 정도(이는 공기와 진공 사이의 굴절률 차이인 $\approx 3 \times 10^{-4}$ 보다 작다) 변화하는 매질이 캐비티 내에 제공되는 경우, 스펙클 필드의 변동이 측정될 수 있다. 결론적으로, 본 발명에 따른 랜덤 간섭계는 캐비티(200) 내부에 제공된 매질의 굴절률 변동을 측정할 수 있는 굴절계(dynamic refractometer)로 기능할 수 있다.
- [0068] 캐비티 내의 굴절률이 공간적으로 불균일하면(spatial index heterogeneities), 스펙클 필드가 흩어지므로, 랜

덤 간섭계는 캐비티 내의 굴절률의 공간적 시간적 변동(spatio-temporal fluctuations)을 감지하는 센서로 기능할 수 있다.

[0069] 캐비티 증배 계수가 M 인 캐비티 내에 약간 혼탁한 샘플이 제공되는 경우, 캐비티 내에서 광 모드들이 M 회 반사되므로, 캐비티 내의 1cm^3 의 샘플을 통과하는 광 모드들은 캐비티 밖의 $M^3\text{cm}^3$ 의 샘플을 통과하는 광 모드들과 동일한 효과를 가질 수 있다.

[0070] 도 12는 본 발명에 따른 캐비티 내의 샘플의 광학적 특성을 측정하는 것을 도시한다. 캐비티 내에 투입된 샘플은 3.5ml의 수크로스(sucrose, 굴절률 1.405) 용액에 함유된 지름 $5.5\mu\text{m}$ 의 PMMA(polymethylmethacrylate, 굴절률 1.488) 입자를 포함하였다. 스펙클 필드의 강도는 1시간 동안 100kHz의 sampling rate으로 측정되었다.

[0071] 선 (a)에서 선 (e)는 테프론 캐비티로 구성된 간섭계에 대한 것이고, 선 (f)는 상기 간섭계가 아닌 Diffusive Wave Spectroscopy (DWS)에 대한 것이다. 선 (a)에서 선 (e)로 갈수록 PMMA 입자의 농도가 증가되어, 매질의 증배도(multiplicity)는 각각 7, 8, 11, 17, 22이었다. 농도가 증가됨에 따라, 섭동이 누적되어, 스펙클 강도의 감속 더 빨라진다. 선 (f)는 DWS에서 선 (e)와 동일한 샘플에서 측정된 것이다. 본 발명에 따른 테프론 캐비티가 DWS 보다 상관관계의 감소(decorrelation)가 더 빨리 일어나 측정의 민감도가 더 큰 것을 알 수 있다. 본 발명에 따른 간섭계에서의 묶은 샘플(즉, 선 (a))이 DWS에서의 더 진한 샘플(즉, 선 (f))와 동일한 상관관계의 감소(decorrelation)를 갖는다.

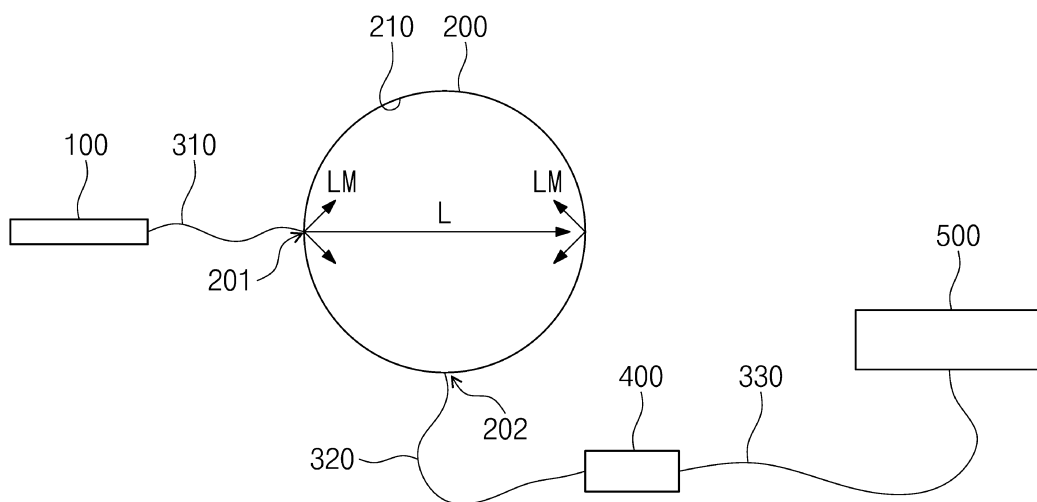
[0072] 이와 같이, 본 발명에 따른 랜덤 간섭계는 작은 크기에도 높은 민감도를 갖는 광학적으로 증폭된 비탁계(nephelometer), 유동학(rheology), 입자 크기 측정, 상변화의 측정을 위한 동적 광 산란, 또는 광학적으로 증폭된 동적 광 산란 등에 사용될 수 있다. 나아가, 이러한 측정은 가속도계, 및 표면 장력과(capillary waves)를 사용하는 진동 센싱에 사용될 수 있다.

[0073] 본 발명에 따른 랜덤 간섭계는 광 산란의 다중도(multiplicity of light scattering)를 증대시키고, 옹스트룀 이하 크기 움직임(sub-Angstrom motions)의 검출 감도를 향상시킬 수 있다.

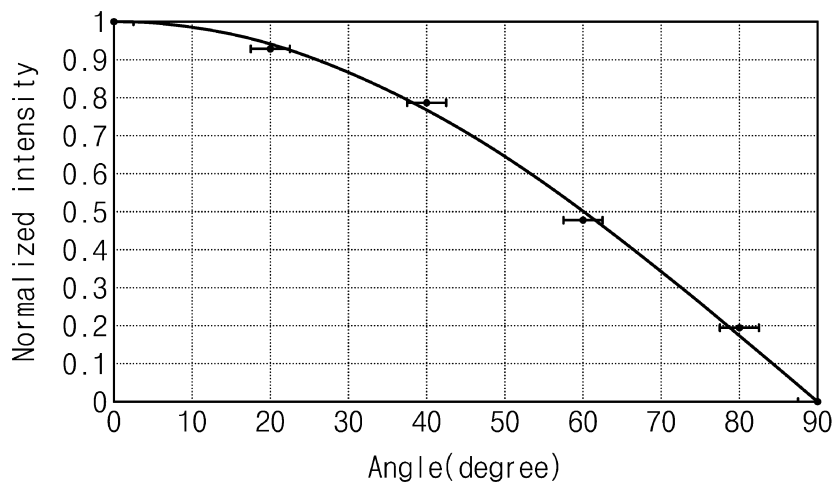
[0074] 본 발명의 기술적 사상의 실시 예들에 대한 이상의 설명은 본 발명의 기술적 사상의 설명을 위한 예시를 제공한 다. 따라서 본 발명의 기술적 사상은 이상의 실시 예들에 한정되지 않으며, 본 발명의 기술적 사상 내에서 당해 기술 분야의 통상의 지식을 가진 자에 의하여 상기 실시 예들을 조합하여 실시하는 등 여러 가지 많은 수정 및 변경이 가능함은 명백하다.

도면

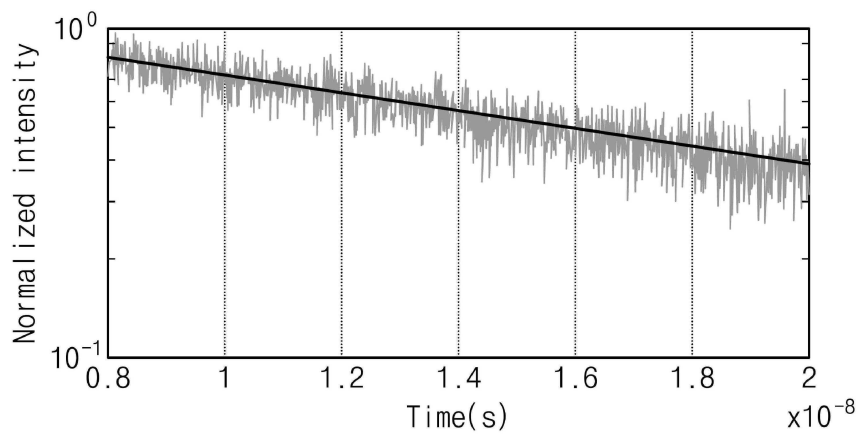
도면1



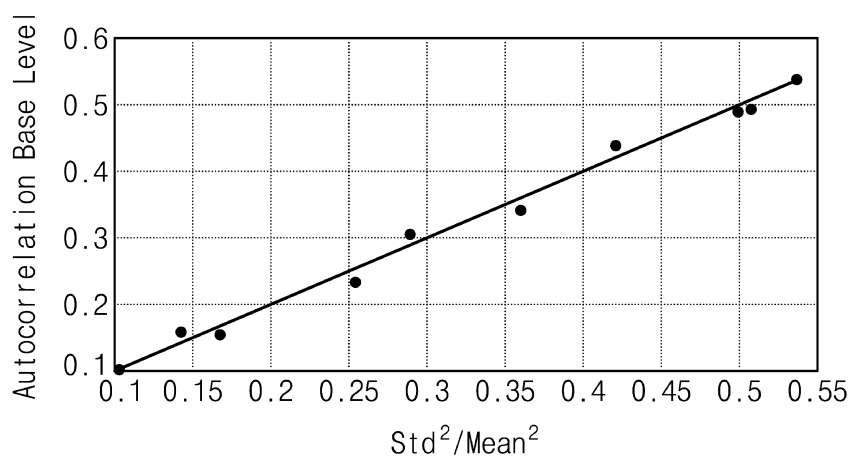
도면2



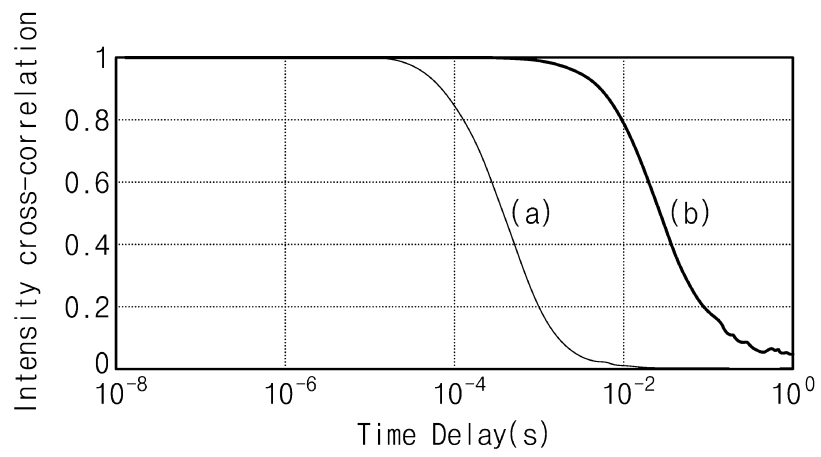
도면3



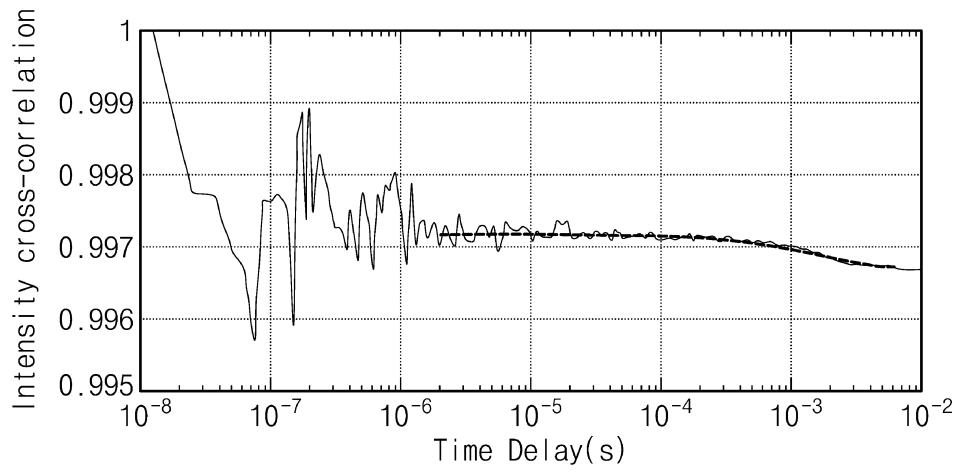
도면4



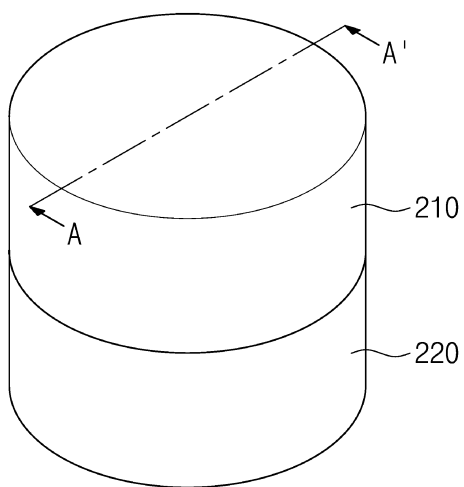
도면5



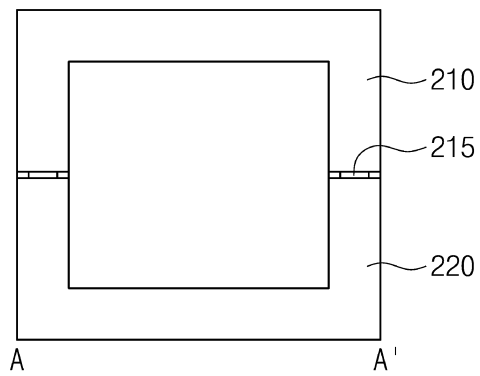
도면6



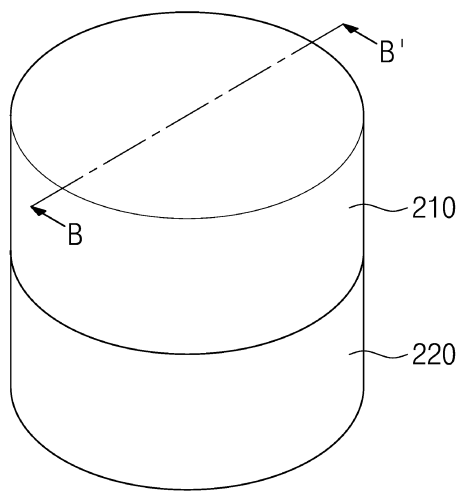
도면7a



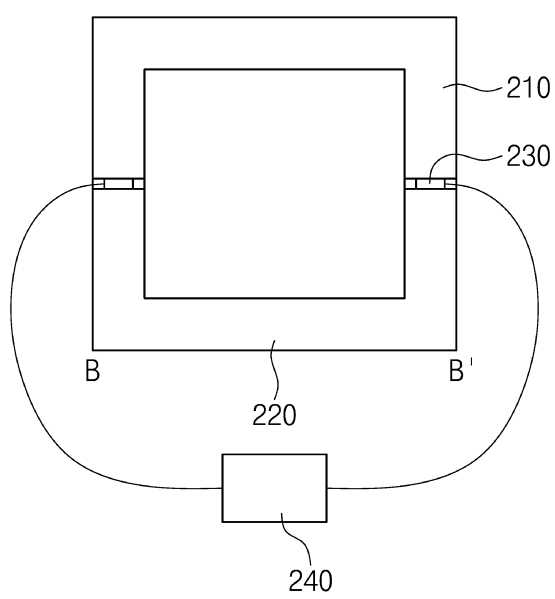
도면7b



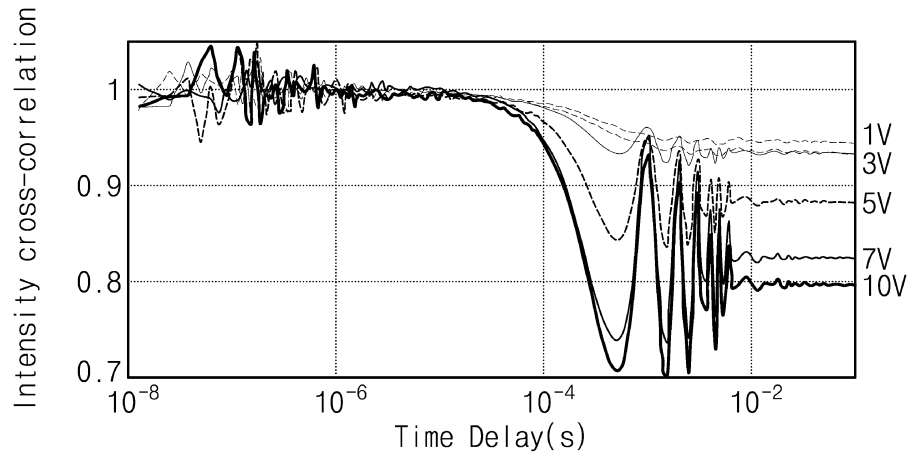
도면8a



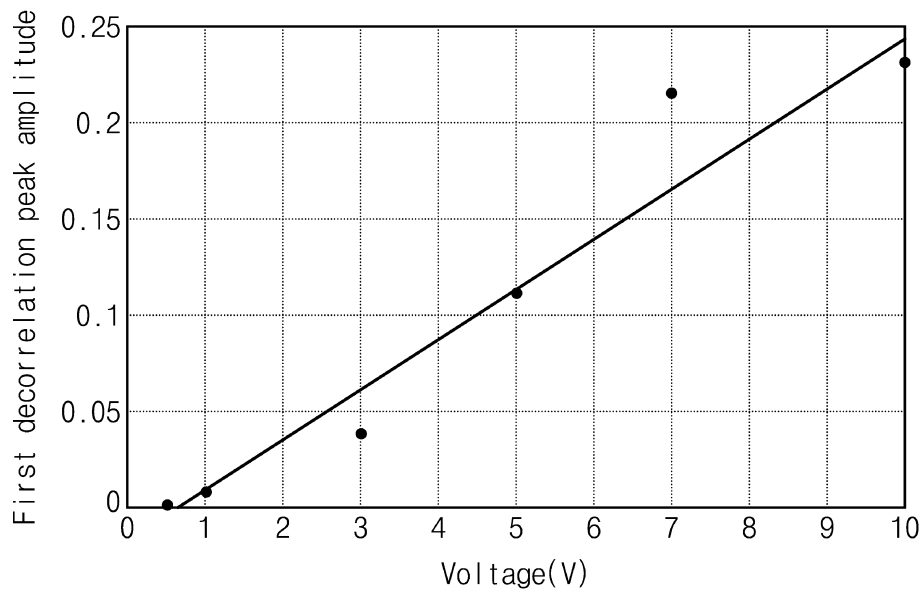
도면8b



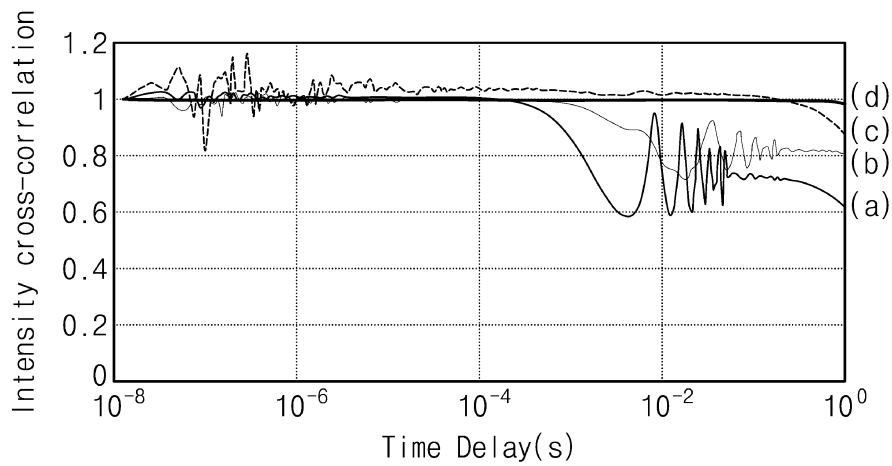
도면9



도면10



도면11



도면12

