



등록특허 10-2139988



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2020년07월31일

(11) 등록번호 10-2139988

(24) 등록일자 2020년07월27일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 21/21 (2006.01) G01J 4/00 (2006.01)

(52) CPC특허분류
G01N 21/211 (2013.01)
G01J 4/00 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2018-0081169

(22) 출원일자 2018년07월12일

심사청구일자 2018년07월12일

(65) 공개번호 10-2020-0007267

(43) 공개일자 2020년01월22일

(56) 선행기술조사문헌

KR1020160109786 A*

US20070091311 A1

KR101590389 B1

US07889340 B1*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

한국표준과학연구원

대전 유성구 가정로 267(가정동, 한국표준과학연구원)

(72) 발명자

조용재

대전광역시 유성구 대덕대로590번길 11-10, 1-506(도룡동, 더포엠)

제갈원

대전광역시 유성구 배울2로 24(관평동, 대덕테크노밸리3단지아파트)

조현모

대전광역시 서구 둔산로 15, 115-1403(둔산동, 향촌아파트)

(74) 대리인

특허법인 플러스

전체 청구항 수 : 총 21 항

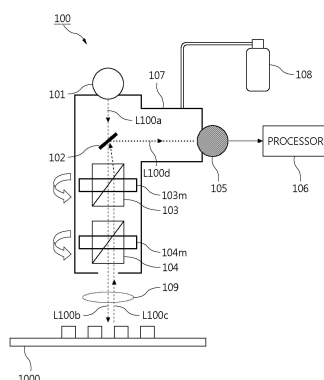
심사관 : 정치영

(54) 발명의 명칭 수직입사 타원계측기 및 이를 이용한 시편의 광물성 측정 방법

(57) 요약

본 발명은 수직입사 타원계측기 및 이를 이용한 시편의 광물성 측정 방법에 관한 것이다. 본 발명의 목적은 파장 의존성이 있는 보상기를 파장 의존성이 없는 선형편광자로 대체함으로써, 장비 교정절차를 간소화할 수 있게 함과 동시에 측정파장 영역 확장을 용이하게 실현할 수 있도록 해 주는, 수직입사 타원계측기 및 이를 이용한 시편의 광물성 측정 방법을 제공함에 있다.

대표도 - 도3



(52) CPC특허분류

G01N 2021/213 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	18011071
부처명	과학기술정보통신부
연구관리전문기관	한국표준과학연구원
연구사업명	한국표준과학연구원 연구운용비 지원
연구과제명	차세대 초박막 측정표준기술 개발
기 여 율	1/1
주관기관	한국표준과학연구원
연구기간	2018.01.01 ~ 2018.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

시준광학계를 포함하여 시편을 향해 입사평행빔을 방사하는 광원;

상기 광원 및 상기 시편 사이에 배치되며, 상기 입사평행빔 일부를 상기 시편 면에 수직 방향으로 향하게 하는 광분할기;

상기 광분할기 및 상기 시편 사이에 배치되며, 기설정된 방위각으로 고정되어 상기 입사평행빔을 기설정된 방향의 선편광 성분만 통과시키는 고정편광자;

상기 고정편광자 및 상기 시편 사이에 배치되며, 등속으로 회전하여 상기 입사평행빔의 편광상태를 등속회전 진동수에 따라 규칙적으로 변조시키는 등속회전편광자;

상기 시편에서 반사된 반사평행빔을 입사받아 분광복사선속의 노광량을 측정하는 광검출소자;

상기 시편 및 상기 광검출소자 사이에 배치되며, 등속으로 회전하여 상기 반사평행빔의 편광상태를 등속회전 진동수에 따라 규칙적으로 변조시키는 등속회전검광자;

상기 등속회전검광자 및 상기 광검출소자 사이에 배치되며, 기설정된 방위각으로 고정되어 상기 반사평행빔의 기설정된 방향의 선편광 성분만 통과시키는 고정검광자;

상기 고정편광자 및 상기 고정검광자의 방위각, 상기 등속회전편광자 및 상기 등속회전검광자의 등속회전각속도를 제어하며, 상기 광검출소자에서 측정된 분광복사선속의 노광량 값을 분석하여 상기 시편의 광물성을 산출하는 전산기기;

를 포함하며,

상기 고정편광자 및 상기 고정검광자가 하나의 선형편광자로서 일체로 이루어지고, 상기 등속회전편광자 및 상기 등속회전검광자가 하나의 등속회전선형편광자로서 일체로 이루어지는 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기.

청구항 2

제 1항에 있어서, 상기 수직입사 타원계측기는,

상기 광분할기, 상기 고정편광자 및 상기 고정검광자가 하나의 광분할선형편광자로서 일체로 이루어지는 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기.

청구항 3

제 2항에 있어서, 상기 광분할선형편광자는,

윌라스턴 프리즘인 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기.

청구항 4

제 1항에 있어서, 상기 광검출소자는,

화소들이 선형 또는 2차원 평면 구조로 배열된 CCD, CMOS 또는 포토다이오드 어레이 소자를 포함하는 분광기에서 각각 지정된 파장 대역에 대한 화소 또는 비닝된 화소들 중에서 선택되는 적어도 하나인 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기.

청구항 5

제 4항에 있어서, 상기 광검출소자는,

하나의 분광기이거나 또는 s-편광분광기 및 p-편광분광기로 이루어지는 분광기 세트에서 각각 지정된 파장 대역에 대한 화소 또는 비닝된 화소들 중에서 선택되는 적어도 하나인 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기.

청구항 6

제 1항에 있어서, 상기 광검출소자는,

상기 광원이 가스 레이저, 레이저 다이오드 중 선택되는 적어도 하나인 단일 파장의 광원장치일 경우, PMT 및 포토다이오드를 포함하는 단일점 광검출기로 구성된 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기.

청구항 7

제 1항에 있어서, 상기 광검출소자는,

화소들이 2차원 평면 구조로 배열된 CCD 및 CMOS를 포함하는 이미징 광검출기에서 선택된 하나의 화소인 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기.

청구항 8

제 1항에 있어서, 상기 수직입사 타원계측기는,

상기 고정편광자 및 상기 고정검광자에 방위각 조절을 위한 중공축스테핑모터가 구비되고,

상기 등속회전편광자 및 상기 등속회전검광자의 등속회전각속도 조절을 위한 등속회전중공축모터가 구비되는 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기.

청구항 9

제 1항에 있어서, 상기 전산기기는,

상기 광검출소자로부터 측정된 광의 분광복사선속의 노광량 값들로부터 분광복사선속 파형에 대한 푸리에계수 값들을 계산하고, 상기 푸리에계수 값들로부터 상기 시편의 물리-행렬성분 값들을 계산하며, 상기 물리-행렬성분 값들로부터 상기 시편의 광물성 값들을 분석 및 산출하는 연산부,

상기 고정편광자 및 상기 고정검광자의 방위각을 중공축스테핑모터를 사용하여 원격 제어하고, 상기 등속회전편광자 및 상기 등속회전검광자의 등속회전각속도를 등속회전중공축모터를 사용하여 원격 제어하는 제어부,

상기 분광복사선속의 노광량 값인 측정값, 상기 푸리에계수 값 및 상기 물리-행렬성분 값인 계산값, 상기 시편의 광물성 값인 분석값을 저장하는 저장부,

상기 측정값, 상기 계산값, 상기 분석값을 출력하는 출력부

를 포함하는 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기.

청구항 10

제 9항에 있어서, 상기 광원은,

제논(Xenon) 램프, 텅스텐(Tungsten)-할로겐(Halogen) 램프, 듀테륨(Deuterium) 램프, 레이저로 구동되는 광원

(Laser Driven Light Source), 가스 레이저, 레이저 다이오드 중 선택되는 적어도 하나이거나, 또는 이들에서 방사된 광을 광섬유를 통하여 전달되는 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기.

청구항 11

제 1항에 있어서, 상기 수직입사 타원계측기는,
광경로를 외부 대기와 차폐하는 차폐용부스;
상기 차폐용부스에 연결되어 비활성 가스를 공급하는 가스공급장치;
를 포함하는 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기.

청구항 12

제 11항에 있어서, 상기 비활성 가스는,
질소 가스 또는 아르곤 가스인 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기.

청구항 13

제 1항에 있어서, 상기 수직입사 타원계측기는,
상기 등속회전편광자 및 상기 시편 사이에 배치되며, 상기 시편의 국소 영역에 초점이 맺히도록 상기 입사평행
빔을 수렴시키는 초점광학계;
를 포함하는 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기.

청구항 14

제 13항에 있어서, 상기 초점광학계는,
광대역 파장에 대한 색수차 보정을 위하여, 적어도 하나의 거울, 적어도 하나의 렌즈, 또는 적어도 하나의 거울
및 적어도 하나의 렌즈의 세트 중 선택되는 하나인 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기.

청구항 15

제 14항에 있어서, 상기 초점광학계는,
투과 또는 반사 효율 향상을 위하여, 상기 거울 또는 상기 렌즈에 단일 박막 또는 다층 박막이 코팅되는 것을
특징으로 하는 수직입사 타원계측기.

청구항 16

제 1항에 있어서, 상기 수직입사 타원계측기는,
복수 개의 상기 시편을 수용 및 보관하는 시편보관용기, 상기 시편보관용기로부터 복수 개의 상기 시편을 기설
정된 규칙에 따라 순차적으로 하나씩 꺼내어 상기 수직입사 타원계측기의 시편받침대에 배치시키고 측정 완료된
상기 시편을 상기 시편보관용기의 원래 위치로 복귀시키는 시편운반장치를 포함하는 시편운반시스템;
을 포함하는 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기.

청구항 17

제 1항에 있어서, 상기 수직입사 타원계측기는,

시편 정렬용 광을 방사하는 정렬용레이저, 상기 레이저에서 방사되는 광을 상기 시편에 기설정된 방향으로 입사시키는 정렬용광학계, 상기 시편에 입사되어 반사된 광을 수광하여 상기 시편의 위치를 판별하는 정렬용광검출기를 포함하는 시편정렬시스템;

을 포함하는 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기.

청구항 18

제 1항에 있어서, 상기 수직입사 타원계측기는,

측정환경의 진동에 의한 영향을 방지하도록, 상기 수직입사 타원계측기 하부에 구비되는 제진시스템;

을 포함하는 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기.

청구항 19

제 1항에 있어서, 상기 수직입사 타원계측기는,

온도변화에 따른 측정오차 발생을 방지하도록, 측정환경 온도를 유지하거나 냉각하는 항온장치 또는 냉각장치;

를 포함하는 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기.

청구항 20

제 1항에 의한 수직입사 타원계측기를 이용한 시편의 광물성 측정 방법에 있어서,

광물성을 측정하고자 하는 상기 시편이 상기 수직입사 타원계측기의 시편받침대에 장착 및 정렬되는 시편장착단계;

상기 전산기기에 의하여, 상기 고정편광자 및 상기 고정검광자의 방위각 값이 선택되는 방위각선택단계;

상기 전산기기에 의하여, 상기 고정편광자 및 상기 고정검광자를 설정방위각으로 이동시키는 방위각이동단계;

상기 광검출소자에 의하여, 상기 등속회전편광자 및 상기 등속회전검광자의 방위각 변화에 따른 상기 반사평행법의 분광복사선속의 노광량 값이 측정되는 노광량측정단계;

상기 전산기기에 의하여, 상기 분광복사선속의 노광량 값들로부터 분광복사선속 파형의 푸리에계수 값들이 계산되는 푸리에계수계산단계;

상기 전산기기에 의하여, 상기 푸리에계수 값들로부터 상기 시편의 물리-행렬성분 값들이 계산되는 물리행렬성분계산단계;

상기 전산기기에 의하여, 상기 물리-행렬성분 값들로부터 상기 시편의 광물성 값들이 분석 및 산출되는 시편광물성분석단계;

를 포함하는 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기를 이용한 시편의 광물성 측정 방법.

청구항 21

제 20항에 있어서, 상기 광물성은,

계면특성, 박막두께, 복소굴절률, 나노형상, 비등방특성, 표면거칠기, 조성비, 결정성 중 선택되는 적어도 하나인 것을 특징으로 하는 수직입사 타원계측기를 이용한 시편의 광물성 측정 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 수직입사 타원계측기 및 이를 이용한 시편의 광물성 측정 방법에 관한 것이다. 보다 구체적으로는, 본 발명은 시편에 의해 반사된 광의 편광상태 변화를 측정 및 분석하여 시편의 광물성을 측정하는 데에 사용되는 수직입사 타원계측기 및 이를 이용한 시편의 광물성 측정 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 반도체 소자, 평판 디스플레이, 박막형 태양전지, 나노 임프린트, 나노바이오, 박막광학 등과 관련된 다양한 산업분야가 급격히 발전하고 있는 가운데, 박막의 두께는 점점 작아져서 몇 개의 원자층 수준까지 도달하게 되었고 나노 패턴의 형상은 기존의 2차원 구조에서 3차원 구조로 복잡화되는 추세이다. 이에 따라 이러한 제품들의 제조공정 단계에서 나노 시편을 손상시키지 않도록 비접촉식으로 이루어지면서도 박막의 두께, 나노 패턴의 형상 등과 같은 나노 스케일의 시편의 형상 및 물성을 보다 정확하게 분석하기 위한 공정용 측정기술에 대한 필요가 더욱 커지고 있는 실정이다. 이러한 비접촉식 나노 스케일 측정 기술 중, 타원계측기와 이를 이용한 방법이 광원, 광검출기, 컴퓨터 등의 발전과 더불어 널리 이용되고 있다.

[0003] 입사각을 기준으로 하였을 때 타원계측기의 종류는 수직입사 방식과 경사입사 방식으로 구분할 수 있다. 수직입사 방식은 시편 면에 수직하게(즉 입사각이 0도)로 측정빔을 입사시켰을 때 시편에 의해 수직으로 반사된 빛의 편광상태 변화를 측정하는 방식이며, 경사입사 방식은 측정빔의 입사각이 0도 ~ 90도 범위 내에서 임의로 선택된 값을 갖도록 하여 측정하는 방식이다. 이 중 수직입사 방식은, 측정장치의 크기를 보다 작게 만들 수 있고, 시편에서 보다 작은 면적의 내부 지역을 측정할 수 있도록 측정빔을 작게 만들 수 있는 장점이 있다. 미국특허 등록 제7355708호, 미국특허등록 제7889340호 등과 같은 여러 특허문헌이나 그 외 여러 논문에 이러한 수직입사 방식의 타원계측기의 기본적인 구성 및 원리가 잘 개시되어 있다.

[0004] 수직입사 타원계측기의 기본 구성

[0005] 광소자-회전형 타원계측기는 기본적으로, 광원(Light Source: LS), 편광상태발생기(Polarization State Generator; PSG), 시편(Sample; SP), 편광상태분석기(Polarization State Analyzer), 검출광학계(Detection Optic System; DOS), 광검출소자(Photodetector Element; PDE)를 포함할 수 있는데, 각부에 대하여 간략히 설명하면 다음과 같다. 광원은 램프 등에서 방사된 빛을 광학계를 사용해서 평행빔으로 만드는 역할을 한다. 편광상태발생기는 광원에서 방사된 평행빔을 특정한 편광상태로 만드는 역할을 하는 편광 광학계이다. 시편은 변조된 입사평행빔의 진행 경로 상에 놓여진다. 편광상태분석기는 시편에서 반사된 반사평행빔의 진행 경로 상에 상기 반사평행빔의 편광상태를 분석하기 위한 역할을 하는 편광 광학계이다. 광검출소자는 편광상태분석기를 통과한 지정된 파장대역의 반사평행빔의 광량을 전압 또는 전류와 같은 값으로 측정하는 역할을 하며, 전산기기(Processor)를 이용하여 이와 같이 측정된 전압 또는 전류 값들로부터 상기 시편의 광물성 값을 계산하여 저장 또는 화면으로 표시할 수 있다. 검출광학계는 편광상태분석기(PSA)와 광검출소자(PDE) 사이의 반사평행빔 축선 상에 배치되는데, 반사평행빔의 편광상태의 변화를 줄 수 있는 광학소자들과 동일한 효과를 갖는 가상적 편광 광학계로서, 광분할기(Beam Splitter)와 분광기(Spectrometer) 내부에 장착되어 있는 반사거울 및 그레이팅(Grating) 등이 포함될 수 있다.

[0006] 상술한 바와 같이 편광상태발생기 또는 편광상태분석기는 각자의 역할을 수행할 수 있도록 복수 개의 회전가능 편광 광소자들이 적절히 배치되는 편광 광학계 형태로 이루어진다. 이 때 상기 회전가능 편광 광소자들 중에서 최소한 1개 이상의 선택된 회전가능 편광 광소자들은 등속으로 회전하고, 상기 등속회전 편광 광소자들을 제외한 나머지 회전가능 편광 광소자들은 고정 편광 광소자로서 측정을 위하여 미리 지정된 방위각으로 이동하여 측정 시 정지되어 있을 수 있다.

[0007] 이러한 회전가능 편광 광소자들의 종류나 배치는 타원계측기의 종류에 따라 적절히 달라질 수 있는데, 구체적으로 상기 회전가능 편광 광소자는 선형편광자(Linear Polarizer)들과 보상기(Compensator)들로 구성될 수 있다. 또한 상기 선형편광자가 상기 편광상태발생기에 배치된 경우에는 편광자(Polarizer)라고 부르고, 상기 편광상태분석기에 배치된 경우에는 검광자(Analyzer)라고 구분하여 부른다. 상기 보상기의 경우에는 상기 편광상태발생기에 배치된 경우에는 입사축보상기로, 상기 편광상태분석기에 배치된 경우에는 반사축보상기로 구분하여 부른다.

- [0008] 종래의 광소자-회전형 타원계측기는 입사각(Angle of Incidence)을 기준으로 볼 때 경사입사 방식과 수직입사 방식으로 구분할 수 있다. 상기 입사각은 시편 면에 수직인 여러 평면들 중에서 입사평행빔과 반사평행빔의 경로를 포함하는 것을 입사면(Incident Plane)이라고 정의하고, 입사면에서 시편 면에 수직인 축을 기준축(Reference Axis)으로 할 때 입사평행빔 또는 반사평행빔과 기준축 간의 내각을 입사각이라 정의하고 ϕ 로 표기한다. 상기 수직입사 방식은 입사각이 0°인 광학구조를 채택한 경우이고, 상기 경사입사 방식은 입사각이 0°가 아닌 광학구조를 채택한 경우이다. 상기 경사입사 방식에 비해서 상기 수직입사 방식의 장점은 측정장치의 크기를 작게 만들 수 있고, 시편 위에 입사되는 빔의 면적을 보다 작게 만들 수 있어 미세한 면적 내부의 측정이 가능하다.
- [0009] 경사입사 또는 수직입사 광소자-회전형 타원계측기의 원리를 간략히 설명하면 다음과 같다. 경사입사 또는 수직입사 광소자-회전형 타원계측기에서는, 광원으로부터 방사된 입사평행빔을 편광상태발생기에 입사시키고, 입사평행빔은 편광상태발생기에 의해 통제될 수 있는 특정한 편광상태로 변화되고, 편광상태로 변조된 입사평행빔은 시편에 조사되어 시편에 의해 편광상태가 변화되어 시편의 물성정보를 가진 반사평행빔이 되고, 반사평행빔은 편광상태분석기에 입사되어 다시 한번 통제될 수 있는 특정한 편광상태로 변화되고, 이러한 일련의 변화를 거친 반사평행빔을 광검출소자를 사용하여 전압 또는 전류와 같은 전기적 신호로 측정되고, 전산기기에 의해 측정된 전기적 신호들로부터 최종적으로 시편의 광물성 정보를 얻어내는 일련의 과정이 이루어지게 된다.
- [0010] 종래의 수직입사 타원계측기에서 편광상태발생기 및 편광상태분석기를 구현함에 있어서, 하나의 선형편광자와 하나의 등속회전보상기만 배치되어 구성된 단일-보상기-회전형 수직입사 타원계측기와 하나의 선형편광자와 2개의 등속회전보상기들로부터만 배치되어 구성된 이중 보상기-회전형 수직입사 타원계측기가 개시된다.
- [0011] **종래의 수직입사 타원계측기의 구성**
- [0012] 도 1을 참조하면, 종래의 수직입사 타원계측기의 한 실시예인 단일 보상기-회전형 수직입사 타원계측기(10)는 광원(11), 광분할기(12, Beam Splitter), 선형편광자(13), 등속회전보상기(14), 분광기(15, Spectrometer), 전산기기(16, Processor)를 포함한다.
- [0013] 도 1의 단일 보상기-회전형 수직입사 타원계측기(10)를 측정원리의 기본구조 측면에서 기술하면 다음과 같다. 광원(11)에서 방사된 입사평행빔(L10a)은 광분할기(12)에 의해 시편(1000) 면에 수직 방향으로 진행하여 (선형편광자(13)로 구현되는) 고정편광자로 입사된다. 고정편광자에 입사된 입사평행빔(L10a)은 고정편광자와 (등속회전보상기(14)로 구현되는) 등속회전입사축보상기를 순차적으로 통과하면서 입사평행빔(L10)의 편광상태가 변조되어 시편(1000)으로 입사된다(L10b). 시편(1000)에 의해 반사된 반사평행빔(L10c)은 (역시 등속회전보상기(14)로 구현되는) 등속회전반사축보상기로 입사되며, 등속회전반사축보상기로 입사된 반사평행빔(L10c)은 등속회전반사축보상기와 (역시 선형편광자(13)로 구현되는) 고정검광자를 순차적으로 통과하면서 다시 편광상태가 변조되어 광분할기(12)에 의해 분광기(15)로 입사된다(L10d). 분광기(15)에 입사된 반사평행빔(L10d)은 각 파장별로 분광되어 분광기(15)에 내재되어 있는 광검출소자에 의해 전기적 디지털 신호 값으로 변환되고, 측정된 디지털 신호 값들은 전산기기(16)에 의해 시편(1000)의 광물성 분석에 사용된다.
- [0014] 도 1의 실시예에서, 검출광학계는 광분할기(12), 분광기(15)에 내재된 반사거울 및 그레이팅(grating) 등을 포함한다. 또한 도 1의 실시예에서, 선형편광자(13)는 고정편광자 뿐만 아니라 고정검광자의 역할도 수행하고, 등속회전보상기(14)는 등속회전입사축보상기 뿐만 아니라 등속회전반사축보상기 역할을 동시에 수행한다. 따라서 경사입사 방식에 비해 측정장치의 크기를 작게 만들 수 있는 장점이 있다.
- [0015] 선형편광자는 주로 MgF_2 , $CaCO_3$, SiO_2 와 같이 복굴절률(Birefringence) 특성을 갖는 결정체를 프리즘 형태로 가공 조립하여 만들어진다. 선형편광자에 입사된 빛의 전기장 성분들 중에서 선형편광자의 투과축 방향의 성분은 투과할 수 있고, 투과축에 수직인 성분은 투과할 수 없기 때문에 투과된 빛은 선편광 상태가 된다. 광활성(Optical Activity)이 없는 프리즘형 선형편광자의 경우에는 파장의 종류에 따라서 투과한 빛의 선형 편광상태가 영향을 받지 않으며, MgF_2 로 만든 로손 방식(Rochon Type)의 선형편광자의 경우에는 150~6,500nm의 광대역 파장 영역에 대해서 사용할 수 있다.
- [0016] 한편, 임의의 편광특성을 갖고 있는 빛이 보상기를 통과할 때, 보상기에 입사된 빛의 전기장 성분들 중에서 빠른 축(fast axis) 방향으로 통과된 성분과 이에 수직인 느린 축(slow axis) 방향으로 통과된 성분들 간의 위상 지연(Phase Retardation) 차이가 90°가 되는, 즉 $\lambda/4$ 파장판의 역할을 하도록 만들어진 경우가 가장 이상적이다. 그러나 다수의 파장들을 사용할 경우에는 현실적으로 이와 같이 보상기를 제작하기에 어려운 문제들이 있다. 구체적으로는, 다수의 파장들에 대해서 실시간 측정을 할 수 있는 보상기가 내재된 분광타원계측기를 만

들기 위해서는 측정파장 영역에 적합한 보상기를 만들어야 하는데, 이러한 제도가 어렵다는 문제가 있다. 또한 각 파장 별로 보상기의 위상지연 값이 다르기 때문에 측정에 사용되기 전에 먼저 교정절차(Calibration Process)를 통하여 위상지연 값들을 찾아내야 하는데, 이러한 교정방법이 매우 복잡하기 때문에 교정절차 과정 중 오차가 발생할 수 있는 문제도 있다.

[0017] 도 2를 참조하면, 종래의 수직입사 타원계측기의 다른 실시예인 이중 보상기-회전형 수직입사 타원계측기(20)는 광원(21), 광분할기(22), 선형편광자(23), 제1등속회전보상기(24a), 제1파장판(24aw, Waveplate), 제1등속회전중공축모터(24am), 제2등속회전보상기(24b), 제2파장판(24bw), 제2등속회전중공축모터(24bm), 분광기(25), 전산기기(26), 차폐용부스(27), 가스공급장치(28)를 포함한다. 이중 보상기-회전형 수직입사 타원계측기(20)는, 단일 보상기-회전형 수직입사 타원계측기(10)와는 달리, 측정 파장영역을 보다 더 넓게 확대하기 위하여 제2등속회전보상기(24b), 제1파장판(24aw) 그리고 제2파장판(24bw) 등을 더 구비한다. 또한, 심자외선(deep UV)의 파장영역보다 작은 파장을 갖는 빛은 측정빔의 경로에 있는 산소와 수분 등에 의해 쉽게 흡수되기 때문에, 이를 방지하기 위해서 차폐용부스(27)로 측정광학계를 차폐하고 가스공급장치(28)를 이용하여 고순도 질소 또는 고순도 아르곤 등의 가스로 측정빔 경로를 채우는 퍼징 시스템(Purging System)을 더 구비한다.

[0018] 도 2의 이중 보상기-회전형 수직입사 타원계측기(20)를 측정원리의 기본구조 측면에서 기술하면 다음과 같다. 광원(21)에서 방사된 입사평행빔(L20a)은 광분할기(22)에 의해 시편(1000) 면에 수직 방향으로 (선형편광자(23)로 구현되는) 고정편광자에 입사된다. 고정편광자에 입사된 입사평행빔(L20a)은 입사광 축 상의 고정편광자, (제1등속회전보상기(24a)로 구현되는) 제1등속회전입사축보상기와 (제2등속회전보상기(24b)로 구현되는) 제2등속회전입사축보상기를 순차적으로 통과하면서 입사평행빔의 편광상태가 변조되어 시편(1000)으로 입사된다(L20b). 시편(1000)에 의해 반사된 반사평행빔(L20c)은 반사광 축 상의 (역시 제2등속회전보상기(24b)로 구현되는) 제1등속회전반사축보상기, (역시 제1등속회전보상기(24a)로 구현되는) 제2등속회전반사축보상기와 (역시 선형편광자(23)로 구현되는) 고정검광자를 순차적으로 통과하면서 다시 반사평행빔의 편광상태가 변조되어 광분할기(22)에 의해 분광기(25)로 입사된다(L20d). 분광기(25)에 입사된 반사평행빔(L20d)은 각 파장별로 분광되어(L20d) 분광기(25)에 내재되어 있는 광검출소자에 의해 전기적 디지털 신호 값으로 변환되고, 측정된 디지털 신호 값들은 전산기기(26)에 의해 시편(1000)의 광물성 분석에 사용된다.

[0019] 도 2의 실시예에서, 선형편광자(23)는 고정편광자 뿐만 아니라 고정검광자의 역할도 수행한다. 또한 도 2의 실시예에서, 제1등속회전보상기(24a)와 제1파장판(24aw)은 제1등속회전입사축보상기 뿐만 아니라 제2등속회전반사축보상기 역할을 수행하고, 도 2의 제2등속회전보상기(24b)와 제2파장판(24bw)은 제2등속회전입사축보상기 뿐만 아니라 제1등속회전반사축보상기 역할을 수행한다. 이와 같은 구성에 의하여 경사입사 방식보다 측정장치의 크기를 작게 만들 수 있는 장점이 있다.

[0020] 그러나 이중 보상기-회전형 수직입사 타원계측기(20)도 역시, 단일 보상기-회전형 수직입사 타원계측기(10)와 마찬가지로, 보상기들과 파장판들의 파장 의존성 때문에 발생하는 제조 및 교정의 복잡성 문제를 여전히 내포하고 있다.

[0021] 요약하자면, 타원계측기는 기본적으로 편광상태생성부(Polarization State Generator; PSG) 및 편광상태분석부(Polarization State Analyzer; PSA)를 포함하여 이루어진다. 종래의 수직입사 타원계측기의 경우, 편광상태생성부 및 편광상태분석부를 구체적으로 실현하는 구성으로서, 하나의 고정 선형편광자 및 1 또는 2개의 등속회전보상기(compensator)를 사용한다. 그런데 이러한 보상기는 상대적 위상지연(relative phase delay)이 파장에 따라서 다른 값을 갖는 파장 의존성이 있기 때문에 장비 교정이 필수적이 되며, 또한 복잡한 교정절차를 수행하는 과정에서 오차가 발생할 수 있는 문제가 있다. 뿐만 아니라 측정의 신뢰성 향상을 위해서 측정파장 영역을 보다 넓게 확장하고자 할 경우, 그에 적합한 보상기를 새롭게 개발해야만 하는 문제 또한 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0022] (특허문헌 0001) 1. 미국특허등록 제7355708호("Normal incidence rotating compensator ellipsometer", 2008.04.08.)

(특허문헌 0002) 2. 미국특허등록 제7889340호("Normal incidence ellipsometer with complementary waveplate rotating compensators ", 2011.02.15.)

비특허문헌

- [0023] (비특허문헌 0001) 1. R.M.A. Azzam, "PIE: Perpendicular-Incidence Ellipsometry ?? Application to the Determination of the Optical Properties of Uniaxial and Biaxial Absorbing Crystals," Opt. Commun. 19, 122 (1976).
- (비특허문헌 0002) 2. R.M.A. Azzam, "NIRSE: Normal-Incidence Rotating-Sample Ellipsometer," Opt. Commun. 20, 405 (1977).
- (비특허문헌 0003) 3. Y. J. Cho, et. al., "Universal Evaluations and Expressions of Measuring Uncertainty for Rotating-Element Spectroscopic Ellipsometers," Opt. Express 23, 15481 (2015).

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0024] 따라서, 본 발명은 상기한 바와 같은 종래 기술의 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로, 본 발명의 목적은 파장 의존성이 있는 보상기를 파장 의존성이 없는 선형편광자로 대체함으로써, 장비 교정절차를 간소화할 수 있게 함과 동시에 측정파장 영역 확장을 용이하게 실현할 수 있도록 해 주는, 수직입사 타원계측기 및 이를 이용한 시편의 광물성 측정 방법을 제공함에 있다.

과제의 해결 수단

- [0025] 상기한 바와 같은 목적을 달성하기 위한 본 발명의 수직입사 타원계측기는, 시준광학계를 포함하여 시편을 향해 입사평행빔을 방사하는 광원; 상기 광원 및 상기 시편 사이에 배치되며, 상기 입사평행빔 일부를 상기 시편 면에 수직 방향으로 향하게 하는 광분할기; 상기 광분할기 및 상기 시편 사이에 배치되며, 기설정된 방위각으로 고정되어 상기 입사평행빔을 기설정된 방향의 선편광 성분만 통과시키는 고정편광자; 상기 고정편광자 및 상기 시편 사이에 배치되며, 등속으로 회전하여 상기 입사평행빔의 편광상태를 등속회전 진동수에 따라 규칙적으로 변조시키는 등속회전편광자; 상기 시편에서 반사된 반사평행빔을 입사받아 분광복사선속의 노광량을 측정하는 광검출소자; 상기 시편 및 상기 광검출소자 사이에 배치되며, 등속으로 회전하여 상기 반사평행빔의 편광상태를 등속회전 진동수에 따라 규칙적으로 변조시키는 등속회전검광자; 상기 등속회전검광자 및 상기 광검출소자 사이에 배치되며, 기설정된 방위각으로 고정되어 상기 반사평행빔의 기설정된 방향의 선편광 성분만 통과시키는 고정검광자; 상기 고정편광자 및 상기 고정검광자의 방위각, 상기 등속회전편광자 및 상기 등속회전검광자의 등속회전각속도를 제어하며, 상기 광검출소자에서 측정된 분광복사선속의 노광량 값을 분석하여 상기 시편의 광물성을 산출하는 전산기기; 를 포함하며, 상기 고정편광자 및 상기 고정검광자가 하나의 선형편광자로서 일체로 이루어지고, 상기 등속회전편광자 및 상기 등속회전검광자가 하나의 등속회전선형편광자로서 일체로 이루어질 수 있다.
- [0026] 이 때 상기 수직입사 타원계측기는, 상기 광분할기, 상기 고정편광자 및 상기 고정검광자가 하나의 광분할선형편광자로서 일체로 이루어질 수 있다. 또한 이 때 상기 광분할선형편광자는, 윌라스턴 프리즘(Wollaston Prism)일 수 있다.
- [0027] 또한 상기 광검출소자는, 화소들이 선형 또는 2차원 평면 구조로 배열된 CCD, CMOS 또는 포토다이오드 어레이 소자를 포함하는 분광기에서 각각 지정된 파장 대역에 대한 화소 또는 비닝된 화소들 중에서 선택되는 적어도 하나일 수 있다. 또한 이 때 상기 광검출소자는, 하나의 분광기이거나 또는 s-편광분광기 및 p-편광분광기로 이루어지는 분광기 세트에서 각각 지정된 파장 대역에 대한 화소 또는 비닝된 화소들 중에서 선택되는 적어도 하나일 수 있다.
- [0028] 또는 상기 광검출소자는, 상기 광원이 단일 파장의 광원장치일 경우, PMT 및 포토다이오드를 포함하는 단일점 광검출기일 수 있다. 상기 단일 파장의 광원장치는 가스 레이저, 레이저 다이오드 중 선택되는 적어도 하나일 수 있다.
- [0029] 또는 상기 광검출소자는, 지정된 파장 대역의 빛을 투과시키는 색필터들(color filters)들과 화소들이 2차원 평면 구조로 배열된 CCD 또는 CMOS를 포함하는 이미징 광검출기에서 선택된 하나의 화소일 수 있다.

- [0030] 또한 상기 수직입사 타원계측기는, 상기 고정편광자 및 상기 고정검광자에 방위각 조절을 위한 중공축스테핑모터가 구비되고, 상기 등속회전편광자 및 상기 등속회전검광자의 등속회전각속도 조절을 위한 등속회전중공축모터가 구비될 수 있다.
- [0031] 또한 상기 전산기기는, 상기 광검출소자로부터 측정된 광의 분광복사선속의 노광량 값들로부터 분광복사선속 파형에 대한 푸리에계수 값들을 계산하고, 상기 푸리에계수 값들로부터 상기 시편의 물리-행렬성분 값들을 계산하며, 상기 물리-행렬성분 값들로부터 상기 시편의 광물성 값들을 분석 및 산출하는 연산부, 상기 고정편광자 및 상기 고정검광자의 방위각을 중공축스테핑모터를 사용하여 원격 제어하고, 상기 등속회전편광자 및 상기 등속회전검광자의 등속회전각속도를 등속회전중공축모터를 사용하여 원격 제어하는 제어부, 상기 분광복사선속의 노광량 값인 측정값, 상기 푸리에계수 값 및 상기 물리-행렬성분 값인 계산값, 상기 시편의 광물성 값인 분석값을 저장하는 저장부, 상기 측정값, 상기 계산값, 상기 분석값을 출력하는 출력부를 포함할 수 있다.
- [0032] 또한 상기 광원은, 제논(Xenon) 램프, 텅스텐(Tungsten)-할로젠(Halogen) 램프, 듀테륨(Deuterium) 램프, 레이저로 구동되는 광원(Laser Driven Light Source), 가스 레이저, 레이저 다이오드 중 선택되는 적어도 하나이거나, 또는 이들에서 방사된 광을 광섬유를 통하여 전달될 수 있다.
- [0033] 또한 상기 수직입사 타원계측기는, 광경로를 외부 대기와 차폐하는 차폐용부스; 상기 차폐용부스에 연결되어 비활성 가스를 공급하는 가스공급장치;를 포함할 수 있다. 이 때 상기 비활성 가스는, 질소 가스 또는 아르곤 가스일 수 있다.
- [0034] 또한 상기 수직입사 타원계측기는, 상기 등속회전편광자 및 상기 시편 사이에 배치되며, 상기 시편의 국소 영역에 초점이 맺히도록 상기 입사평행빔을 수렴시키는 초점광학계;를 포함할 수 있다. 이 때 상기 초점광학계는, 광대역 파장에 대한 색수차 보정을 위하여, 적어도 하나의 거울, 적어도 하나의 렌즈, 또는 적어도 하나의 거울 및 적어도 하나의 렌즈의 세트 중 선택되는 하나일 수 있다. 또한 이 때 상기 초점광학계는, 투과 또는 반사 효율 향상을 위하여, 상기 거울 또는 상기 렌즈에 단일 박막 또는 다층 박막이 코팅될 수 있다.
- [0035] 또한 상기 수직입사 타원계측기는, 복수 개의 상기 시편을 수용 및 보관하는 시편보관용기, 상기 시편보관용기로부터 복수 개의 상기 시편을 기설정된 규칙에 따라 순차적으로 하나씩 꺼내어 상기 수직입사 타원계측기의 시편받침대에 배치시키고 측정 완료된 상기 시편을 상기 시편보관용기의 원래 위치로 복귀시키는 시편운반장치를 포함하는 시편운반시스템;을 포함할 수 있다.
- [0036] 또한 상기 수직입사 타원계측기는, 시편 정렬용 광을 방사하는 정렬용레이저, 상기 레이저에서 방사되는 광을 상기 시편에 기설정된 방향으로 입사시키는 정렬용광학계, 상기 시편에 입사되어 반사된 광을 수광하여 상기 시편의 위치를 판별하는 정렬용광검출기를 포함하는 시편정렬시스템;을 포함할 수 있다.
- [0037] 또한 상기 수직입사 타원계측기는, 측정환경의 진동에 의한 영향을 방지하도록, 상기 수직입사 타원계측기 하부에 구비되는 제진시스템;을 포함할 수 있다.
- [0038] 또한 상기 수직입사 타원계측기는, 온도변화에 따른 측정오차 발생을 방지하도록, 측정환경 온도를 유지하거나 냉각하는 항온장치 또는 냉각장치;를 포함할 수 있다.
- [0039] 또한 본 발명의 수직입사 타원계측기를 이용한 시편의 광물성 측정 방법은, 상술한 바와 같은 수직입사 타원계측기를 이용한 시편의 광물성 측정 방법에 있어서, 광물성을 측정하고자 하는 상기 시편이 상기 수직입사 타원계측기의 시편받침대에 장착 및 정렬되는 시편장착단계; 상기 전산기기에 의하여, 상기 고정편광자 및 상기 고정검광자의 방위각 값이 선택되는 방위각선택단계; 상기 전산기기에 의하여, 상기 고정편광자 및 상기 고정검광자를 설정방위각으로 이동시키는 방위각이동단계; 상기 광검출소자에 의하여, 상기 등속회전편광자 및 상기 등속회전검광자의 방위각 변화에 따른 상기 반사평행빔의 분광복사선속의 노광량 값이 측정되는 노광량측정단계; 상기 전산기기에 의하여, 상기 분광복사선속의 노광량 값들로부터 분광복사선속 파형의 푸리에계수 값들이 계산되는 푸리에계수계산단계; 상기 전산기기에 의하여, 상기 푸리에계수 값들로부터 상기 시편의 물리-행렬성분 값들이 계산되는 물리행렬성분계산단계; 상기 전산기기에 의하여, 상기 물리-행렬성분 값들로부터 상기 시편의 광물성 값들이 분석 및 산출되는 시편광물성분석단계;를 포함할 수 있다.
- [0040] 이 때 상기 광물성은, 계면특성, 박막두께, 복소굴절률, 나노형상, 비등방특성, 표면거칠기, 조성비, 결정성 중 선택되는 적어도 하나일 수 있다.

발명의 효과

[0041] 본 발명에 의하면, 수직입사 타원계측기를 구성함에 있어서 편광상태를 분석하는 장치로서 파장 의존성이 없는 선형편광자를 사용함으로써, 종래에 파장 의존성이 있는 보상기를 사용함으로써 발생하던 여러 문제를 일시에 해소하는 큰 효과가 있다. 보다 구체적으로는, 본 발명에 의하면 파장 의존성의 배제로 인하여 장비 교정절차를 간소화할 수 있게 하는 효과가 있으며, 이에 따라 복잡한 장비 교정절차에서 발생하는 오차 발생 역시 크게 축소할 수 있는 효과가 있다. 또한 종래에는 측정파장 영역을 확장하려면 그에 적합한 보상기를 새롭게 개발하여야 했으나 본 발명에 의하면 그럴 필요가 없기 때문에 측정파장 영역 확장이 훨씬 자유롭다는 효과가 있다. 또한 본 발명에 의하면, 측정파장 영역을 확장함에 따라 궁극적으로는 수직입사 타원계측기의 측정 신뢰성을 향상하는 효과를 얻을 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0042] 도 1은 종래의 단일 보상기-회전형 수직입사 타원계측기의 개략도.
 도 2는 종래의 이중 보상기-회전형 수직입사 타원계측기의 개략도.
 도 3는 본 발명의 제1실시예에 따른 선형편광자-회전형 수직입사 타원계측기의 개략도.
 도 4는 본 발명의 제2실시예에 따른 선형편광자-회전형 수직입사 타원계측기의 개략도.
 도 5는 본 발명의 제3실시예에 따른 선형편광자-회전형 수직입사 타원계측기의 개략도.
 도 6는 본 발명의 선형편광자-회전형 수직입사 타원계측기를 이용한 시편의 광물성 측정 방법을 나타내는 순서도.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0043] 이하, 상기한 바와 같은 구성을 가지는 본 발명에 의한 수직입사 타원계측기 및 이를 이용한 시편의 광물성 측정 방법을 첨부된 도면을 참고하여 상세하게 설명한다.

[0044] 본 발명의 수직입사 타원계측기의 기본 구성

[0045] 본 발명에서는, 파장 의존성이 있는 보상기를 파장 의존성이 없는 선형편광자로 대체함으로써 상술한 바와 같은 종래의 문제점들을 해소한다. 본 발명의 수직입사 타원계측기의 여러 실시예들이 도 3 내지 도 5에 도시되어 있으며, 각각의 실시예에 대해서는 이후 보다 상세히 설명한다. 본 발명의 수직입사 타원계측기는, 기본적으로 광원, 광분할기, 고정편광자, 등속회전편광자, 광검출소자, 등속회전검광자, 고정검광자, 전산기기를 포함한다. 각부에 대하여 설명하면 다음과 같다.

[0046] 상기 광원(Light Source)은, 시준광학계(Collimator)를 포함하여 시편을 향해 입사평행빔(Incident Collimated Beam)을 방사하는 역할을 한다. 이 때 상기 광원은 제논(Xenon) 램프, 텅스텐(Tungsten)-할로겐(Halogen) 램프, 듀테륨(Deuterium) 램프, 레이저로 구동되는 광원(Laser Driven Light Source), 가스 레이저, 레이저 다이오드 중 선택되는 적어도 하나이거나, 또는 이들에서 방사된 광을 광섬유를 통하여 전달되는 것일 수 있다.

[0047] 상기 광분할기(Beam Splitter)는, 상기 광원 및 상기 시편 사이에 배치되며, 상기 입사평행빔 일부를 상기 시편면에 수직 방향으로 향하게 하는 역할을 한다.

[0048] 상기 고정편광자(Fixed Polarizer)는, 상기 광분할기 및 상기 시편 사이에 배치되며, 기설정된 방위각으로 고정되어 상기 입사평행빔을 기설정된 방향의 선편광 성분만 통과시키는 역할을 한다. 이 때 상기 고정편광자의 방위각은 항상 고정되어 있는 것은 아니며, 상기 시편을 측정하고자 할 때 원하는 방위각으로 조절할 수 있도록 상기 고정편광자 자체는 이동 가능하게 이루어지되, 측정 시에는 고정되어 있기 때문에 '고정'이라는 용어가 사용되는 것이다. 이 때 상기 고정편광자의 방위각 조절을 위하여, 상기 고정편광자에는 중공축스테핑모터가 구비될 수 있다.

[0049] 상기 등속회전편광자(Constantly Rotating Polarizer)는, 상기 고정편광자 및 상기 시편 사이에 배치되며, 등속으로 회전하여 상기 입사평행빔의 편광상태를 등속회전 진동수에 따라 규칙적으로 변조시키는 역할을 한다. 이 때 상기 등속회전편광자의 등속회전각속도 조절을 위하여, 상기 등속회전편광자에는 등속회전중공축모터가 구비될 수 있다.

[0050] 상기 광검출소자는, 상기 시편에서 반사된 반사평행빔(Reflected Collimated Beam)을 입사받아 분광복사선속(Spectral Radiant Flux)의 노광량을 측정하는 역할을 한다. 이 때 상기 광검출소자는, 화소들이 선형 또는 2차

원 평면 구조로 배열된 CCD, CMOS 또는 포토다이오드 어레이 소자를 포함하는 분광기에서 각각 지정된 파장 대역에 대한 화소 또는 비닝된 화소들 중에서 선택되는 적어도 하나일 수 있다. 또한 이 때 상기 광검출소자는, 하나의 분광기이거나 또는 s-편광분광기 및 p-편광분광기로 이루어지는 분광기 세트에서 각각 지정된 파장 대역에 대한 화소 또는 비닝된 화소들 중에서 선택되는 적어도 하나일 수 있다.

[0051] 부연하여 설명하자면, 상기 광원이 백색광을 사용하는 경우 광을 검출하기 위한 수단으로서 분광기를 사용할 수 있는데, 실질적으로 광을 검출하는 것은 분광기 내에 구비된 광 디텍터 어레이에서의 각 화소 또는 각 비닝된 화소군이 된다. 즉 분광기 자체라기보다는 각 화소 또는 각 비닝된 화소군이 하나의 광검출소자 역할을 하게 되는 것이라고 이해하면 된다.

[0052] 또는 상기 광검출소자는, 상기 광원이 단일 파장의 광원장치일 경우, PMT 및 포토다이오드를 포함하는 단일점 광검출기일 수 있다. 상기 단일 파장의 광원장치는 가스 레이저, 레이저 다이오드 중 선택되는 적어도 하나일 수 있다. 또는 상기 광검출소자는, 화소들이 2차원 평면 구조로 배열된 CCD 또는 CMOS를 포함하는 이미징 광검출기에서 선택된 하나의 화소일 수 있다. 이 때, 상기 광원이 단일 파장의 광원장치인 경우라면 다른 부품이 더 필요하지 않겠으나, 상기 광원이 복수 파장의 다파장 광원장치인 경우라면 상기 광원 및 (상기 CCD 또는 CMOS를 포함하는 이미징 광검출기의 화소로 이루어지는) 상기 광검출소자 사이에 지정된 파장 대역의 빛을 투과시키는 색필터들(color filters)이 더 구비될 수 있다.

[0053] 상기 광검출소자는 외부 트리거가 전달되기 전에는 대기상태를 유지하다가 외부트리거가 전달되면 측정을 수행하게 되는데, 상기 광검출소자가 분광기의 CCD, CMOS 또는 포토다이오드 어레이와 같은 적분형 광검출기에서 선택된 하나의 화소 또는 비닝된 화소들(pixel binning)인 경우 각 광검출소자별로 지정된 적분시간 동안 노광량 값을 출력하거나 임시로 저장하는 방식으로 작동하며, 상기 광검출소자가 PMT 및 포토다이오드를 포함하는 광검출기와 같은 비적분형 광검출기인 경우 매우 짧은 적분시간 동안의 노광량 값, 즉 근사적으로 광의 분광복사선속 값을 출력하거나 임시로 저장하는 방식으로 작동할 수 있다.

[0054] 상기 등속회전검광자(Constantly Rotating Analyzer)는, 상기 시편 및 상기 광검출소자 사이에 배치되며, 등속으로 회전하여 상기 반사평행빔의 편광상태를 등속회전 진동수에 따라 규칙적으로 변조시키는 역할을 한다. 여기에서 상기 등속회전검광자가 앞서의 상기 등속회전편광자와 역할이 다르기 때문에 별개의 명칭이 사용되었는데, 앞서도 설명한 바와 같이 경사입사 방식의 경우에는 실제로도 각각이 별개의 부품으로 구현되지만, 수직입사 방식의 경우에는 실질적으로는 하나의 부품으로 구현될 수 있다(이와 같이 함으로써 경사입사 방식보다 수직입사 방식의 타원계측기가 장치를 더욱 소형화할 수 있다는 점에 대해서 앞서 설명하였다). 즉 본 발명에서, 상기 등속회전편광자 및 상기 등속회전검광자는, 하나의 등속회전선형편광자로서 일체로 이루어진다.

[0055] 상기 고정검광자(Fixed Analyzer)는, 상기 등속회전검광자 및 상기 광검출소자 사이에 배치되며, 기설정된 방위각으로 고정되어 상기 반사평행빔의 기설정된 방향의 선편광 성분만 통과시키는 역할을 한다. 상기 고정검광자 역시 상기 고정편광자와 마찬가지로, 상기 고정검광자 자체는 이동 가능하게 이루어지되, 측정 시에는 고정되어 있기 때문에 '고정'이라는 용어가 사용된다. 또한, 상기 등속회전편광자-상기 등속회전검광자와 마찬가지로, 상기 고정편광자 및 상기 고정검광자는, 하나의 선형편광자로서 일체로 이루어진다. 더 나아가서, 더욱 장치를 소형화 및 집적화할 수 있도록, 상기 광분할기, 상기 고정편광자 및 상기 고정검광자가 하나의 광분할선형편광자로서 일체로 이루어지게 할 수도 있다. 이 경우 상기 광분할선형편광자는, 윌라스톤 프리즘(Wollaston prism)으로 이루어질 수 있다.

[0056] 상기 전산기기(Processor)는, 상기 고정편광자 및 상기 고정검광자의 방위각, 상기 등속회전편광자 및 상기 등속회전검광자의 등속회전각속도를 제어하며, 상기 광검출소자에서 측정된 분광복사선속(Spectral Radiant Flux)의 노광량 값을 분석하여 상기 시편의 광물성을 산출하는 역할을 한다. 보다 구체적으로는, 상기 전산기기는 다양한 연산을 수행하는 연산부와, 상술한 여러 부품들의 구동을 제어하는 제어부와, 연산에 필요한 값들을 저장하는 저장부와, 분석 결과를 출력하는 출력부를 포함한다. 상기 연산부는, 상기 광검출소자로부터 측정된 광의 분광복사선속(Spectral Radiant Flux)의 노광량 값들로부터 분광복사선속 파형에 대한 푸리에계수(Fourier Coefficient) 값들을 계산하고, 상기 푸리에계수 값들로부터 상기 시편의 뮐러-행렬(Mueller Matrix)성분 값들을 계산하며, 상기 뮐러-행렬성분 값들로부터 상기 시편의 광물성 값들을 분석 및 산출할 수 있다. 상기 제어부는, 상기 고정편광자 및 상기 고정검광자의 방위각을 중공축스테핑모터(Hollow Shaft Stepping Motor)를 사용하여 원격 제어하고, 상기 등속회전편광자 및 상기 등속회전검광자의 등속회전각속도(Angular Velocity)를 등속회전중공축모터를 사용하여 원격 제어할 수 있다. 상기 저장부는, 상기 연산부에서 수행하는 연산에 필요한 값들, 즉 상기 광검출소자로부터 측정된 노광량 값(측정값), 분광복사선속 파형에 대한 푸리에계수 값 및 상기 시편의

물러-행렬성분 값(계산값), 상기 시편의 광물성 값(분석값)을 저장한다. 상기 출력부는, 모니터, 인쇄장치 등을 통하여 상기 측정값, 상기 계산값, 상기 분석값을 화면 또는 인쇄물 등 사용자가 원하는 형태로 출력한다.

[0057] 더불어 본 발명의 수직입사 타원계측기는, 광경로를 외부 대기와 차폐하는 차폐용부스 및 상기 차폐용부스에 연결되어 질소 가스, 아르곤 가스 등과 같은 비활성 가스를 공급하는 가스공급장치를 더 포함할 수 있다. 이와 같이 함으로써 앞서 설명한 바와 같이 수분, 산소 등에 의해 특정 파장의 빛이 흡수되는 문제를 효과적으로 방지하고, 궁극적으로는 측정 파장영역을 원활하게 확장할 수 있다.

[0058] 이와 같은 구성으로 이루어지는 본 발명의 수직입사 타원계측기는, 도 1 또는 도 2에 도시된 종래의 타원계측기와는 달리, 등속회전보상기를 등속회전선형편광자로 대체하였다. 종래의 타원계측기에서 사용되는 보상기는, 앞서 설명한 바와 같이 파장별로 보상기의 위상 지연 값이 달라지는 파장 의존성을 가지고 있으며, 이에 따라 복잡한 교정절차를 필요로 하며 이러한 교정절차 수행 중 오차가 발생하는 문제가 있었다. 그러나 본 발명에 의하면 보상기 자체를 제거하고 파장 의존성이 없는 선형편광자로 대체함으로써, 이러한 교정절차 자체를 크게 간소화할 수 있게 해 주며, 물론 그에 따른 오차 발생 문제 역시 원천적으로 배제할 수 있다.

[0059] 구체적으로, 본 발명의 수직입사 타원계측기에서, 상기 선형편광자(상기 고정편광자 및 상기 고정검광자 역할)는, 입사평행빔 축선 상에서는 광원과 광분할기에 의해 발생할 수 있는 편광상태 오차를, 반사평행빔 축선 상에서는 광분할기와 검출광학계에 의해 발생할 수 있는 편광상태 오차를 제거하는 역할을 한다. 또한 상기 등속회전선형편광자(상기 등속회전편광자 및 상기 등속회전검광자 역할)는, 입사평행빔과 반사평행빔의 편광상태를 등속회전 진동수에 따라서 규칙적으로 변조하는 역할을 한다. 이처럼 본 발명의 수직입사 타원계측기에서는 파장 의존성이 있는 편광 광학소자를 사용하지 않으므로, 장비 교정절차가 매우 간편하여 장비들 간의 매칭이 쉽고, 측정 신뢰도 향상을 위하여 측정파장 영역을 광대역으로 쉽게 확장할 수 있다.

[0060] 본 발명의 수직입사 타원계측기의 부가 구성

[0061] 본 발명의 수직입사 타원계측기는, 측정 정확성 및 사용자 편의성 향상을 위해 초점광학계, 시편운반시스템, 시편정렬시스템, 제진시스템, 항온장치 또는 냉각장치 등과 같은 부가 구성을 더 포함할 수 있다.

[0062] 상기 수직입사 타원계측기가 반도체 산업과 같은 분야에 사용될 경우, 시편에서 측정하고자 하는 영역의 크기가 수십 마이크로미터 정도로 매우 작기 때문에, 입사광이 시편의 국소 영역에 원활하게 초점을 맺도록 하기 위하여 상기 초점광학계가 시편의 앞 경로에 선택적으로 구비될 수 있다. 즉 상기 초점광학계는, 상기 등속회전편광자 및 상기 시편 사이에 배치되며, 상기 시편의 국소 영역에 초점이 맺히도록 상기 입사평행빔을 수렴시키는 역할을 한다. 구체적으로는, 상기 초점광학계는, 광대역 파장에 대한 색수차 보정을 위하여, 적어도 하나의 거울, 적어도 하나의 렌즈, 또는 적어도 하나의 거울 및 적어도 하나의 렌즈의 세트 중 선택되는 하나로 이루어질 수 있다. 이 때 투과 또는 반사 효율 향상을 위하여, 상기 거울 또는 상기 렌즈에 단일 박막 또는 다층 박막이 코팅되도록 이루어지는 것이 바람직하다.

[0063] 한편 이처럼 반도체 산업 현장에서 상기 수직입사 타원계측기가 사용되는 경우, 다수의 웨이퍼 시편들을 빠른 시간 내에 측정을 하는 것이 중요하며, 이를 위하여 상기 시편운반시스템이 구비될 수 있다. 구체적으로는, 상기 시편운반시스템은, 복수 개의 상기 시편을 수용 및 보관하는 시편보관용기, 상기 시편보관용기로부터 복수 개의 상기 시편을 기설정된 규칙에 따라 순차적으로 하나씩 꺼내어 상기 수직입사 타원계측기의 시편받침대에 배치시키고 측정 완료된 상기 시편을 상기 시편보관용기의 원래 위치로 복귀시키는 시편운반장치를 포함할 수 있다. 이 때 상기 시편받침대는, 시편의 자유로운 정렬 및 측정 위치 변경이 원활하게 이루어질 수 있도록, 높이 및 좌우의 3자유도의 평행이동, 2자유도를 갖는 기울기 조절 및 회전기능을 포함하는 6 자유도 시스템으로 이루어질 수 있다.

[0064] 또한 이와 같이 빠른 시간 내에 측정하는 과정에서 시편의 정렬 역시 보다 정확하고 신속하게 이루어질 수 있도록 하기 위하여 상기 시편정렬시스템이 구비될 수 있다. 구체적으로는, 상기 시편정렬시스템은, 시편 정렬용 광을 방사하는 정렬용레이저, 상기 레이저에서 방사되는 광을 상기 시편에 기설정된 방향으로 입사시키는 정렬용광학계, 상기 시편에 입사되어 반사된 광을 수광하여 상기 시편의 위치를 판별하는 정렬용광검출기를 포함할 수 있다.

[0065] 더불어 측정환경의 진동에 의한 영향을 방지하도록, 상기 제진시스템이 상기 수직입사 타원계측기 하부에 구비될 수 있다. 또한 온도변화에 따른 측정오차 발생을 방지하도록, 상기 광원, 상기 편광 광소자들, 상기 시편, 그리고 상기 광검출소자에 상기 항온장치가 구비되어 측정환경 온도를 유지하거나, 또는 상기 광검출소자에 상기 냉각장치가 구비되어 냉각하도록 하는 것이 바람직하다.

[0066] **본 발명의 수직입사 타원계측기의 여러 실시예**

[0067] 도 3는 본 발명의 제1실시예에 따른 선형편광자-회전형 수직입사 타원계측기의 개략도를 도시하고 있다. 본 발명 제1실시예의 선형편광자-회전형 수직입사 타원계측기(100)는, 광원(101), 광분할기(102), 선형편광자(103), 중공축스테핑모터(103m), 등속회전선형편광자(104), 등속회전중공축모터(104m), 광검출소자(105), 전산기기(106)를 포함한다. 제1실시예에서, 기본 구성 설명에서의 상기 선형편광자(103)는 상기 고정편광자 및 상기 고정검광자 역할을 모두 하게 되며, 상기 등속회전선형편광자(104)는 상기 등속회전편광자 및 상기 등속회전검광자 역할을 모두 하게 된다.

[0068] 더불어 제1실시예의 수직입사 타원계측기(100)는, 앞서 설명한 바와 같이, 측정 파장영역 확장을 위한 차폐용부스(107), 가스공급장치(108)를 포함할 수 있으며, 또한 시편(1000)의 국소 영역에 원활하게 초점을 맞출 수 있도록 하는 초점광학계(109)를 포함할 수 있다.

[0069] 도 4는 본 발명의 제2실시예에 따른 선형편광자-회전형 수직입사 타원계측기의 개략도를 도시하고 있다. 본 발명 제2실시예의 선형편광자-회전형 수직입사 타원계측기(200)는, 광원(201), 광분할선형편광자(203), 등속회전선형편광자(204), 등속회전중공축모터(204m), 광검출소자(205), 전산기기(206)를 포함한다. 제2실시예에서, 상기 광분할선형편광자(203)는 기본 구성 설명에서의 상기 광분할기, 상기 고정편광자 및 상기 고정검광자 역할을 모두 하게 됨으로써 장비를 더욱 소형화 및 집적화할 수 있다.

[0070] 도 4에는 차폐용부스, 가스공급장치, 초점광학계 등이 도시되지 않았으나, 물론 도 4의 제2실시예(및 이후 설명될 도 5의 제3실시예)에도 이러한 구성들을 부가적으로 구비하는 것이 가능함은 물론이다.

[0071] 도 5는 본 발명의 제3실시예에 따른 선형편광자-회전형 수직입사 타원계측기의 개략도를 도시하고 있다. 본 발명 제1실시예의 선형편광자-회전형 수직입사 타원계측기(300)는, 광원(301), 광분할기(302), 광분할선형편광자(303), 등속회전선형편광자(304), 등속회전중공축모터(304m), s-편광광검출소자(305s), p-편광광검출소자(305p), 전산기기(306)를 포함한다. 제3실시예에서, 상기 s-편광광검출소자(305s) 및 상기 p-편광광검출소자(305p)가 기본 구성 설명에서의 상기 광검출소자 역할을 하게 된다. 한편 제3실시예에서, 상기 광분할선형편광자(303)는 기본 구성 설명에서의 상기 광분할기, 상기 고정편광자 및 상기 고정검광자 역할을 모두 하게 된다. 이 때 상기 광분할기(302)는, 도 5로부터 알 수 있는 바와 같이, 상기 광원(301)에서 방사되는 광을 시편(1000) 쪽으로 향하는 광경로를 형성하기 위해 더 구비되는 것이다.

[0072] 더불어, 본 발명의 선형편광자-회전형 수직입사 타원계측기에서 편광소자의 등속회전중공축모터에 의한 등속회전선형편광자의 회전은 등속회전 또는 스텝회전 중에 선택된 하나일 수 있다.

[0073] **본 발명의 수직입사 타원계측기를 이용한 시편의 광물성 측정 원리**

[0074] 상술한 바와 같이 이루어지는 본 발명의 수직입사 타원계측기를 이용한 시편의 광물성 측정 원리를 상세히 설명하면 다음과 같다. 본 발명의 수직입사 타원계측기에서 사용되는 고정편광자, 등속회전편광자, 등속회전검광자 및 고정검광자에 대한 각각의 방위각은 고정편광자에서 선형편광자의 투과축, 등속회전편광자에서 선형편광자의 투과축, 등속회전검광자에서 선형편광자의 투과축, 고정검광자에서 선형편광자의 투과축의 위치를 임의로 선정된 기준축의 위치를 기준으로 하여 각각 P , P_r , A_r , A 로 기술한다.

[0075] 주기가 $T(=2\pi/\omega)$ 인 임의의 분광복사선속 파형 함수 $I_{ex}(t)$ 는 시간(t)의 함수로 다음의 식으로 표시된다.

[0076]
$$I_{ex}(t) = I'_0 + \sum_{n=1}^{N_{ho}} [A'_n \cos(n\omega t) + B'_n \sin(n\omega t)] \quad (1)$$

[0077] 여기서 분광복사선속 파형의 푸리에계수(Fourier Coefficient) 성분들 중에서 직류(dc) 성분 I'_0 , 분광복사선속 파형의 푸리에계수 성분들 중에서 교류(ac) 성분들 (A'_n, B'_n) 및 등속회전편광의 각속도 ω , N_{ho} 는 0이 아닌 푸리에계수 성분들 중에서 가장 큰 인덱스의 값이다.

[0078] 따라서, 오류가 없는 이상적인 상기 선형편광자-회전형 수직입사 타원계측기들에서 시간 t일 때에 광검출소자에 의해 측정되는 준단색 파장(Polychromatic Wavelength)에서의 분광복사선속 값은 다음의 일반적인 파형에 대한 식으로 표시 할 수 있다.

$$I(t) = I'_0 + \sum_{n=1}^{N_{ho}} [A'_n \cos(n\omega t) + B'_n \sin(n\omega t)] \quad (2)$$

여기에서 I'_0 는 푸리에계수의 직류 성분이며, A'_n and B'_n 는 푸리에계수의 교류 성분들이고, $\omega (=2\pi/T)$ 는 등속으로 회전하는 등속회전선형편광자의 각속도이며, N_{ho} 는 0이 아닌 푸리에계수의 교류 성분들 중에서 최상위 인덱스 값이다.

상기 선형편광자-회전형 수직입사 타원계측기들에서는 광검출소자를 이용하여 분광복사선속 파형의 푸리에계수를 정확히 측정하는 것은 매우 중요하다. 최첨단 실시간 분광타원계측기들에서는 높은 정밀도의 실시간 측정을 위해 푸리에계수의 스펙트럼을 가능한 한 빨리 수집할 수 있는 CCD(Charge coupled Device) 또는 PD 어레이(Photo Diode array)를 광 검출기로 사용하고 있다. CCD 또는 PD 어레이의 각 화소 또는 각 비닝(binning) 화소 군들은 상기 하나의 광검출소자로서의 역할을 하고 있다. CCD 또는 PD 어레이의 출력 신호는 분광복사선속 뿐만 아니라 적분 시간에 비례하기 때문에 적분형 광검출기라고 부른다.

CCD 또는 PD 어레이의 데이터 측정과정은 프레임 획득과 프레임 읽기과정으로 분류할 수 있으며 측정 주기, 즉 등속으로 회전하는 등속회전 광소자 시스템에서는 등속회전 각속도에 의한 1회전당, 즉 등속회전 각속도에 대한 회전주기 $T(=2\pi/\omega)$ 마다 하나의 기준 펄스가 발생되고, T/J 의 등간격으로 J 개의 등시간 펄스들이 발생될 수 있다. 기준펄스는 타원계측기에서 측정의 시작을 알리는 기준 시각이고, 등시간 펄스는 CCD 또는 PD 어레이의 데이터 측정을 위한 외부 트리거로 전달될 수 있다. 등시간 펄스가 CCD 또는 PD 어레이에 외부 트리거로 전달된 후, 주기 T 의 시간 동안에 CCD 또는 PD 어레이의 데이터 측정의 세부과정은 다음과 같이 일련의 순서대로 진행될 수 있다. CCD 또는 PD 어레이의 각 화소 또는 각 비닝(binning) 화소 군들 중에서 하나의 광검출소자가 등시간 펄스를 외부 트리거로 받은 후 노광을 시작하기 전에 T_d 동안의 시간 지연이 있는 후, 적분시간 T_i 동안의 입사된 광의 광자들을 광전자로 저장하는 노광량 측정 과정을 거치고, 그 후에 측정된 노광량을 전기적 신호로 변환하기 위해 프레임 취득 과정이 진행되고 나면, 다음 등시간 펄스를 받기 위해 기다리는 대기시간으로 구성된다. 따라서 상기 측정된 노광량 데이터는 다음 파형의 적분으로 기술된다.

$$S_j = \int_{(j-1)T/J+T_d}^{(j-1)T/J+T_d+T_i} I(t)dt, \quad (j=1, \dots, J) \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)으로부터 측정된 노광량 식은 다음과 같은 형태로 유도된다.

$$S_j = T_i I'_0 + \sum_{n=1}^{N_{ho}} \frac{T_i}{\xi_n} \sin \xi_n \cos \left[\frac{2n\pi(j-1)}{J} \right] \left\{ A'_n \cos \left[\xi_n \left(1 + \frac{2T_d}{T_i} \right) \right] + B'_n \sin \left[\xi_n \left(1 + \frac{2T_d}{T_i} \right) \right] \right\} \\ - \sum_{n=1}^{N_{ho}} \frac{T_i}{\xi_n} \sin \xi_n \sin \left[\frac{2n\pi(j-1)}{J} \right] \left\{ A'_n \sin \left[\xi_n \left(1 + \frac{2T_d}{T_i} \right) \right] - B'_n \cos \left[\xi_n \left(1 + \frac{2T_d}{T_i} \right) \right] \right\}. \quad (4)$$

여기서 $\xi_n = n\pi T_i / T$ 이다. 식 (4)에서 주기 T 시간 동안에 측정된 J 개의 노광량 세트는 식 (2)의 $2N_{ho}+1$ 개의 미지의 푸리에계수들로 구성된 선형 방정식의 그룹을 형성하기 때문에 $\mathbf{S} = \mathbf{\Xi} \mathbf{X}'$ 와 같이 간단히 표기할 수 있다. 여기서 노광량을 나타내는 $\mathbf{S} = (S_1, \dots, S_J)^T$ 와 푸리에계수를 표현한 $\mathbf{X}' = (I'_0, A'_1, B'_1, \dots, A'_{N_{ho}}, B'_{N_{ho}})^T$ 는 열 벡터(column vector)이고, $\mathbf{\Xi}$ 는 J -by- $(2N_{ho}+1)$ 의 계수 행렬이다. 만약에 J 가 $\{J \geq 2N_{ho}+1, \text{ for odd } J\}$ 와 $\{J \geq 4N_{ho}+2, \text{ for even } J\}$ 의 정수집합들에 대한 합집합의 원소들 중에 하나인 경우에는 최소 자승법(Least Squares Analysis)을 사용하면 $\mathbf{X}' = (\mathbf{\Xi}^T \mathbf{\Xi})^{-1} \mathbf{\Xi}^T \mathbf{S}$ 와 같이 노광량($\mathbf{S}$)으로부터 푸리에계수($\mathbf{X}'$)를 계산할 수 있는 해를 얻을 수 있다.

식 (4)와 같이 측정된 노광량들에 대해서 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform)을 적용하면 그 결과는 상기과 같이 최소 자승법에 의해 얻은 결과와 동일하지만 그 표현 방법은 다음과 같이 보다 더 간결한 장점이 있다.

$$\langle H_n^c \rangle + i \langle H_n^s \rangle = \frac{2}{NJ} \sum_{j=1}^{NJ} S_j \exp \left[i \frac{2n\pi(j-1)}{J} \right] \quad (5)$$

여기에서 $\langle H_n^c \rangle$ 와 $\langle H_n^s \rangle$ 는 실수함수이고, 꺾쇠 괄호는 기준 각속도의 회전주기마다 한 번의 측정이 수행될 때 총 N 번 측정을 하여 얻은 측정값들에 대한 평균값을 의미한다. 식(4)을 식(5)에 대입하고 삼각함수 시스템의 직교성을 활용하여 정리를 하면 측정된 푸리에계수의 평균값들은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\langle I_0' \rangle = \frac{\langle H_0^c \rangle}{2T_i} \quad (6)$$

$$\langle A_n' \rangle = C_n^c \langle H_n^c \rangle - C_n^s \langle H_n^s \rangle, \quad (n \geq 1) \quad (7)$$

$$\langle B_n' \rangle = C_n^c \langle H_n^s \rangle + C_n^s \langle H_n^c \rangle, \quad (n \geq 1) \quad (8)$$

$$C_n^c = \frac{\xi_n}{T_i \sin \xi_n} \cos \left[\xi_n \left(1 + \frac{2T_d}{T_i} \right) \right], \quad (n \geq 1) \quad (9)$$

$$C_n^s = \frac{\xi_n}{T_i \sin \xi_n} \sin \left[\xi_n \left(1 + \frac{2T_d}{T_i} \right) \right], \quad (n \geq 1) \quad (10)$$

일반적인 타원계측기 구성에서는 광원(Light Source; LS)으로부터 방사된 평행빔이 편광상태발생기(Polarization State Generator; PSG)를 통과하고, 시편에 의해 반사된 후에 편광상태 분석기(Polarization State Analyzer; PSA)를 통과하여 광검출소자(Photodetector Element; PDE)에 입사하면 분광복사선속은 전기적 신호로 변환되게 된다. 특히, 광소자-회전형 타원계측기에서 사용되는 회전 가능한 편광 광소자(Rotatable Polarization Element)들은 선형편광자(Linear Polarizer)와 보상기(Compensator)로 구분되며, 이들은 광소자-회전형 타원계측기의 종류에 따라서 편광상태발생기와 편광상태분석기에 각각 다르게 배치된다. 광소자-회전형 타원계측기에서 회전 가능한 편광 광소자들 중에서 최소한 하나의 편광 광소자는 일정한 각 진동수로 등속회전을 해야 하고, 그 이외의 회전 가능한 편광 광소자들은 각각 지정된 위치에 정지해 있다. 회전 가능한 편광 광소자들의 방위각은 중공축 모터에 의해서 원격조정이 가능하며 중공축 모터의 방위각 기준점, 즉 인덱스 원점(index origin)에 위치했을 때에 회전 가능한 편광 광소자들의 특성 축들이 각기 다른 위치에 있을 수 있다. 측정이 바르게 이루어지기 위해서는 임의로 정해진 기준축으로 부터 회전 가능한 편광 광소자들의 특성 축의 방위각 위치를 각각 알아내야만 한다. 기존에 잘 알려진 교정법(calibration)을 사용하면 편광 광소자들의 특성 축의 방위각 위치를 상기 기준축 좌표계에서 각각 찾아낼 수 있다. 따라서 식 (2)를 기준축 좌표계에 대해서 변환하면 다음과 같이 주어진다.

$$I(\theta_r) = I_0 + \sum_{n=1}^{N_{\text{eq}}} [A_n \cos(n\theta_r) + B_n \sin(n\theta_r)] \quad (11)$$

여기에서 θ_r 는 기준축에 대해서 측정된 등속회전 각속도에 의한 방위각 변화량이고, I_0 을 보정된 푸리에계수의 직류 성분이며, A_n 와 B_n 는 보정된 푸리에계수의 교류 성분들이다. 식 (11)에서 방위각을 $\omega t = \theta_r + \theta_{r0}$ 표기하면 $-\theta_{r0,n}$ 는 $t=0$ 일 때 θ_r 의 값이 되고, 미보정된 그리고 보정된 푸리에계수들 간 관계식은 식 (2)와 식 (11)의 항등 관계식으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$I_0 = I_0' \quad (12)$$

$$A_n = A_n' \cos(n\theta_{r0,n}) + B_n' \sin(n\theta_{r0,n}) \quad (13)$$

$$B_n = -A_n' \sin(n\theta_{r0,n}) + B_n' \cos(n\theta_{r0,n}) \quad (14)$$

타원계측기에서 데이터 정리(data reduction) 함수는 보정된 푸리에계수들로부터 시편의 편광타원계측 매개변수를 추출하는 데 사용하기 때문에, 사용되는 광소자-회전형 타원계측기에 적합한 데이터 정리 방법을 찾는 것이

매우 중요하다. 스토크스(Stokes) 표현에 의하면 편광상태발생기를 통과하기 위해 입사되는 광파의 스토크스 벡터는 $\mathbf{S}^{(LS)} = (I_0, I_1, I_2, I_3)^T$ 로 두고, 시편의 물러-행렬은 $\mathbf{M}^{(SP)} = (M_{jk})_{4 \times 4}$ 로 표기하고, 편광상태발생기와 편광상태분석기의 물러-행렬은 $T_{PSG} \mathbf{M}^{(PSG)}$ 와 $T_{PSA} \mathbf{M}^{(PSA)}$ 로 각각 표기하며, 여기서 T_{PSG} 와 T_{PSA} 는 각각 편광상태발생기와 편광상태분석기의 유효 투과계수이며, $\mathbf{M}^{(DOS)} = (D_{jk})_{4 \times 4}$ 는 편광상태분석기와 광검출소자 사이에 배치된 검출광학계(Detector Optic System; DOS)의 물러-행렬이며, 마지막으로 $\mathbf{S}^{(PDE)} = (S_0^{(PDE)}, S_1^{(PDE)}, S_2^{(PDE)}, S_3^{(PDE)})^T$ 는 광검출소자에 입사되는 광파의 스토크스 벡터이다. 편광상태발생기와 편광상태분석기에 배치되어 있는 고정편광자, 등속회전편광자, 등속회전검광자, 고정검광자의 특성 축의 방위각 위치를 임의의 기준축 좌표계에서 각각 P, P_r, A_r, A 로 표기하고, 이들의 방위각 변화를 좌표계 회전에 대한 물러-행렬로 각각 기술한다.

[0102] 준 단색 광파에 대해 광검출소자에 입사되는 광파의 스토크스 벡터는 다음과 같이 기술할 수 있다.

[0103]
$$\mathbf{S}^{(PDE)} = T_{PSA} T_{PSG} \mathbf{M}^{(DOS)} \mathbf{M}^{(PSA)} \mathbf{M}^{(SP)} \mathbf{M}^{(PSG)} \mathbf{S}^{(LS)} \quad (15)$$

[0104] 광검출소자의 면적은 A_{PDE} 이고, 양자효율이 μ_{OE} 일 때 광검출소자에 의해 측정되는 분광복사선속은 $I(\theta_r) = \mu_{OE} A_{PDE} S_0^{(PDE)}$ 로 주어지고 이 관계식에 의해서 구해진 보정된 푸리에계수들에 대한 해들은 시편의 물러-행렬 성분들에 대한 연립 일차 방정식 형태로 각각 주어지게 된다. 이와 같은 연립 일차 방정식을 보다 간략히 표현하기 위해서 $\mathbf{V}^{(SP)} = (M_{11}, \dots, M_{1v}, \dots, M_{u1}, \dots, M_{uv})^T$ 와 같이 시편에 대한 물러-행렬 성분들을 갖는 열 벡터를 도입하였다. 여기서 u 와 v 는 사용된 광소자-회전형 타원계측기의 종류에 따라 다르게 주어지는 정수들이다. 따라서 보정된 푸리에계수들은 다음과 같이 스칼라 곱으로 주어진다.

[0105]
$$I_0 = \gamma \sum_{j=1}^u \sum_{k=1}^v i_{0,jk} M_{jk} = \gamma \mathbf{i}_0 \cdot \mathbf{V}^{(SP)} \quad (16)$$

[0106]
$$A_n = \gamma \sum_{j=1}^u \sum_{k=1}^v a_{n,jk} M_{jk} = \gamma \mathbf{a}_n \cdot \mathbf{V}^{(SP)} \quad (17)$$

[0107]
$$B_n = \gamma \sum_{j=1}^u \sum_{k=1}^v b_{n,jk} M_{jk} = \gamma \mathbf{b}_n \cdot \mathbf{V}^{(SP)} \quad (18)$$

[0108] 여기서

$$\mathbf{i}_0 = (\partial I_0 / \partial M_{11}, \dots, \partial I_0 / \partial M_{1v}, \dots, \partial I_0 / \partial M_{u1}, \dots, \partial I_0 / \partial M_{uv}) / \gamma, \quad \mathbf{a}_n = (\partial A_n / \partial M_{11}, \dots, \partial A_n / \partial M_{1v}, \dots, \partial A_n / \partial M_{u1}, \dots, \partial A_n / \partial M_{uv}) / \gamma, \quad \mathbf{b}_n = (\partial B_n / \partial M_{11}, \dots, \partial B_n / \partial M_{1v}, \dots, \partial B_n / \partial M_{u1}, \dots, \partial B_n / \partial M_{uv}) / \gamma$$

은 일반적으로 고정광소자들의 방위각만의 함수이지만 만약에 보상기가 포함되어 있다면 보상기의 방위각과 위상 각(retardation angle)이 더 포함된 함수로써 행 벡터로 기술되어 있으며, γ 는 광원의 세기와 편광특성, 광검출소자의 유효 검출 면적 및 양자 효율, DOS의 편광 의존 특성, 그리고 광소자-회전형 타원계측기에서 사용되는 광학 소자의 투과율 상태에 관련된 공통 인자(common factor)로서 다음과 같이 주어진다.

[0109]
$$\gamma = \kappa (1 + d_{12} \cos 2A + d_{13} \sin 2A) (1 + l_1 \cos 2P + l_2 \sin 2P) \quad (19)$$

[0110] 여기에서 $\kappa = \mu_{OE} A_{PDE} T_{PSA} T_{PSG} D_{11} L_0$, $d_{12(13)} = D_{12(13)} / D_{11}$, 그리고 $l_{1(2)} = L_{1(2)} / L_0$ 이다.

[0111] 데이터 정리에 사용된 선형 방정식의 총 가지 수에 따라서 상기 연립 일차 방정식의 해는 고유의(Unique) 또는 과잉 결정된(Overdetermined) 형태로 주어지게 된다. 상기 데이터 정리에 관련된 식은 모든 형태의 광소자-회전형 타원계측기에 적용이 가능하다.

[0112] 보정된 모든 푸리에계수들로부터 시편의 타원계측 매개변수를 얻을 수 있는 일반화된 데이터 정리 방법을 소개하고자 한다. 보정된 푸리에계수의 열 벡터를 $\mathbf{X} = (I_0, A_1, B_1, A_2, B_2, \dots, A_{N_{ho}}, B_{N_{ho}})^T$ 로 표기하고, 상기 행 벡터를 성

분으로 구성된 $(2N_{ho}+1)\text{-by-}uv$ 계수 행렬을 $\Omega = \gamma(i_0, \mathbf{a}_1, \mathbf{b}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{a}_{N_{ho}}, \mathbf{b}_{N_{ho}})^T$ 로 표기하면 식 (16)~(18)은 $\mathbf{X} = \Omega \mathbf{V}^{(SP)}$ 와 같이 나타낼 수 있다. Ω 의 행렬 급수(matrix rank)가 $\mathbf{M}^{(SP)}$ 에서의 미지의 행렬 요소들의 총 수와 같거나 보다 큰 경우에는 시편에 대한 물리-행렬 성분에 대한 벡터의 해는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{V}^{(SP)} = (\Omega^T \Omega)^{-1} \Omega^T \mathbf{X} \quad (20)$$

따라서 광학적 특성이 잘 알려진 기준 시편을 사용한 측정결과 또는 시편 없이 직선 상의 측정결과로부터 각 파장마다 식 (19)에서 κ , d_{12} , d_{13} , l_1 , 및 l_2 의 값을 얻는다면 식 (20)을 사용하여 보정된 푸리에계수들의 값으로부터 시편의 물리-행렬의 성분들을 직접 계산하는 것이 가능하다. 여기서 강조하고 싶은 것은 위와 같은 방법으로 계산된 물리-행렬 성분에 대한 벡터의 해는 비등방성 시편의 경우에도 적용될 수 있다.

그리고, κ , d_{12} , d_{13} , l_1 , 및 l_2 의 값을 모른다 할지라도 $m_{jk} = M_{jk} / M_{11}$ 와 같이 정규화된 물리-행렬 성분들로 정의되는 시편의 편광계측 매개변수들의 측정값을 얻을 수 있다. 또한, 등방성 시편의 경우에는 일반적으로 $N_{sp} = -m_{12}$ (or $-m_{21}$) 그리고 $C_{sp} = m_{33}$ (or m_{44})와 같이 정의된 시편의 편광타원계측 매개변수로 간단히 표현될 수 있다.

위와 같이 광의 분광복사선속을 측정하고, 시편에 대한 광학적 이론식을 정립하고, 정립된 이론식에 대해 설정된 영역에 대한 다수의 미지의 매개변수들을 사용하여 시편의 물리-행렬성분들의 데이터를 계산하고, 상기 데이터에 최소자승법 등을 이용하여 최적화를 함으로써, 시편에서 구하고자 하는 광물성 값을 추측할 수 있다. 즉 물리-행렬로부터 다른 물리적인 특성을 분석할 수 있는 것이다. 이처럼 본 발명의 실시예에 따른 선형편광자-회전형 수직입사 타원계측기는, 상기 측정된 푸리에계수들 또는 상기 측정된 물리-행렬성분들로부터 시편의 계면 특성, 박막두께, 복소굴절률, 나노형상, 비등방특성, 표면거칠기, 조성비, 결정성 등의 다양한 물성을 분석할 수 있으며, 이러한 분석 결과를 반도체소자 공정용 측정장비, 평판디스플레이 공정용 측정장비, 태양광소자 측정장비, 박막광학 측정장비, 바이오센서 또는 가스센서 등에 활용할 수 있다. 구체적으로 본 발명의 실시예에 따른 선형편광자-회전형 수직입사 타원계측기에서 나노패턴 형상측정과 같이 분석방법이 매우 복잡한 경우의 물성 분석 방법을 설명하자면 다음과 같다. 먼저 측정하고자 하는 시편에 대한 푸리에계수들 또는 물리-행렬 성분들의 측정 데이터를 얻고, 시편에 대한 광학적 이론식을 정립하고, 정립된 이론식에 대해 설정된 영역에서 정해진 다수의 미지 매개변수들의 값들을 사용하여 계산된 푸리에계수들 또는 물리-행렬성분들의 데이터를 얻고, 계산된 데이터에 대해서 미지의 매개변수들에 대한 연속함수를 만들고, 연속함수를 측정 데이터에 최소자승법을 이용하여 최적화를 함으로써 시편의 물성을 얻을 수 있다. 이러한 경우에 본 발명의 타원계측기는 상기 시편에 대해 측정된 상기 푸리에계수들 또는 상기 물리-행렬 성분들의 측정 데이터로부터 상기 시편의 물성을 빠르게 찾아내기 위하여 고성능 병렬 컴퓨터, RCWA(rigorous coupled-wave analysis) 알고리즘 기반의 분석 소프트웨어 및 대용량 데이터 저장장치로 구성된 대용량 고속 연산시스템을 포함할 수 있다.

본 발명의 수직입사 타원계측기를 이용한 시편의 광물성 측정 방법

도 6는 본 발명의 선형편광자-회전형 수직입사 타원계측기를 이용한 시편의 광물성 측정 방법을 나타내는 순서도로서, 상술한 바와 같은 원리를 이용한 광물성 측정 방법을 정리하여 설명한다. 본 발명의 수직입사 타원계측기를 이용한 시편의 광물성 측정 방법은, 도 6에 도시된 바와 같이, 시편장착단계(S10), 방위각선택단계(S20), 방위각이동단계(S30), 노광량측정단계(S40), 푸리에계수계산단계(S50), 물리행렬성분계산단계(S60) 및 시편광물성분석단계(S70)를 포함할 수 있다.

상기 시편장착단계(S10)에서는, 광물성을 측정하고자 하는 상기 시편이 상기 수직입사 타원계측기의 시편받침대에 장착 및 정렬된다. 상기 방위각선택단계(S20)에서는, 상기 전산기기에 의하여, 상기 고정편광자 및 상기 고정검광자의 방위각 값이 선택된다. 상기 방위각이동단계(S30)에서는, 상기 전산기기에 의하여, 상기 고정편광자 및 상기 고정검광자를 설정방위각으로 이동시키게 된다. 상기 노광량측정단계(S40)에서는, 상기 광검출소자에 의하여, 상기 등속회전편광자 및 상기 등속회전검광자의 방위각 변화에 따른 상기 반사평행빔의 노광량 값이 측정된다. 상기 푸리에계수계산단계(S50)에서는, 상기 전산기기에 의하여, 상기 노광량 값들로부터 분광복사선속 파형의 푸리에계수 값들이 계산된다. 상기 물리행렬성분계산단계(S60)에서는, 상기 전산기기에 의하여, 상기 푸리에계수 값들로부터 상기 시편의 물리-행렬성분 값들이 계산된다. 상기 시편광물성분석단계(S70)에서는, 상기 전산기기에 의하여, 상기 물리-행렬성분 값들로부터 상기 시편의 광물성 값들이 분석 및 산출된다.

본 발명은 상기한 실시예에 한정되지 아니하며, 적용범위가 다양함은 물론이고, 청구범위에서 청구하는 본 발명

의 요지를 벗어남이 없이 당해 본 발명이 속하는 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 누구든지 다양한 변형 실시가 가능한 것은 물론이다.

부호의 설명

[0121]

10 : (종래의) 단일 보상기-회전형 수직입사 타원계측기

11 : 광원 12 : 광분할기

13 : 선형편광자 14 : 등속회전보상기

15 : 분광기 16 : 전산기기

L10a : 광원에서 방사된 입사평행빔

L10b : 시편에 입사하는 입사평행빔

L10c : 시편에 의해 반사된 반사평행빔

L10d : 분광기에 입사하는 반사평행빔

20 : (종래의) 이중 보상기-회전형 수직입사 타원계측기

21 : 광원 22 : 광분할기

23 : 선형편광자

24a: 제1등속회전보상기 24aw: 제1과장판

24am : 제1등속회전중공축모터

24b : 제2등속회전보상기 24bw : 제2파장판

24bm : 제2등속회전중공축모터

25 : 분광기 26 : 전산기기

27 : 차폐용부스 28 : 가스공급장치

L20a : 광원에서 방사된 입사평행빔

L20b : 시편에 입사하는 입사평행빔

L20c : 시편에 의해 반사된 반사평행빔

L20d : 분광기에 입사하는 반사평행빔

100 : 본 발명 제1실시예의 선형편광자-회전형 수직입사 타원계측기

101 : 광원 102 : 광분할기

103 : 선형편광자 103m : 중공축스테핑모터

104 : 등속회전선형편광자 104m : 등속회전중공축모터

105 : 광검출소자 106 : 전산기기

107 : 차폐용부스 108 : 가스공급장치

109 : 초점광학계

L100a : 광원에서 방사된 입사평행빔

L100b : 시편에 입사하는 입사평행빔

L100c : 시편에 의해 반사된 반사평행빔

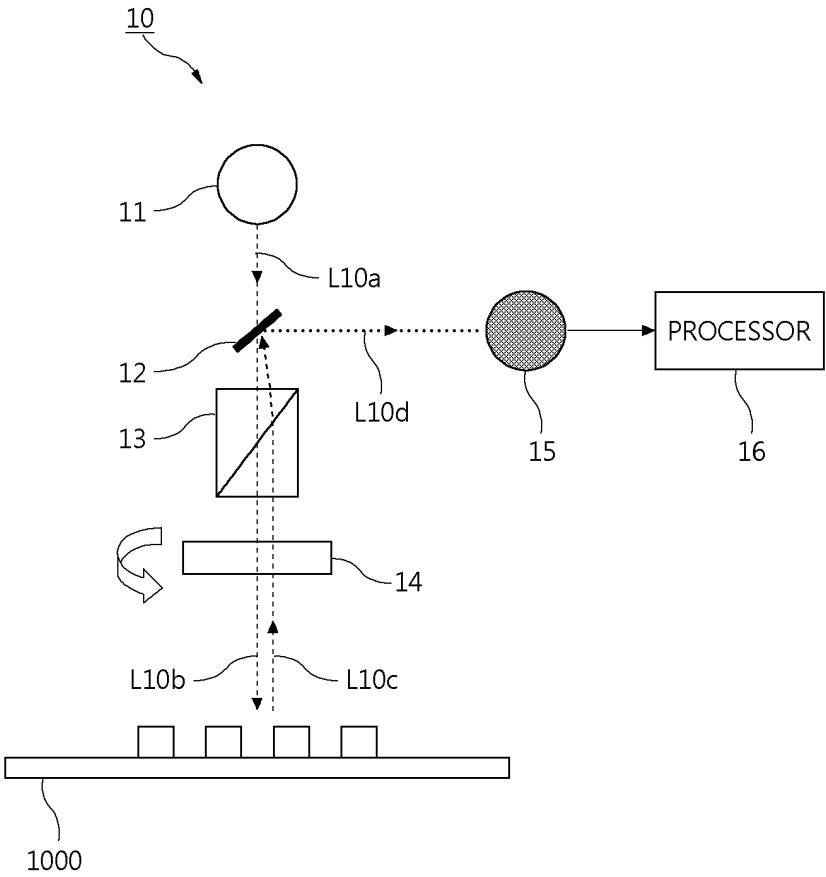
L100d : 광검출소자에 입사하는 반사평행빔

200 : 본 발명 제2실시예의 선형편광자-회전형 수직입사 타원계측기

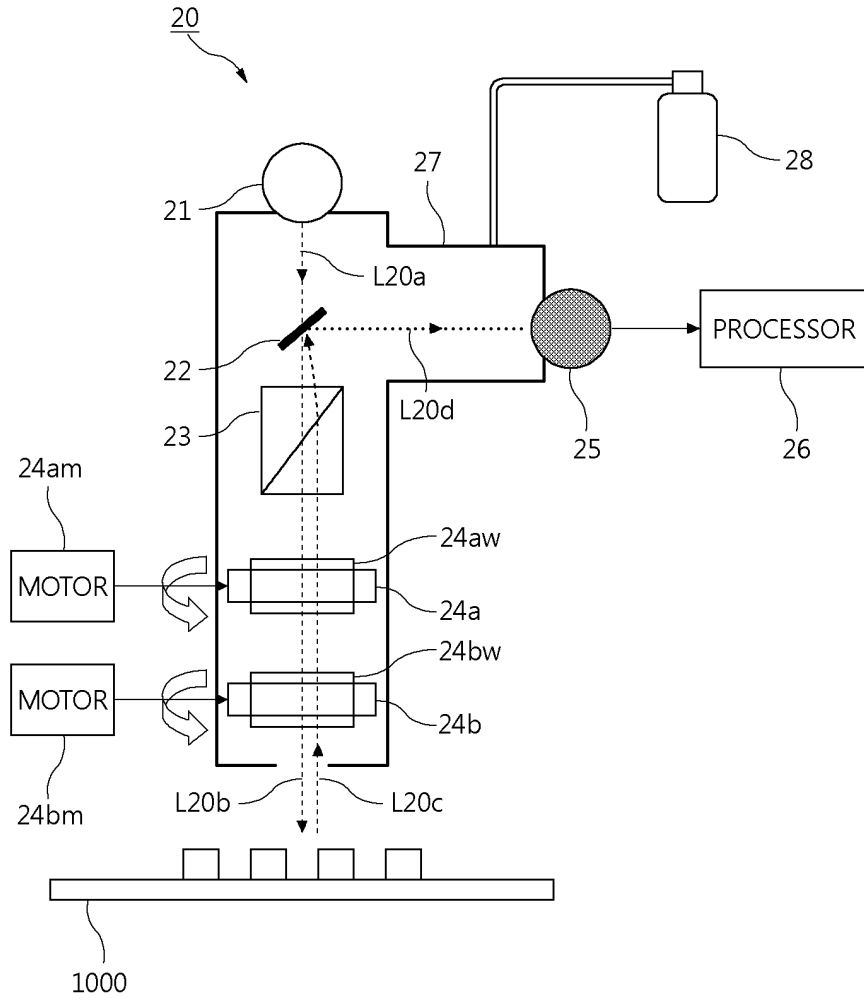
201 : 광원	203 : 광분할선형편광자
204 : 등속회전선형편광자	204m : 등속회전중공축모터
205 : 광검출소자	206 : 전산기기
L200a : 광원에서 방사된 입사평행빔	
L200d : 광검출소자에 입사하는 반사평행빔	
300 : 본 발명 제3실시예의 선형편광자-회전형 수직입사 타원계측기	
301 : 광원	302 : 광분할기
303 : 광분할선형편광자	
304 : 등속회전선형편광자	304m : 등속회전중공축모터
305s : s-편광광검출소자	305p : p-편광광검출소자
306 : 전산기기	
L300a : 광원에서 방사된 입사평행빔	
L300s : s-편광광검출소자에 입사하는 반사평행빔	
L300p : p-편광광검출소자에 입사하는 반사평행빔	
1000 : 시편	

도면

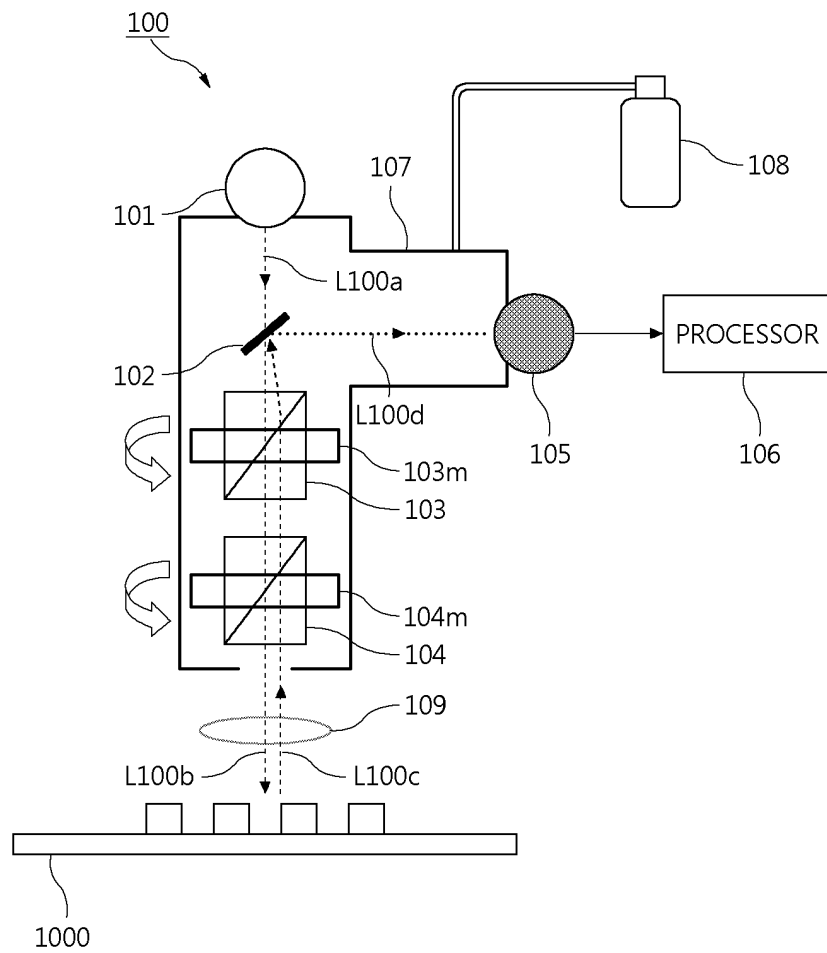
도면1



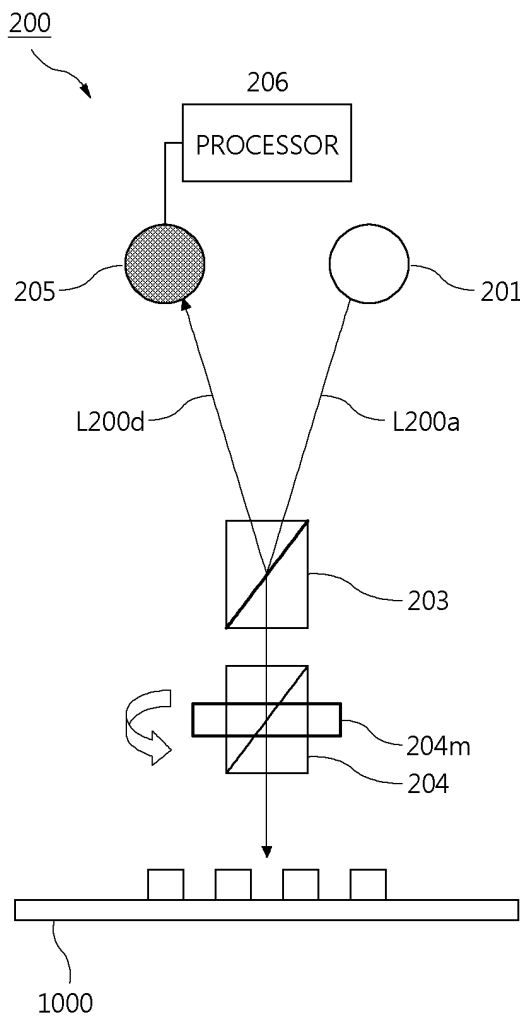
도면2



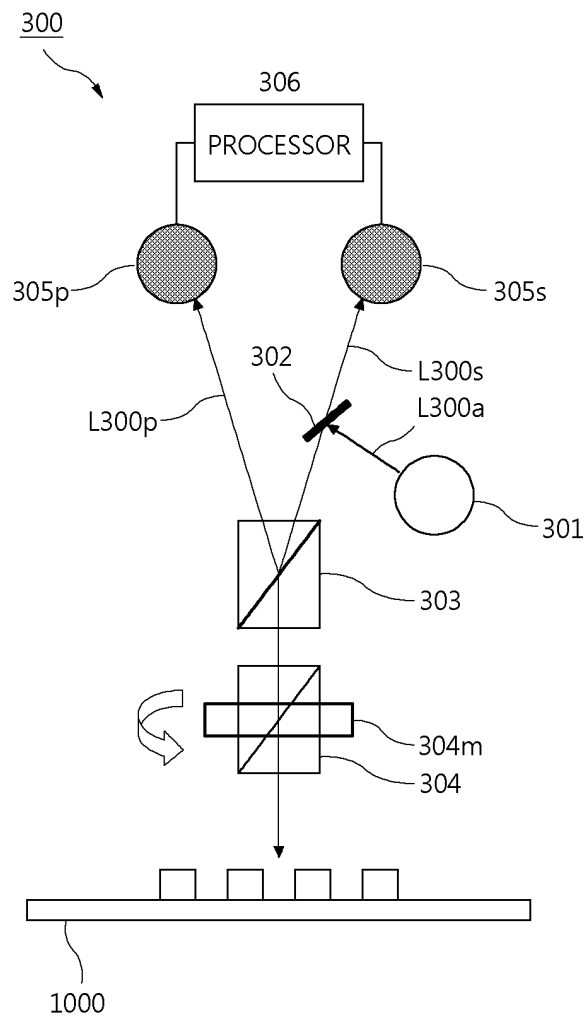
도면3



도면4



도면5



도면6

