



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2023년06월29일
(11) 등록번호 10-2549714
(24) 등록일자 2023년06월27일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 21/956 (2006.01) G01B 9/02001 (2022.01)
G01B 9/02015 (2022.01) G01B 9/02055 (2022.01)
G01N 21/45 (2006.01) G01N 21/88 (2006.01)
 - (52) CPC특허분류
G01N 21/956 (2013.01)
G01B 9/02007 (2013.01)
 - (21) 출원번호 10-2022-7021549(분할)
 - (22) 출원일자(국제) 2015년04월12일
심사청구일자 2022년07월25일
 - (85) 번역문제출일자 2022년06월24일
 - (65) 공개번호 10-2022-0092653
 - (43) 공개일자 2022년07월01일
 - (62) 원출원 특허 10-2021-7042377
원출원일자(국제) 2015년04월12일
심사청구일자 2022년01월19일
 - (86) 국제출원번호 PCT/IL2015/050389
 - (87) 국제공개번호 WO 2015/155779
국제공개일자 2015년10월15일
 - (30) 우선권주장
61/975,989 2014년04월07일 미국(US)
 - (56) 선행기술조사문헌
JP2009509150 A
(뒷면에 계속)
- 전체 청구항 수 : 총 20 항

- (73) 특허권자
노바 엘티디.
이스라엘, 레호보트 7632805, 데이비드 파이크스 스트리트 5
- (72) 발명자
바락, 길라드
이스라엘, 레호보트 7634940, 지포라 토브 스트리트 5/22
샤피르, 드로
이스라엘, 키르야트 오노 5552587, 하크파 스트리트 10/10
(뒷면에 계속)
- (74) 대리인
강명구

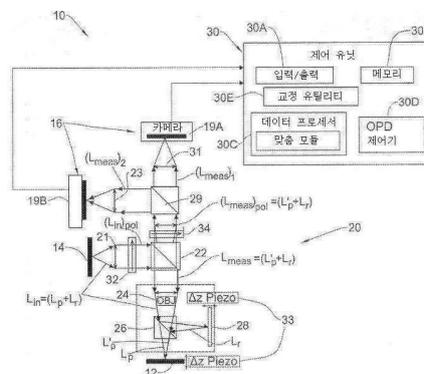
심사관 : 권준형

(54) 발명의 명칭 광학 위상 측정 방법 및 시스템

(57) 요약

패턴화된 샘플의 파라미터를 측정하는데 사용하기 위한 측정 시스템이 제시된다. 상기 시스템은, 광역 광 소스, 간섭 시스템으로서 구성된 광학 시스템, 검출 유닛 및 제어 유닛을 포함하되, 상기 간섭 시스템은 기준 반사기를 포함하는 기준 암 및 샘플 암을 가진 조명 및 검출 채널을 형성하고, 샘플 암과 기준 암 사이의 광학 경로 차이 (뒷면에 계속)

대표도



를 유도하도록 구성되며, 상기 검출 유닛은 상기 반사기로부터 반사된 광선 및 샘플의 지지부로부터 전파되는 광선에 의해 형성된 결합된 광선을 검출하고, 적어도 두 개의 스펙트럴 간섭 특징에 의해 형성된 스펙트럴 간섭 패턴을 나타내는 측정된 데이터를 생성하도록 구성되고 작동되며, 상기 제어 유닛은 샘플 내의 패턴의 하나 이상의 파라미터를 결정하기 위해, 측정된 데이터를 수신하고, 모델-기반의 프로세싱을 스펙트럴 간섭 패턴에 적용하도록 구성되고 작동된다.

(52) CPC특허분류

G01B 9/02032 (2013.01)

G01B 9/02072 (2013.01)

G01N 21/45 (2013.01)

G01N 21/8806 (2013.01)

G01B 2210/56 (2013.01)

G01B 2290/70 (2013.01)

(72) 발명자

그로스만, 대니

이스라엘, 헤르즐리야 4634710, 마젠 데이비드 스트리트 10

버라츠키, 요브

이스라엘, 크파 유리야 9973500, 210

하이닉, 야니르

이스라엘, 텔-아비브 6342711, 바 코흐바 스트리트 26비

(56) 선행기술조사문헌

JP2009518088 A

JP2011089895 A

KR1020070050445 A

US06611336 B1

US07061625 B1

US20050254063 A1

US20120069326 A1

JP2011506972 A

명세서

청구범위

청구항 1

패턴화된 샘플의 파라미터를 측정하는데 사용하기 위한 측정 시스템에 있어서, 상기 시스템은,

광대역 광 소스,

대물 렌즈를 포함하고 간섭 시스템으로서 구성된 광학 시스템,

검출 유닛,

제어 유닛, 및

상기 대물 렌즈와 패턴화된 샘플 사이에 광학 경로를 따라 위치한 빔 스플리터-및-컴바이너를 포함하되,

상기 간섭 시스템은 기준 반사기를 포함하는 기준 암 및 샘플 암을 가진 조명 및 검출 채널 및 조명 채널을 형성하고, 상기 샘플 암은 기준 암과 평행하지 않으며, 상기 검출 채널은 적어도 상기 대물 렌즈를 공유하는 제1 검출 채널 및 제2 검출 채널을 포함하고,

상기 간섭 시스템은 샘플 암과 기준 암 사이의 광학 경로 차이를 유도하도록 구성되며, 상기 간섭 시스템은 패턴화된 샘플로부터 전파되는 광 빔 및 기준 반사기로부터 반사되는 광 빔에 의해 형성되는 조합된 광 빔의 전파를 위해 샘플 암 및 기준 암의 출력을 검출 채널 내로 조합하도록 구성되고, 광 빔들은 광대역 광 소스로부터 발원하는 광으로부터 도출되며,

상기 검출 유닛은 이미징 센서 및 스펙트럴 센서를 포함하고, 상기 스펙트럴 센서는 제1 검출 채널로부터 조합된 광 빔의 제1 부분을 검출하도록, 그리고, 조합된 광의 제1 부분의 각각의 파장을 나타내는 측정 데이터를 생성하도록 구성되며, 상기 이미징 센서는 조합된 광 빔의 제2 부분을 검출하도록 구성되며,

상기 제어 유닛은 패턴화된 샘플의 패턴의 하나 이상의 파라미터를 결정하기 위해 측정 데이터를 수신하도록 구성되고,

상기 빔 스플리터-및-컴바이너는 광대역 광 소스로부터 발원하는 광을 프로브 광 빔과 기준 광 빔으로 분할하도록 구성되고,

상기 빔 스플리터-및-컴바이너는 패턴화된 샘플을 향해 샘플 암을 따라 프로브 광 빔을 지향시키도록 구성되며,

상기 빔 스플리터-및-컴바이너는 기준 반사기를 향해 기준 암을 따라 기준 광 빔을 지향시키도록 구성되는, 측정 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 간섭 시스템은 편광기들을 포함하고, 상기 편광기들은 조명 채널 내부 및 수집 채널 외부에 제1 편광기와, 검출 채널 내부 및 조명 채널 외부에 제2 편광기를 포함하는, 측정 시스템.

청구항 3

제2항에 있어서, 상기 간섭 시스템은 구동 유닛을 포함하고, 상기 구동 유닛은 패턴화된 샘플을 지지하는 샘플 지지부 및 상기 기준 반사기 중 적어도 하나와 연계되고, 상기 간섭 시스템의 광학 축을 따라 샘플 지지부 및 기준 반사기 중 적어도 하나를 제어가능하게 운동시키도록 구성되어, 샘플 암과 기준 암 간의 광학 경로 차이를 유도하는, 측정 시스템.

청구항 4

제1항에 있어서, 패턴화된 샘플을 지지하는 샘플 지지부 및 기준 반사기 중 적어도 하나는 상기 간섭 시스템의 광학 축에 대해 고정된 틸트 위치로 배향되어, 샘플 암과 기준 암 간 광학 경로 차이를 제공하는, 측정 시스템.

청구항 5

제4항에 있어서, 상기 반사기는 상기 간섭 시스템의 대물 렌즈 유닛의 초점 평면에 평행한, 그리고 상기 초점 평면으로부터 이격된, 평면에 위치하는, 측정 시스템.

청구항 6

제4항에 있어서, 상기 반사기는 역반사 어셈블리(retro-reflector assembly)로 구성되는, 측정 시스템.

청구항 7

제1항에 있어서, 상기 간섭 시스템은 상기 기준 반사기를 향해 기준 암을 따라 전파되는 조명 광 빔에 디포커싱 효과를 유도하도록 구성되어, 샘플 암과 기준 암 간 광학 경로 차이를 제공하는, 측정 시스템.

청구항 8

제1항에 있어서, 상기 광대역 광 소스는 초단파 펄스(ultra short pulses) 형태의 조명을 생성하도록 구성되는, 측정 시스템.

청구항 9

제1항에 있어서, 조합된 광 빔을 조합된 광 빔의 제1 부분 및 조합된 광 빔의 제2 부분으로 분리하도록 구성되는 추가의 빔 스플리터-및-컴바이너를 포함하는, 측정 시스템.

청구항 10

제9항에 있어서, 이미징 센서가 CCD인, 측정 시스템.

청구항 11

제1항에 있어서, 상기 기준 반사기가, 틸트 및 광학 경로 차이 중 적어도 하나를 제어하도록 운동가능한 MEMS 기준 미러인, 측정 시스템.

청구항 12

제11항에 있어서, 상기 이미징 센서가 제어 유닛과 통신하는, 측정 시스템.

청구항 13

패턴화된 샘플의 파라미터 측정에 사용하기 위한 방법에 있어서, 상기 방법은,

간섭 광학 시스템을 통해 광대역 광을 지향시키는 단계 - 상기 간섭 광학 시스템은 대물 렌즈를 포함하고 기준 반사기를 포함하는 기준 암에 평행하지 않은 샘플 암을 갖는 검출 채널 및 조명 채널을 형성하고, 상기 검출 채널은 적어도 대물 렌즈를 공유하는 제1 검출 채널 및 제2 검출 채널을 포함함;

광대역 광을 프로브 광 빔 및 기준 광 빔으로 분할하는 단계 - 상기 분할은 대물 렌즈와 패턴화된 샘플 간에 광학 경로를 따라 수행됨;

프로브 광 빔을 샘플 암을 따라 패턴화된 샘플을 향해 지향시키는 단계;

기준 광 빔을 기준 암을 따라 기준 반사기를 향해 지향시키는 단계;

샘플 암과 기준 암 간 광학 경로 차이를 유도하는 단계;

패턴화된 샘플로부터 전파되는 광 빔 및 기준 반사기로부터 반사되는 광 빔에 의해 형성되는 조합된 광 빔의 전파를 위해 샘플 암 및 기준 암의 출력을 검출 채널 내로 조합하는 단계 - 광 빔들은 광대역 광으로부터 도출됨;

스펙트럴 센서를 이용하여 조합된 광 빔의 제1 부분의 매 파장의 강도를 별도로 검출하고, 측정 데이터를 생성하는 단계;

스펙트럴 센서와는 다른 이미징 센서에 의해, 조합된 광 센서의 제2 부분을 검출하는 단계;

패턴화된 샘플 내 패턴의 하나 이상의 파라미터를 측정 데이터로부터 결정하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 14

제13항에 있어서, 상기 기준 반사기는 MEMS 기준 미러이고, 상기 방법은 MEMS 기준 미러를 운동시키는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 15

제13항에 있어서, 패턴화된 샘플을 지지하는 샘플 지지부 및 상기 기준 반사기 중 적어도 하나를 간섭 시스템의 광학 축을 따라 제어가능하게 운동시켜서, 샘플 압과 기준 압 간 광학 경로 차이를 유동하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 16

제13항에 있어서, 패턴화된 샘플을 지지하는 샘플 지지부 및 상기 기준 반사기 중 적어도 하나를, 간섭 시스템의 광학 축에 대해 고정된 틸트 위치로, 배향시켜서, 샘플 압과 기준 압 간 광학 경로 차이를 제공하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 17

제16항에 있어서, 상기 간섭 시스템의 대물 렌즈 유닛의 초점 평면으로부터 평행한, 그리고 이격되는, 평면에 상기 반사기를 배치하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 18

제16항에 있어서, 상기 반사기를 역반사 어셈블리로 구성하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 19

제13항에 있어서, 상기 기준 반사기를 향해 상기 기준 압을 따라 전파되는 조명 광 빔에 대해 디포커싱 효과를 유도하여, 샘플 압과 기준 압 간 광학 경로 차이를 제공하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 20

제13항에 있어서, 초단파 펄스 형태의 광대역 광의 조명을 생성하는 단계를 더 포함하는, 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 일반적으로, 광학 측정 기술의 분야에 있고, 위상 측정을 사용하여 패턴화된 샘플의 파라미터 및/또는 속성을 결정하기 위한 광학 시스템 및 방법에 관한 것으로서, 특히 반도체 산업에서 유용하다.

배경 기술

[0002] 반도체 기술에서의 끊임없는 진보는 그 어느 때보다도 더 작은 장치의 제작에서 요구된다. 이러한 발전은, 제작 공정을 모니터링하고 제어하기 위하여, 계측 능력과 동시 개발에 의해 달성되어야 한다.

[0003] 지난 수십 년에 걸쳐, 광학 임계 치수(OCD) 계측은, 극도의 민감도, 정확성, 유연성 및 속도 때문에, 반도체 제조 공정에서 중추적인 역할을 하였다. 계측 능력의 적절한 개선책을 제공하기 위하여, OCD 툴은 광범위한 개선과 보강을 살펴보았고, 극도로 정확한 광대역 스펙트럴 측정과 극도로 높은 스루풋(throughput)을 제공할 수 있다.

[0004] 기본적인 툴 특징을 개선하는 공정에 추가로, OCD 성능이 개선되는 또 다른 논거는 측정된 정보를 다각화시킴을 시키는 것이다. 흔히 측정되는 광학 속성은 다양한 입사각에 대한 반사도, 방위각, 편광 및 파장이다. 또한, 반사된 TE 편광 성분과 TM 편광 성분 사이의 상대적인 위상은 (가령) 엘립소메트릭 측정(ellipsometric measurement)을 통해 액세스될 수 있다.

[0005] 패턴화된 구조물로부터 산란된 광의 또 다른 중요한 속성은 그 광의 스펙트럴 위상이다. 이러한 양은 입사 전자 기파와 반사 전자기파 사이의 상대적인 위상을 기술한다. 전형적으로, 이러한 위상은 서로 다른 파장, 입사각/방위각 및 편광에 대해 서로 다른 값을 가진다.

[0006] 위상에 직접 액세스하는 것은 광학 주파수에서 불가능하기 때문에, 대개 간섭계에 의해 관측되는 간섭 효과를

사용하고, 간섭 효과로부터 인코딩된 위상 정보를 복구한다. 대부분의 간섭계는 간섭 무늬를 형성하기 위해 재결합되는 분리된 광학 경로로 구성된다. 경로의 하나의 암(arm)은 기준으로 유지되고, 다른 것은 샘플과 상호작용한다. 그리고 나서, 이들 두 구성으로부터의 간섭 신호는 스펙트럴 위상을 추출하기 위해 사용된다.

[0007] 미국 제6,985,232호는 대상을 광학적으로 조사하고 평가하기 위해, 위상-민감성 간섭계 광역 반사계를 기술한다. 이러한 기술에 따르면, 광대역 광학 빔은 프로브 빔과 기준 빔으로 분리되는데, 프로브 빔은 대상에 의해 반사되도록 안내되고, 프로브 빔이 대상에 의해 반사된 후에, 프로브 빔과 기준 빔은 다시 결합된다. 프로브 빔 또는 기준 빔이 이동한 경로의 길이는 측정 동안에, 사전결정된 범위 내에서 변조된다. 그리고 나서, 재결합된 빔의 분광 분석이 사전결정된 범위 내의 선택된 세트의 점을 기초로 파장 당 수행된다.

발명의 내용

[0008] 본 기술 분야에서, 측정 신호 내에서 바람직하게 높은 신호-대-잡음 비를 가진 효과적인 측정을 가능하게 하는, 신규의 위상 측정 기술에 대한 요구가 있다. 또한, 광학 시스템의 요소의 움직임에 대한 요구사항을 제거하거나 혹은 현저히 감소시키는 측정 시스템을 가지는 것이 바람직하다.

[0009] 본 발명은, 스펙트럴 간섭 시스템을 제공함에 의해, 스펙트럴 위상 측정을 위한 신규의 시스템 및 방법을 제공하는데, 스펙트럴 간섭 패턴은 스펙트럴 센서에 의해 검출되고, 이는 샘플 압과 기준 압 사이의 서로 다른 (적어도 두 개의) 광학 경로 차이(OPD)에 대응되는 복수의 (적어도 두 개의) 스펙트럴 간섭 특징의 형태이다. 일부 실시예에서, 이러한 스펙트럴 간섭 시스템은, 조명 및 검출 채널 내의 편광 필터링을 사용함에 의해, 교차-편광 기반의 측정을 사용한다. 본 발명의 일부 실시예에서, 스펙트럴 간섭 패턴(복수의 스펙트럴 특징)은 임의의 z-포지션, 즉, 샘플과 상호작용하는 프로브 광선과 기준 광선의 광학 경로 사이의 임의의 거리에서, 단일 노출(단일 측정)을 사용하여 얻어진다. 이와 관련하여, 다음 내용이 이해되어야 한다.

[0010] 상기 나타난 바와 같이, 스펙트럴 위상은 간섭 측정기를 사용하여 측정될 수 있다. 전통적인 간섭 기술은, 정확한 측정 결과를 달성하기 위하여, 경로 길이 차이의 엄격한 제어를 요한다. 호모다인 간섭계(homodyne interferometer)(위상 천이 간섭계와 같은)에서, 위상 정보의 완전한 복구는 여러 경로 길이 위상 천이를 사용하여, 측정의 연속(적어도 3번의 연속 측정)을 요한다. 이는 대개, 순차적인 측정 프로세스를 요하고, 측정 정확도는 시퀀스 동안에 설정 불안정성에 의해 어려워진다. 이러한 과제들은 백색광 간섭계에도 이어진다. 또한, 스위프트 소스(swept source), 수직/위상 스캐닝 및 복수-z 기술에 기초한 흔히 사용되는 기술은 전형적으로 순차적인 측정 프로세스를 사용한다.

[0011] 웨이퍼 계측 틀에서 적절한 시스템 안정성을 달성하는 것은 이하의 추가적인 요소 때문에 더욱 더 큰 과제이다. 대체로, 이러한 시스템은 높은 스루풋으로 복수의 점에서 샘플링 웨이퍼를 위해 높은 속도 움직임을 요한다. 이는 무겁고, 높은 가속도와 속도에서 고정밀 기계 작업을 시스템에 부가하는데, 이들과 관련된 문제점은 가령 진동, 정착 시간, 기류 및 난류 및 가열 및 냉각 사이클이다. 또한, 웨이퍼는 비교적 큰 샘플이고, 웨이퍼를 가로질러야하는(straddle) 큰 프레임 때문에 심지어 문제를 더 복잡하게 한다. 이는 더 높은 민감도를 가진 시스템을 열 팽창과 척 오염과 같은 장기적 효과는 물론 진동과 난류와 같은 단기적 효과에 노출시킨다. 마지막으로, 웨이퍼 스택 다양성과 가변성은 웨이퍼(광학 및 커패시티브 센서 모두에 대해)로부터 원치않은 복잡도를 추가하여, 시스템으로 절대 높이(z) 측정에서의 천이를 유도한다.

[0012] 상기 관점에서, 임의의 Z 값에서 단일 노출을 사용하여 전체 스펙트럴 위상 복구를 가능하게 하는 간섭계를 가지는 것이 바람직하다.

[0013] 본 발명은 광대역('백색광') 및/또는 스펙트럴 위상을 측정하는 위상-천이 간섭계를 사용하는데 있어 여러가지 주된 어려움을 해결하여, 물질 광학 속성 조사는 물론 OCD 및 박막 계측을 수행한다.

[0014] 본 발명은 효과적인 교정 스킴과 데이터 분석 방법을 제공한다. 이하에 좀 더 구체적으로 기술될 바와 같이, 구체적인 교정은 측정된 신호에 대한 도미넌트 시스템-관련된 효과를 설명하는데 사용될 수 있다. 스펙트럴 위상 측정에 있어서, 요구되는 데이터를 추출하기 위한 사용을 위해 어떤 측정된 속성을 선택하는지에 대해서는 자유가 있다. 발명자는 계산식과 비교를 위한 양의 정확한 선택에 의하여, 민감도를 현저히 개선하고 강건한 측정을 얻을 수 있다는 것을 나타내었다.

[0015] 또한, 본 발명은 스펙트럴 반사계 데이터의 분석에서 시스템-관련된 효과를 설명하기 위해 알고리즘적인 접근법을 제공한다. 예를 들어, 발명자는, 간섭계 방법의 사용도를 제한하는 주된 요소들 중 하나인 진동 민감도가 어떻게 정확한 알고리즘 처리를 사용에 고려되는지를 나타내었다.

- [0016] 상기 나타낸 바와 같이, 본 발명은, 전체 스펙트럴 위상을 얻을 수 있는 백색광 간섭계에 기초하고, 교차-편광 스킵 및/또는 임의의 z (광학 축을 따른 치수)에서 단일 도출을 사용하여, 스펙트럴 위상 측정의 고유한 실행을 구성하는 것을 제공한다. 단일 도출은 시스템 면적이, 순차적인 측정을 위태롭게 하는 일시적인 불안정 효과에 처하도록 한다. 대부분의 백색광 간섭계에서 일반적이듯이, 단일 측정의 높이 모호성(height ambiguity)은 측정된 데이터(가령, 언래핑(unwrapping))에 대한 수학적 변환을 수행함에 의해, 및/또는 높이의 추정된 값의 사전 지식에 의해 보상될 수 있다. OCD의 기술 분야에서, 검사하의 구조물이 대개 그 치수 안에서 일부 가변성까지 알려지게 되므로, 이러한 사전 지식은 대부분 사용가능하다. 본 발명은 단일-도출 위상 측정(이는 필요하다면 추가적이 측정으로 확장될 수 있음)을 달성하기 위한 여러 방법을 제공한다. 이들 방법은 분광 사진 백색광 간섭계, 스펙트럴 헤테로다인 백색광 간섭계, 위치-의존적인 스펙트럴 백색광 간섭계를 포함한다.
- [0017] 본 발명은 여러 간섭 측정에 기초한 스펙트럴 위상 측정을 위한 방법도 제공한다. 이러한 경우에, 구체적으로 설계된 알고리즘은 여러 데이터 세트를 고려함과 잡음 효과를 효과적으로 캔슬(cancel)함에 의하여, 정확한 위상을 추출하는데 사용된다. 서로 다른 (OPD의) 광학 경로 차이 또는 z 스캔 동안에 이들 측정을 취할 수 있다.
- [0018] 본 발명은 많은 OPD에서 동시에 간섭 측정을 할 수 있는 측정 스킴을 포함하고, 이에 의해, 더 우수한 잡음 캔슬을 달성한다.
- [0019] 측정 방법에 추가로, 본 발명은 측정된 데이터를 정확하고 강건한 분석을 가능하게 하는 여러 알고리즘 방법을 제공한다. 이들 방법은 간섭 측정에 의한 과제를 구체적으로 맞춤 해결할 수 있다.
- [0020] 측정된 데이터의 프로세싱은 측정된 데이터와 이론적 모델 사이의 맞춤 절차(fitting procedure)를 포함한다. 전형적으로, 맞춤 프로세스는 메리트 함수(merit function) 정의를 포함한다. 메리트 함수는 계산된(이론적) 데이터와 측정된 데이터 사이의 맞춤 정도의 측정이다. 메리트 함수는 측정 데이터 조각과 계산 데이터 조각 사이의 RMS 에러일 수 있는데, 여기서, 동시에 측정 데이터 조각과 계산 데이터 조각의 각각은 반사된 세기(I)와 위상(ϕ)의 형태이다. 예를 들어, 반사된 세기와 위상의 각각은 측정, 편광 및 입사각\반사각에서 사용되는 파장(λ)의 함수일 수 있다. 다른 타입의 데이터가 제시되고, 가령, 측정된 위상의 콤플렉스 전기장 성분 또는 사인/코사인으로 해석될 수 있다.
- [0021] 간섭측정은 위상 측정을 위한 가장 간단한 방법을 제공하는데, 이하에 기술된 본 발명의 방법들 중 하나는 이러한 목적을 위한 시간-의존적인 측정을 사용하는 것과 관련된다. 이러한 접근법은 간섭 측정에 의해 도입되는 많은 어려움을 우회한다.
- [0022] 그러므로, 본 발명은 OCD 적용을 위한 스펙트럴 위상 측정법을 제공한다. 본 발명의 기술은, 오직 두께와 z 관련 측정을 위해 전형적으로 사용되는 전통적인 간섭측정에 비해, 구체적으로 CD 측정을 위해 사용될 수 있다. 본 발명은 위상 추출의 스펙트럴 성질 또는 소위 "간섭측정 스펙트럼"을 사용한다. 본 발명의 기술은, 편광된 스펙트럴 위상 측정법은 물론, 스펙트럴 위상 측정법을 위한 모델 기반의 솔루션을 제공하고, 스펙트럴 위상 측정치와 정규의 스펙트럴 반사계(Spectral Reflectometry, SR)를 결합할 수 있다. 바람직하게, 본 발명의 측정 기술은 자동 광학 조사(AOI) 시스템에서 통합될 수 있어서, 수직 및/또는 경사 입사 모드를 사용할 수 있다.
- [0023] 따라서, 본 발명의 하나의 넓은 양태에 따르면, 패턴화된 샘플의 파라미터를 측정하는데 사용하기 위한 측정 시스템이 제공되는데, 상기 시스템은, 광역 광 소스, 간섭 시스템으로서 구성된 광학 시스템, 검출 유닛 및 제어 유닛을 포함하되, 상기 간섭 시스템은 기준 반사기를 포함하는 기준 암 및 샘플 암을 가진 조명 및 검출 채널을 형성하고, 샘플 암과 기준 암 사이의 광학 경로 차이를 유도하도록 구성되며, 상기 검출 유닛은 상기 반사기로부터 반사된 광선 및 샘플의 지지부로부터 전파되는 광선에 의해 형성된 결합된 광선을 검출하고, 적어도 두 개의 스펙트럴 간섭 특징에 의해 형성된 스펙트럴 간섭 패턴을 나타내는 측정된 데이터를 생성하도록 구성되고 작동되며, 상기 제어 유닛은 샘플 내의 패턴의 하나 이상의 파라미터를 결정하기 위해, 측정된 데이터를 수신하고, 모델-기반의 프로세싱을 스펙트럴 간섭 패턴에 적용하도록 구성되고 작동된다.
- [0024] 일부 실시예에서, 간섭 시스템은 조명 및 검출 채널 내에 편광기를 포함한다.
- [0025] 간섭 시스템은 샘플 암과 기준 암 사이의 광학 경로 차이를 유도하기 위한 메카니즘을 포함한다. 일부 실시예에서, 반사기와 샘플 모두가 광학 축에 수직으로 배향되면서, 이러한 OPD 유도 메카니즘은 상기 반사기와 샘플의 지지부 중 하나 또는 모두를 간섭 시스템의 광학 축을 따라 제어적으로 이동시키기 위한 구동 유닛을 포함한다.
- [0026] 일부 다른 실시예에서, 이러한 OPD 메카니즘은 반사기 및/또는 샘플을 이동시킬 필요없이 실행된다. 이는 샘플의 지지부와 반사기 중 적어도 하나를 간섭 시스템의 광학 축에 대해 결사지고 고정된 위치로 배향함에 의해 달

성된다. 또 다른 예시에서, OPD 메카니즘은 반사기를 향해 기준 압을 따라 전파되고 조명되는 광선에 디포커싱 효과(defocusing effect)를 유도함에 의해, 가령, 반사기를 간섭 시스템의 대물 렌즈 유닛의 초점면으로부터 이격되고 이와 평행한 평면에 위치시킴에 의해, 실행된다. 어떠한 요소의 움직임 없이 OPD 메카니즘을 실행하기 위한 또 다른 예시는 반사기를 역반사 어셈블리로 구성함에 의한다.

[0027] 일부 실시예에서, 광 소스는 초단파 펄스의 형태인 조명을 생성하도록 구성되고 작동된다.

[0029] *

[0030] *본 발명의 또 다른 넓은 양태에 따르면, 패턴화된 샘플의 파라미터를 측정하는데 사용하기 위한 광학 시스템이 제공되는데, 상기 광학 시스템은 기준 반사기를 포함하는 기준 압 및 샘플 압을 가진 조명 및 검출 채널을 형성하는 스펙트럴 간섭 시스템으로 구성되고, 샘플 압과 기준 압 사이의 광학 경로 차이를 유도하도록 구성되어서, 검출 채널을 따라 분광계로 전파하는 결합된 광선은, 상기 반사기로부터 반사된 광선 및 샘플로부터 전파되는 광선에 의해 형성되고, 적어도 두 개의 광학 경로 차이에 대응되는 적어도 두 개의 스펙트럴 간섭 특징에 의해 형성된 스펙트럴 간섭 패턴을 나타낸다.

[0031] 본 발명의 또 다른 양태에 따르면, 패턴화된 샘플의 파라미터를 측정하는데 사용하기 위한 방법에 있어서, 상기 방법은,

[0032] 샘플 압과 기준 압을 가진 간섭 광학 시스템을 통해 광대역 광을 안내하는 단계 - 샘플 압과 기준 압 사이에 광학 경로 차이가 있음 - 와,

[0033] 기준 압 내의 반사기로부터 반사된 광선 및 측정하의 샘플로부터 전파되는 광선에 의해 형성된 결합된 광선을 검출하고, 적어도 두 개의 스펙트럴 간섭 특징에 의해 형성된 스펙트럴 간섭 패턴을 나타내는 측정된 데이터를 생성하는 단계와,

[0034] 모델-기반의 프로세싱을 스펙트럴 간섭 패턴에 적용하여서, 샘플 내의 패턴의 하나 이상의 파라미터를 결정하는 단계를 포함한다.

도면의 간단한 설명

[0035] 본 명세서에 개시된 주제를 더욱 잘 이해하고, 실제로 어떻게 실행되는지 예시화하기 위하여, 첨부 도면을 참조하여 비제한적인 예시에 의하여, 실시예가 이제 기술될 것이다.

도 1a는 스펙트럴 간섭계 시스템으로 구성되는 본 발명의 측정 시스템을 개략적으로 나타낸다.

도 1b 및 1c는 틸팅된 기술분야(틸팅된 거울 또는 샘플)를 사용하는 본 발명의 측정 시스템의 둘 이상의 예시를 개략적으로 나타낸다.

도 1d는 2D 센서에 의해 검출된 간섭 패턴을 나타낸다.

도 2a 내지 2d 및 3a 내지 3c는 프로브와 기준 빔의 광학 경로 사이의 광학 경로 차이(OPD) 제어의 서로 다른 실행예의 원리를 나타내는데, 도 2a 및 3a는 기준 거울 또는 샘플의 틸팅(tilting)을 사용하는 틸팅된 기술 분야 실시예에 대한 컨피규레이션과 스펙트로그램을 예시화한 것이고, 도 2b 및 3b는 디포커스된(defocused) 기준 빔 실시예에 대한 컨피규레이션과 스펙트로그램을 예시화한 것이며, 도 2c-2d 및 3c는 역반사의 사용에 대한 컨피규레이션과 스펙트로그램을 예시화한 것이다.

도 4는 간섭 및 비간섭 스펙트라를 나타낸다.

도 5a 내지 5c는 두 개의 z 위치에서 간섭 스펙트라에 대해 측정된 데이터의 위상 교정(도 5a), 맞춤되고 측정된 스펙트라들 사이의 차이(도 5b), 및 광학 시스템을 특징짓는 최적화된 위상 함수(도 5c)를 나타낸다.

도 6은 본 발명의 스펙트럴 간섭계에 의해 얻어진 구조적 파라미터에 대한 예시를 나타낸다.

도 7은 실리콘 웨이퍼상의 실리콘-산화물 라인(~1800Å 라인 너비, 1800Å 트렌치 너비, 3000Å 라인 높이)의 그레이팅(grating)으로부터 기록된 측정된 스펙트라를 나타낸다.

도 8은 저주파수 신호('엔벨로프')와 CW 캐리어를 곱하여, 헤테로다인 신호(heterodyne signal)를 제공하는 것을 나타낸다.

도 9는 완벽한 거울 샘플 및 기준으로부터의 간섭 스펙트럼에 대한 시뮬레이션 결과(계산된 헤테로다인 간섭 신호

호)를 나타낸다.

도 10은 캐리어(아래)보다 주파수 공간(이 경우에 'z') 내의 영역을 차지하는 대역폭-제한된 신호(위)를 도시하는 헤테로다인 스킨을 나타낸다.

도 11은 z 공간 내의 헤테로다인 검출을 나타낸다.

도 12는 헤테로다인 방법론을 실행이 가지는 실제적인 어려움을 나타낸다.

도 13은 3-위상 캐리어에 의해 관심 신호의 샘플링을 나타낸다.

도 14는 회절 제한된 간섭계와 샘플 그레이팅(grating)에 대한 z 공간 내의 코히런스 함수를 나타낸다.

도 15a 및 15b는 샘플 및/또는 기준 거울을 틸팅하여, 위치-의존적인 무늬를 생성하는 효과, 및 백 초점면(BFP) 이미징을 사용하여, 샘플/기준 거울의 디포커싱과 결합되는 효과를 각각 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0036] 본 발명의 측정 시스템의 예시를 개략적으로 나타내는 도 1a를 참조하는데, 이는 패턴의 파라미터의 결정을 할 수 있도록 패턴화된 구조물(가령, 반도체 웨이퍼)로부터 되돌아온(반사된 및/또는 산란된) 광의 스펙트럴 위상을 측정할 수 있는 스펙트럴 간섭계 시스템으로 구성된다.

[0037] 이하에 기술된 도 1b 및 1c의 예시는 물론, 도 1a의 구체적이나 비제한적인 예시에서, 시스템은 수직 입사 모드(normal incidence mode)와 밝은 부분 측정 모드(bright field measurement mode)로서 작동하도록 구성되는 것으로 예시화된다는 것에 유의해야 한다. 그러나, 본 발명은 이러한 컨피규레이션으로 제한되지 않고, 일반적으로, 측정은 임의의(경사 또는 그 밖의 다른) 입사 각도 모드(angle-of-incidence mode)로 획득될 수 있음은 물론, 어두운 부분 측정 모드(dark-field measurement mode) 또는 밝은 부분 측정 모드와 어두운 부분 측정 모드의 조합을 사용할 수 있다는 것을 이해해야 한다. 게다가, 도 1a를 참조하여 이하에 기술될 바와 같이, 시스템은 원칙적인 수직-입사 밝은 부분 컨피규레이션을 가지지만, 편광-기반 어두운 부분 측정 모드를 실행할 수 있다.

[0038] 측정 시스템은 일반적인 스펙트럴 반사계 컨피규레이션에 기초하는데, 여기서, 샘플 반사도는 정확하게 측정되거나 본 발명에 따른 간섭 측정법을 사용하여 수정된다. 좀 더 구체적으로, 측정 시스템은, 일반적으로 도 1a에서 10으로 표시하고, 프로브 광선 및 기준 광선(L_p 및 L_r)을 포함하는 광대역 입력 광(L_{in})을 제공하는 광 소스(14), 검출 유닛(16) 및 광을 안내하기 위한 광 안내 장치로 구성된 광학 시스템(20)을 포함하되, 상기 광은 샘플의 지지부(12) 상에 위치한 측정하의 샘플/구조물을 향하고, 광학 경로 차이 유도 메카니즘(28)(본 예시에서는 평면 거울)을 향하여 검출 유닛(16)으로 되돌아온다.

[0039] 도 1a의 예시에서, 이러한 평면 거울은 고아학 시스템(20)의 광학 축에 수직인 평면(즉, "틸팅되지 않은 거울")에 위치되고, 광학 축을 따라 이동되거나 이동되지 않을 수 있다. 또한, 도 1a의 예시에서, 검출 유닛(16)은 그 위에 입사 광의 스펙트럴 데이터를 생성하기 위한 분광계(스펙트로포토미터, 19B)를 포함하고, 또한, 선택적으로, 구조물 상의 측정 위치로 네비게이트(navigate)하기 위한 이미징 검출기(19A)를 포함할 수 있다. 검출 유닛(16)의 출력은 (무선 또는 유선 신호 통신을 통해) 제어 유닛(30)과 통신된다.

[0040] 광학 시스템(20)은 광 소스(14)로부터의 입력광(L_{in})을 구조물 평면(12)을 향하여 전파시키는 조명 채널 및 측정된 광(L_{meas})을 검출 유닛(16)으로 전파시키기 위한 검출 채널을 형성하도록 구성된다. 입력광(L_{in})은 프로브 빔(L_p)과 기준 빔(L_{ref})으로 분리되고, 측정된 광(L_{meas})은 구조물(12) 상의 조명 영역으로부터 프로브 빔(L_p)의 반사(산란)(L'_p) 및 기준 거울(28)로부터 반사된 광(L_r)을 포함한다.

[0041] 광학 시스템(20)은 입력광(L_{in})과 측정된 광(L_{meas}) 사이를 공간적으로 분리시키기 위해 구성되는 빔 스플리터/컴바이너(22) 및 대물 렌즈 유닛(24)(하나 이상의 렌즈)을 포함한다. 수직 입사 및 밝은 부분 검출 모드를 사용하는 시스템 컨피규레이션의 본 예시에서, 이들 유닛(22 및 24)은 조명 및 검출 채널 모두에 위치된다. 광 안내 장치(20)는 또한, 조명 채널 내에 시준 렌즈(21)를 선택적으로 포함하는데, 이는 광 소스로부터 빔 스플리터(22)를 향하여 전파되는 입력광(L_{in})의 광학 경로 내에 있고, 검출 채널 내의 튜브 렌즈(23)는 검출 유닛으로 전파되는 측정된 광의 광학 경로 내에 있다.

- [0042] 광학 시스템(20)은, 입력광(L_{in})을 프로브 빔(L_p)과 기준 빔(L_r)으로 분리시키고, 이들을 샘플 암을 따라 구조물(12)을 향해 안내하고, 기준 암을 따라 기준 거울(28)을 향해 각각 안내하는 빔 스플리터/컴바이너(26)를 더 포함한다. 거울(28)은 기준 빔(L_r)을 반사시켜서, 빔 스플리터/컴바이너(26)로 되돌아오게 하고, 여기서, 기준 빔은 구조물(12) 상의 조명 영역으로부터의 프로브 빔(L_p)의 반사(산란)(L'_p)과 결합되어서, 측정/검출될 결합된 광선(L_{meas})으로 된다. 결합된 광선은 검출 유닛(16)으로 전파되고, 즉, 물체(24) 및 빔 스플리터(22)를 지나고, 추가로 튜브 렌즈를 통해, 검출 유닛(16)의 분광계(19B) 상에 상기 결합된 광선이 초점 맞춰진다.
- [0043] 본 발명에 따르면, 도 1a의 본 예시에서, 광학 시스템(20)은 조명 및 검출 채널에 각각 위치한 편광기(32 및 34)를 포함한다. 좀 더 구체적으로, 광 소스(14)로부터의 입력광(L_{in})은 편광기(32)를 지나고, 특정하게 편광된(가령, 선형으로 편광됨) 입력광(L_{in})_{pol}은 빔 스플리터/컴바이너(26)에 의해 물체(24)로 안내되고, 상기 물체는 이를 빔 스플리터/컴바이너(26)로 안내한다. 후자는 편광된 입력광(L_{in})_{pol}을 프로브 편광된 빔(L_p)과 기준 편광된 빔(L_r)으로 분리시키고, 이들을 지지부(12) 상의 구조물과 기준 거울(28)로 각각 안내한다. 구조물 및 거울로부터의 반사(L'_p 및 L_r)는 빔 스플리터/컴바이너(26)에 의해 결합되어서 상기 특정한 편광을 가진 결합된 광선(L_{meas})으로 되고, 이는 물체(24) 및 빔 스플리터(22)를 지나서 편광기(34)로 가고, 이는 상기 특정 편광의 광(L_{meas})_{pol}을 검출 유닛으로 전파하도록 한다. 이러한 결합되고 편광된 광선은 빔 스플리터(29)에 의해 광 부분들(L_{meas})₁ 및 (L_{meas})₂로 나누어지고, 이들은 각각 이미징 검출기(19A)와 스펙트럴 센서(분광계(19B))로 각각 안내된다. 분광계(19B)는 모든 파장의 세기를 별도로 측정하고, 이에 따라 분광계에 의해 생성된 측정된 데이터는 스펙트럴 간섭 패턴에 대응된다. 시스템(10)은, 거울(28) 및 샘플의 지지부(2) 중 하나 또는 모두와 관련되고, 이를 광학 축, 즉 z-축을 따라 제어적으로 이동시켜서, 스펙트럴 간섭 패턴의 시간 변화를 초래하는 광학 경로 차이를 유도하는 구동 유닛(33)도 포함한다. 상기 기술된 바와 같이 수용되고 배향된 편광기(32 및 34)를 사용하는 것은 교차-편광 스킴을 제공하고, 이는 어두운 부분 측정 모드를 야기한다는 것을 이해해야 한다. 거울(28)이 사용되지 않으면(즉, 입사 광의 광학 경로에서 나오거나 적절한 서터의 사용에 의해 비활성되면), 시스템(10)은 스펙트럴 반사계로서 작동할 수 있다는 것을 이해해야 한다. 따라서, 동일한 시스템(10)은 두 개의 서로 다른 동작 모드 사이에서, 스펙트럴 간섭계와 스펙트럴 반사계로서, 시프트될 수 있다.
- [0044] 제어 유닛(30)은 전형적으로 컴퓨터 시스템인데, 특히, 데이터 입력과 출력 유틸리티(30A)로서 유틸리티(소프트웨어/하드웨어), 메모리(30B), 데이터 프로세서(30C) 및 광학 경로 차이 제어기(30D)를 포함한다. 또한, 이하에 추가로 기술될 바와 같이, 교정 유틸리티(30E)도 제어 유닛 내에 선택적으로 제공된다.
- [0045] 이제, 본 발명의 스펙트럴 간섭계의 일부 다른 예시를 나타내는 도 1b - 1d를 참조한다. 이해를 돕기 위해, 동일한 참조 번호는 모든 예시에서 공통된 구성을 식별하는데 사용된다. 이들 비제한적인 예시에서, 시스템의 정적으로 장착된 구성, 즉, 거울 및/또는 샘플의 지지부가 고정된 위치에서 유지되나 광학 축에 대해 틸트(틸팅된 부분)되지만, 스펙트럴 간섭 시스템은 광학 경로 차이를 유도하기 위해 서로 다른 원리를 사용한다. 이러한 틸팅된 부분 접근법은 상기 기술된 조명 및 검출 채널의 편광-기반의 컨피규레이션과 결합될 수 있다는 것에 유의해야 한다.
- [0046] 따라서, 도 1b의 예시의 시스템(100)은 일반적으로 도 1a의 예시와 유사하게 구성되나, 시스템(100) 내의 광학 시스템(120)은, 광학 시스템(20) 내에서 사용되는 틸팅되지 않은 가동성 또는 정적인 거울(28)이 틸팅된 거울(128)에 의해 광학 시스템(120)에서 대체된다는 점에서, 시스템(10)의 광학 시스템(200)과 상이하다. 또한, 도 1b에서, 이미징 센서(도 1a 내의 19A)가 도시되지 않고, 이에 따라 빔 스플리터(도 1a의 29)도 도시되지 않는다. 상기 나타난 바와 같이, 편광기가 도 1b에 도시되지 않더라도, 이는 시스템(100) 내에서 사용될 수 있다. 도 1c 내에 도시된 시스템(200)은, 이미징 및 스펙트럴 센서에 의해 형성된 두 개의 검출 채널을 포함하고, 광학 시스템(220)(광 안내 장치)이 빔 스플리터(29)를 포함한다는 점에서, 일반적으로 도 1a의 시스템(10)과 유사하게 구성된다. 그러나, 도 1b의 것과 유사한 이러한 시스템(200)은 틸팅된 거울(128)을 가진다. 도 1c의 예시에서, 편광기(미도시)는 사용되거나 사용되지 않을 수 있다.
- [0047] 또한, 시스템(100)(도 1b) 및 시스템(200)(도 1c)에서, 검출 유닛(16)은 2D 분광계(18)를 포함한다. 이에 따라, 도 1b 및 1c의 예시에서 각각 광학 시스템(120 및 220)은, 도 1b에는 도시되지 않지만, 도 1c에 구체적으로 도시되는 바와 같이, 원통형 튜브 렌즈(123 및 223) 및 분광계 검출 채널 내의 회절 그레이팅을 포함한다.
- [0048] 따라서, 도 1b 및 1c에 예시화된 본 발명의 일부 실시예에 따라, 프로브 빔(L_p)과 기준 빔(L_r)의 광학 경로 사이

의 광학 경로 차이(OPD)는 임의의 광학 요소의 이동 없이 생성된다. 이는 이하의 정적으로 장착된 장치들 중 하나를 제공함에 의해 달성되는데, (1) 틸팅된 거울 또는 틸팅된 샘플의 지지부, (2) 가령, 초점면(물체의 초점면에 평면 컨주게이트(plane conjugate))으로부터 이격된 평면에 틸팅되지 않은 거울을 위치시킴에 의한, 기준 빔상의 디포커싱 효과를 유도함, 또는 (3) 기준 빔으로 필드 시프트(field shift)를 유도함, 즉, 역반사 어셈블리(플립)로서 거울을 컨주게이트함에 의해 틸팅된 필드/이동된 필드이다.

[0049] 도 1b 및 1c의 예시에서, 틸팅된 평면 거울 실시예가 도시된다. 이러한 옵션과 그 밖의 다른 옵션이 이하에 추가로 더욱 자세히 기술될 것이다.

[0050] 따라서, 광 소스(14)로부터의 입력광(L_{in})은 틸팅된 거울(128)이 위치한 기준 압과 샘플 압 사이에서 분리된다. 기준 거울(128)로부터 반사된 광(L_r)은 샘플로부터의 광 반사(L'_p)와 빔 컴바이너(26)에서 결합되고, 검출 유닛으로 안내된다. 도 1c에 구체적으로 더욱 도시된 바와 같이, 스펙트럴 센서(18)는 2D 센서이고, 스펙트럴 센서로 안내되는 결합된 광선(L_{meas})의 일부(L_{meas})₂는 바람직하게는, 원통형 튜브 렌즈(223) 및 회절 그레이팅(36)을 통해 전파된다. 정적인 기준 거울(128) 때문에, 서로 다른 OPD에 대응하는 신호는 하나의 축을 따라 2D 센서에 의해 검출되지만, 다른 축은 스펙트럴 신호 해석이다. 거울(128)이 틸팅되고, 샘플이 틸팅되지 않기 때문에, 추가적인 z 스캔과의 간섭과 유사하게, 모든 간섭 라인은 서로 다른 OPD에서 발생한다. 평면 거울이 틸팅되지 않지만(즉, 광학 축에 수직임), 구조물이 틸팅된 지지부 상에 위치된다면, 동일한 것을 얻는다는 것을 이해해야 하는데, 즉, 거울이나 샘플을 틸팅함에 의해 OPD는 기준 경로 또는 측정 경로에서 유도된다. 간섭 패턴이 도 1d에서 나타난다.

[0051] 거울 틸팅은 미리 교정되고, 이에 따라 스펙트로그래프상의 공간 축은 완전히 교정되고, 모든 라인은 알려진 OPD를 나타낸다는 것에 유의해야 한다. 간섭 측정은 진동에 매우 민감하고, 복수의 z 측정을 사용하는 간섭 시스템은 연속적인 측정 사이에서 드리프트(drift)와 진동 변화에 처한다는 점도 유의해야 한다. 상기 기술된 본 발명의 실시예의 원리를 사용하는 것은(즉, 기준 압 내의 거울을 움직이지 않으면서 z-스캔을 획득함) 좀 더 안정한 스펙트로그래프 스킨을 제공하는데, 왜냐하면, 모든 z 측정이 동시에 취해져서(단일 이미지), 드리프트와 진동을 공유하기 때문이다.

[0052] 프로브 빔과 기준 빔의 광학 경로 사이의 광학 경로 차이(OPD) 제어의 세 개의 서로 다른 실행의 원리를 나타내는 도 2a - 2d 및 도 3a - 3c가 참조된다.

[0053] 도 2a의 예시에서 나타난 바와 같이, 기준 거울 또는 샘플을 틸팅하는 것(또는 일반적으로 틸팅된 필드)은 (Z-축 또는 시스템의 광학 축을 따라) 다음과 같이 결정된 OPD를 생성하는데,

[0054]
$$\Delta z = x \cdot \tan \theta$$

[0055] 여기서, θ 는 틸트 각도이고, x는 샘플 평면 내의 대응되는 치수이다.

[0056] 도 1b 및 1c로 되돌아와서, 이러한 컨피규레이션은 필드 내의 무늬 선을 제공하는데, 여기서,

[0057]
$$\tan(\text{IFOV}) \cdot \theta = 1 \text{ Fringe}$$

[0058] 이다.

[0059] 도 3a는 도 2a의 Tilted Field Shear 컨피규레이션에 대해 측정된 스펙트로그램(위) 및 교차 무늬(cross fringe)의 시프트에서의 위상의 효과(아래)를 나타낸다.

[0060] 디포커스된 기준 빔이 사용되는 도 2b의 예시에서, OPD는 다음과 같이 결정된다.

[0061]
$$\Delta z = h \cdot \cos \theta = h \cdot (1 - S^2)^{1/2}$$

[0062] 여기서, S = sin θ 이고, h는 디포커스(defocus)이다.

[0063] 도 3b는 도 2b의 Defocus Pupil Shear 컨피규레이션에 대해 측정된 스펙트로그램(위) 및 교차 무늬(cross fringe)의 시프트에서의 위상의 효과(아래)를 나타낸다.

[0064] 도 2c 및 2d의 컨피규레이션은 S가 필드(pupil)에서 일정하고, 필드를 따라 선형 무늬(linear fringe)가 얻어진다는 것을 제공한다.

$$1/2NA \cdot Shift = 1 Fringe$$

[0065]

[0066] NA는 개구수이고, OPD는 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta z = S \cdot \Delta x,$$

[0067]

[0068] 여기서 Δx 는 디포커스이다.

[0069]

도 3c는 도 2c 및 2d의 Tilted Pupil Shear 컨피규레이션에 대해 측정된 스펙트로그램(위) 및 교차 무늬(cross fringe)의 시프트에서의 위상의 효과(아래)를 나타낸다.

[0071]

*

[0072]

*볼 수 있는 바와 같이, 필드 시어(field shear) 컨피규레이션(도 2a)은 가장 간단한 옵션으로 보인다. 디포커스 시어(defocus shear) 컨피규레이션(도 2b)은 높은 NA 물체가 사용된다면, 더 작은 Δz (더 적은 스펙트럴 무늬)로 동작할 수 있다. 필드 시어(pupil shear) 컨피규레이션(도 2c 및 2d)에서, 이상적인 무늬 형태(선형 또는 프레넬)에서 어떠한 벗어남은 NA에서 위상 변이를 추정하는데 사용될 수 있다.

[0073]

일반적으로, 스펙트럴 간섭계로 측정된 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$|I_k(p, z)|^2 = F_{\Omega} \{ |S_k(p, \Omega) + R_k(\Omega) \cdot \exp(ikz)|^2 \} \quad (1)$$

[0074]

[0075] 여기서, $S_k(p)$ 는 샘플로부터 반사된 콤플렉스 전기장이고, R_k 는 기준 거울로부터 반사된 전기장이며, k 는 파장 벡터이다. 장은 파장 벡터(진폭 및 방향)의 함수이고, 샘플의 파라미터(p)(가령, 구조, 두께, 광학 속성등)의 함수이다. 심볼 Ω 는 광학 개구수, 편광, 진동, 광학 수차(optical aberration) 등과 같은 다양한 시스템 파라미터를 구성한다. 함수 F_{Ω} 는 다양한 시스템 파라미터(Ω)에 걸쳐 합산을 위한 수학적 연산자를 나타낸다.

[0076]

식 (1)에서 볼 수 있는 바와 같이, 간섭 신호 $|I_k(p, z)|$ 는 샘플 파라미터(p)뿐만 아니라 샘플과 기준 거울 사이의 광학 거리(z)에도 의존한다.

[0077]

도 4는 간섭 및 비간섭 스펙트라를 나타낸다. 간섭 스펙트라($S_{int}^{(1)}$ 및 $S_{int}^{(2)}$)가 서로 다른 샘플 위치(z_1 및 z_2)에 대해 광학 축을 따라서, 각각 간섭 스펙트rometer 설정을 사용하여 측정되고, 비간섭 스펙트라($S_{int}^{(1)}$ 및 $S_{int}^{(2)}$)는 간섭계 암들 중 하나를 막으면서, 샘플 및 기준에 대해 각각 측정된다. 그래프에서 볼 수 있는 바와 같이, 기준 거울에 대해 서로 다른 위치위치(z_1 및 z_2)에 샘플을 위치시킬 때, 신호 변화는 현저하다.

[0078]

기준 반사율(R_k)은 콤플렉스이고, 다음과 같이 재기재될 수 있다.

$$R_k = |R_k| \cdot \exp(i\phi_k)$$

[0079]

[0080] 여기서, ϕ_k 는 "교정 위상"이라고 한다.

[0081]

측정된 목표로부터 반사된 신호를 정확하게 분석하기 위하여, 우선 기준 거울의 진폭과 위상을 정확하게 특징짓는 것이 필수적이다.

[0082]

진폭 $|R_k|$ 은 가령, 시스템으로부터 샘플을 간단히 제거함에 의해 발견될 수 있어서, 식 (1)은 거울 진폭 반사율의 제곱으로 감소된다(도 4에서 곡선 R_{non}). 그러나, 교정 위상은 이러한 측정으로 숨겨진다. 위상 교정은 시스템 내의 잘 특징지어진 샘플(원시 실리콘과 같은)을 위치킴에 의해, 그리고 간섭 신호를 측정함에 의해 수행될 수 있다. 이와 관련하여, 두 개의 z 위치에서 간섭 스펙트라에 대해 측정된 데이터의 위상 교정(도 5a), 맞춤형 스펙트라와 측정된 스펙트라 사이의 차이(도 5b), 및 광학 시스템을 특징짓는 최적화된 위상 함수(도 5c)를 나타내는 도 5a - 5c를 참조한다.

[0083] 좀 더 일반적으로, 계측 성능을 최적화시키기 위해, 기준 거울의 속성을 제어할 수 있다. 이하에 기술될 바와 같이, 간섭 신호 민감도는 샘플과 기준 거울 사이의 상대적인 위상은 물론, 이들의 상대적인 진폭에도 의존한다. 최적의 성능을 위한 거울 재료/구조를 변경시키거나, 및/또는 적합하게 변경된 거울 반사도로 여러 측정치를 얻을 수 있다(가령, 인쇄된 패턴을 가진 거울을 사용하기, 및 거울의 반사도를 변경시키기 위해 회전하기).

[0084] 이러한 측정에서 교정 위상을 추출하기 위하여, 발명자는 측정된 스펙트라와 계산된 스펙트라(이론적, 모델-기반의 데이터)간의 차이를 다음과 같이 생각한다.

(2)

$$M_k(\varphi_k, z) = F_{\Omega} \left\{ \left| S_k(\Omega) + |R_k(\Omega)| \cdot \exp(i\varphi_k) \cdot \exp(ikz) \right|^2 \right\} - |I(z)|^2$$

[0085] 여기서, $|I(z)|^2$ 는 측정된 스펙트라이고, 상기 식의 $F_{\Omega} \{ |S_k(\Omega) + |R_k(\Omega)| \cdot \exp(i\varphi_k) \cdot \exp(ikz) |^2 \}$ 항은 알려진 샘플의 반사율, 기준 거울 및 적분 연산자에 따라 계산된다. 최적화된 알고리즘은 위상 함수(φ_k) 및 z 위치를 찾는 데 사용되어서, $|M_k(\varphi_k, z)|$ 가 최소로 된다.

[0087] 잡음 감소나 더 우수한 최적화를 위해, 하나의 z 위치 또는 다양한 위치에서 단일 측정을 사용할 수 있다.

[0089] *이러한 접근법은 더 우수한 교정과 최적화를 위해 여러 교정 타겟으로 연장될 수 있다. 이러한 접근법은, 완전한 스펙트럴 범위에 대한 정확한 교정을 위해 특히 중요할 수 있다.

[0090] 도 5b는 도 5c에 도시된 최적화 함수(φ_k)에 대한 여러 스펙트럼 $M_k(\varphi_k, z)$ 을 나타낸다. 정말로, 이러한 함수가 광학 시스템에 의해 유도된 위상을 특징짓는다고 가정하면, 나머지 에러는 무시할만 하다.

[0091] 교정 단계에서, M_k 에 대한 최적화에 더 잘 맞는 파라미터를 삽입하여서, 다양한 시스템 파라미터가 적분 연산자 $F_{\Omega}\{\}$ 로 도입될 수 있다는 것을 유의하는 것이 중요하다. 이들은 시스템 진동 프로파일, 개구수, 스펙트럴 스미어링(spectral smearing) 및 디-코히런스(de-coherence), 교정 샘플 및 거울 파라미터 등을 포함할 수 있다.

[0092] 스펙트럴 간섭계에 의해 측정된 샘플(가령, 반도체 샘플)에서, 그 구조적(기하형상 및 광학 속성) 파라미터(즉, OCD 계측)을 얻는다고 가정해 보자. 상기 표시된 바와 같이, 측정된 신호는 다음과 같이 주어진다.

(3)

$$|I_k(p, z)|^2 = F_{\Omega} \left\{ \left| S_k(p, \Omega) + R_k(\Omega) \cdot \exp(ikz) \right|^2 \right\}$$

[0094] 여기서, $R_k(\Omega)$ 와 F_{Ω} 은 이제 교정 측정(상기 묘사된 것 또는 다른 적절한 기술)에 의해, 완전히 특징지어졌다. 이제 다양한 메리트 함수(MF)가 정의되어서, 측정된 샘플을 특징짓는 구조적 파라미터(p)(CD, 높이, 측벽 각도, 두께, 물질 속성 등)를 얻기 위하여 최적화될 수 있다. 이러한 함수에 대한 예시는 다음과 같이 주어진다.

(4)

$$M_{\text{optical}}(p, z) = \sum_{\Omega} \left| F_{\Omega} \left\{ \left| T_k(p, \Omega) + |R_k(\Omega)| \cdot \exp(i\varphi_k) \cdot \exp(ikz) \right|^2 \right\} - |I(p, z)|^2 \right|$$

[0096] 여기서, $T_k(p, \Omega)$ 는 주어진 타겟 샘플의 계산된 콤플렉스 반사율이다.

[0097] 임의의 OCD 계측 절차에서와 같이, 이러한 메리트 함수(MF)는 계산된(이론적) 스펙트라와 측정된 스펙트라 간의 '적합도(goodness of fit)'에 대한 측정으로서 사용된다. 가장 잘 맞는 조건(최소의 MF)을 제공하는 적용 파라미터를 찾으면, 이들은 측정된 샘플을 특징짓는 것으로 식별된다. 메리트 함수(MF)의 최적화된 정의는 물론 가장 잘 맞는 조건을 제공하는 적용 파라미터의 세트를 검색하는 것은, W02011/104713의 예시에 기술된 바와 같이, OCD를 위해 사용되는 알고리즘 접근법에 기초할 수 있는데, 상기 출원은 본 출원의 양수인에게 양수되고, 본 명세서의 참조로서 포함된다. 대안적으로, 이하에 기술될 바와 같이, 메리트 함수 정의는 잡음에 대한 강건

성과 수렴 정확도(convergence accuracy)을 개선하기 위해 변경될 수 있다.

[0098] 표준 OCD를 위해, 흔히 사용되는 메리트 함수는 계산과 측정 사이의 RMS 에러와 관련되지만, 이러한 경우 그 정의에 추가적인 유연성이 있다. 가능한 대안적인(좀 더 진보된) 메리트 함수는 정규화되는데, 소위 코사인 메리트 함수이고, 이는 다음과 같이 주어진다.

[0099] (5)
$$M_{\cos}(p, z) = \sum_k |CT_k(p, z) - C_k(z)|$$
, 여기서,

[0100] (6)
$$CT_k(p, z) = \frac{F_{\Omega} |T_k(p, \Omega) + R_k(\Omega) \cdot \exp(i\phi_k) \cdot \exp(kz)|^2 - |S_k|^2 - |R_k|^2}{2|S_k||R_k|}$$

[0101] (6)
$$C_k(z) = \frac{|I_k(z)|^2 - |S_k|^2 - |R_k|^2}{2|S_k||R_k|}$$

[0101] 하나보다 많은 z 위치에서의 다양한 측정치와 다양함 메리트를 포함하는 일반적인 메리트 함수를 정의할 수 있다.

[0102] (7)
$$M_{total} = \sum_i \alpha_i M_i(z)$$

[0103] 본 발명의 스펙트럴 간섭계에 의해 획득된 구조적 파라미터에 대한 예시를 나타내는 도 6을 참조한다. 이는 Si 측정에 대한 SiO₂의 예시이다(얇은 실리콘-산화물이 있는 블랭크 실리콘 웨이퍼(~2963Å 두께). 여기서, 비간섭계 스펙트럼(곡선 S_{non})이 간섭계 스펙트럼(곡선 S_{int})와 함께 도시되고, 식 (6)에서 정규화된 코사인 스펙트럼 C_k(z)인 소위 코사인 스펙트럼(곡선 S_{norm})이 도시되며, 여기서, 실 곡선과 점 곡선은 측정된 스펙트라 및 계산된 스펙트라에 각각 대응된다. 정확한 산화물 두께 및 z 위치를 사용할 때, 이론적 스펙트라는 측정된 것과 매칭된다. 스펙트럴 차이를 최적화시킴에 의해, 실리콘-산화물 두께 및 z 위치를 획득할 수 있다는 것은 명백하다.

[0104] 상기 언급된 메리트 함수는 많은 가능한 메리트 함수 중에서 단지 일부에 불과하다. 간섭 측정으로부터 추출된 스펙트럴 위상 또는 측정된 콤플렉스 필드(실수 및 허수 부분)의 성분을 사용할 수 있다. 이들 엔티티는 이들의 모델링된 대응부(counterpart)와 비교될 수 있고, 샘플의 구조 파라미터를 찾는 데 사용될 수 있다.

[0105] 반도체 산업에서 관례적인(논-블랭킷 샘플을 포함함) 좀 더 복잡한 적용에는 잘 측정되고 분석될 수 있다. 실리콘 웨이퍼 상의 실리콘-산화물 라인(~1800Å 라인 너비, 1800Å 트렌치 너비, 3000Å 라인 높이)의 그레이팅으로부터 기록된 측정된 스펙트라를 나타내는 도 7을 참조한다. 도면에서, 실선 곡선과 점선 곡선은 측정된 스펙트라와 계산된 스펙트라에 대응되고, 곡선(S_{non}, S_{int} 및 S_{norm})은 비간섭계 스펙트럼, 간섭계 스펙트럼 및 정규화된 코사인 스펙트럼(식 (6)에서의 C_k(z))에 각각 대응된다. 여기서 다시, 정확한 구조적 파라미터(산화물 두께, 라인 간격, 라인 너비 및 z 위치)를 사용할 때, 이론적인 스펙트라는 측정된 것과 매칭된다.

[0106] 각각의 파장에 대한 간섭 신호를 별도로 측정하기 위한 분광계를 사용하는 대신에, 샘플과 기준 사이의 광학 거리(z)를 스캐닝 하면서, 무색의(achromatic) 검출기(가령, CCD 카메라) 상의 간섭을 측정하고 측정을 반복할 수 있다. 유사한 접근법이 백색광 간섭계에 사용되는데[Griffiths, P.; de Hasseth, J.A. (18 May 2007). Fourier Transform Infrared Spectrometry (2nd ed.). Wiley-Blackwell. ISBN0-471-19404-21], 여기서, IR 내의 스펙트럴 정보는 복수의 간섭 측정에 의해 획득되고, 이는 기준 암 길이를 가변시킨다.

[0107] 이러한 상황을 분석하기 위하여, 샘플과 기준의 광학 신호는 이에 따라 시간 도메인 S(t), R(t)에서의 펄스로서 고려될 수 있다. 기준과 샘플간의 광학 경로 차이에서의 시프트는 시간적 시프트(τ)에 의해 표시된다. 검출기가 작동되어서 전체 펄스 너비에 걸쳐 적분할 수 있기 때문에, 이러한 측정된 신호는 다음과 같이 주어진다.

[0108] (8)
$$P(\tau) = \int |S(t) + R(t - \tau)|^2 dt = \int |S(t)|^2 dt + \int |R(t)|^2 dt + S \otimes R^* + c.c$$

[0109] 그리고, 푸리에 변환을 사용하고,

[0110] (9)
$$\tilde{P}(\omega) = \int |S(t)|^2 dt + \int |R(t)|^2 dt + \tilde{S}(\omega) \cdot \tilde{R}^*(\omega) + c.c$$

[0111] 여기서 $\omega = 2\pi c/\lambda$ 는 각주파수이다.

[0112] 양(quantity) $\tilde{P}(\omega)$ 로부터, 콤플렉스 샘플 반사율 $\tilde{S}(\omega)$ 을 획득할 수 있는데, 왜냐하면, 이는 두 개의 오프셋 항 $(\int |S(t)|^2 dt, \int |R(t)|^2 dt)$ 및 사전에 측정될 수 있는 기준 함수 $\tilde{R}^*(\omega)$ 를 포함하기 때문이다.

[0113] 이러한 측정 방법은 상기 기술된 스펙트럴 간섭계의 푸리에 콘주게이트를 제시한다. 스펙트럴 간섭계내의 스펙트럴 축은 여기서 공간 축(z)으로 대체된다.

[0114] 콤플렉스 반사율 $\tilde{S}(\omega)$ 이 획득되면, 상기 기술된 방법, 즉, 메리트 함수 최적화가 사용될 수 있다.

[0115] 상기 기술된 신규의 스펙트럴 간섭계의 접근법은 정확한 스펙트럴 위상 측정에 사용될 수 있고, 이는 헤테로다인 측정의 원리를 따른다. 헤테로다인 측정의 원리는 일반적으로 알려져있어서, 이하의 유의점 이외에는 기술할 필요가 없다. 헤테로다인 개념은 실수-값의 신호(real-valued signal)만 사용하여 콤플렉스-값의 신호의 진폭과 위상을 인코딩하기 위한 방법으로 생각될 수 있다. 절차의 개요는 다음과 같은데, 신호는 고주파 상수-파형(CW) 캐리어에 의해 곱해지고(이하에 추가로 구체적으로 기술될 것임), 실수 부분이 취해져서 헤테로다인 신호를 생성하며, 헤테로다인 신호의 엔벨로프는 원래 신호의 진폭이고, 캐리어에 대한 헤테로다인 신호의 시프트는 원래 신호의 위상이다.

[0116] 도 8은 이러한 개념을 나타내는데, 저주파수 신호('엔벨로프')가 CW 캐리어에 의해 곱해져서, 헤테로다인 신호를 제공하는 것을 나타낸다. 원래의 신호의 진폭과 위상 모두는 헤테로다인 결과로부터 파생될 수 있다.

[0117] 백색광 간섭계에서, 균형이 맞지않은 암의 스펙트럼은, 암들 사이의 광학 경로의 차이인 Δz 에 비례하는 주파수를 가진 CW 성분 $e^{ik\Delta z}$ 을 얻는다. 여기서, $k = 2\pi/\lambda$ 은 파장(λ)의 광에 대한 자유공간 파장수를 표시하고, 간단하게, 기준 암이 스펙트럴적으로 중립이라고 가정할 수 있다. 충분히 큰 Δz 에 대하여, 이러한 CW 성분은, 샘플로부터의 원래의 스펙트럴 신호 S(k)(콤플렉스 진폭 및 위상)와 혼합되는 헤테로다인 신호를 생성하는데 사용될 수 있다.

[0118] 이러한 Δz 의 큰 값은 신호 분석을 위한 헤테로다인 툴의 사용을 가능하게 하는데 사용될 수 있다.

[0119] 광학 세기 측정은 신호 및 캐리어의 곱을 생성한다.

[0120] (10)
$$I(k) = |S(k) + e^{ik\Delta z}|^2 = 1 + |S(k)|^2 + 2\text{Re}\{S(k)e^{-ik\Delta z}\}$$

[0121] 이러한 식 (10)은 상기 식 1과 유사하나, 간결성을 위해 간단화된다(식 1은 좀 더 포괄적인 설명을 제시함).

[0122] 식 (10)에서, 마지막 항인 $2\text{Re}\{S(k)e^{-ik\Delta z}\}$ 는 헤테로다인 신호이다. 도 1a - 1c는 스펙트럴 헤테로다인 측정을 할 수 있는 스펙트럴 간섭계의 예시를 나타낸다. 간섭계에서 사용되는 광 소스(12)는 스펙트럴 관심 영역을 커버하기에 충분한 스펙트럴 범위를 가진다. 간섭계는 광을 기준 암(Lref) 및 샘플과 상호작용하는 샘플(프로브) 암(Lp)으로 입력광을 분리시키는 빔-스플리터 유닛(22) 및 샘플과 상호작용한 샘플 암 이후에, 두 암의 출력을 결합시키는 빔-컴바이너(26)를 포함한다. 암들 사이의 (고정 또는 가변적인) 광학 경로 길이 차이(OPD)를 제어하거나 생성하기 위한 제어 장치/메카니즘이 틸팅되지 않은 이동식 거울(28) 또는 틸팅되지 않은 고정식 거울(128)을 사용하여 실행될 수 있다. 도 1a에 도시된 본 발명의 스펙트럴 간섭계에서, 반사 모드에서의 측정이 고려된다면, 기준 암에서의 틸팅되지 않은 거울(28)의 이동 또는 샘플의 지지부(12)의 이동이 사용된다. 도 1b 및 1c에서 도시된 본 발명의 스펙트럴 간섭계에서, 거울이나 샘플은 측정 동안에 움직일 필요가 없고, 이는 상기 기술된 틸팅되거나 디포커스된(defocused) 컨피규레이션에 의해 달성된다. OPD는 충분히 커서, 충분히 높

은 주파수를 가진 CW 캐리어 신호 $e^{ik\Delta z}$ 를 생성한다. 간섭 신호의 스펙트럴 세기를 측정하는데 사용되는 분광계는 CW 캐리어 신호를 정확하게 샘플링하기 위해 적절한 스펙트럴 레졸루션을 가지면서 이하에서 논의될 바와 같이 충분한 코히런스도 유지한다.

[0123] 도 9는 완벽한 거울 샘플과 기준으로부터의 간섭 스펙트럼에 대한 시뮬레이션 결과(계산된 헤테로다인 간섭 신호)를 나타낸다. 이는 상기 언급된 CW 캐리어 신호 $e^{ik\Delta z}$ 의 실수 부분의 발현이나, 수평 스케일은 파장(파수의 반대인 바와 같음)이고 따라서 처프된(chirped) 외관이다.

[0124] 측정의 결과는 샘플의 (복소) 반사(진폭과 위상 모두)를 추출하기 위해 해석될 수 있다. 도 1a - 1b에서 예시화된 바와 같이, 제어 유닛(30)은 둘 이상의 스펙트럴 간섭 특징을 포함하는 스펙트럴 간섭 패턴을 나타내는 측정된 데이터를 프로세싱하고 분석하도록 적절하게 구성된다. 이러한 데이터 프로세싱은 모델 기반의 접근법을 사용한다. 데이터 프로세서 유틸리티(30D)는 맞춤 모듈(fitting module)을 포함한다. 헤테로다인 검출 알고리즘과 관련하여 이하에 기술될 바와 같이, 간섭 스펙트럼에 대한 직접적인 정보는 샘플에 대한 계측적인 데이터를 추론하는데 사용될 수 있다. 그러나, 모델-기반의 계측에서, 실제의 측정에 대해 비교될 스펙트럴 간섭 시도 측정치를 이미 생성하는 모델을 생성할 수 있다는 것에 유의해야 한다. 모델 기반의 접근법은 사용할 스펙트라의 요소의 유연성을 제공한다. 본 발명의 헤테로다인 검출 알고리즘을 사용하는 것은 모델-기반의 계측 방법에 대해 요구되는 작용점에 대한 영감dmf 제공하는데, 의미있는 데이터는 측정에 의해 생성될 수 있다.

[0125] 전통적으로, 헤테로다인 검출은 캐리어 및 대역폭-제한된(BW) 신호의 스펙트럴 속성에 기초한다. 좀 더 구체적으로, 이들은 주파수 스펙트럼(z-공간, 이는 본 경우에서 파수 k에 대한 컨주게이트임)에서 서로 다른 영역을 차지하도록 요구된다. 도 10은 캐리어(아래) 보다 주파수 공간(이 경우에 'z')에서의 영역을 차지하는 대역폭-제한된 신호(위)를 나타내는 헤테로다인 스킴을 나타낸다.

[0126] 상기 식 10으로부터, 완벽한 유닛 참조를 위해, 간섭 신호는,

[0127] (11)
$$I = 1 + |S|^2 + S e^{-ik\Delta z} + S^* e^{ik\Delta z}$$

[0128] 주파수 공간은 상기 합산에서 4개의 성분을 분리시키는데 사용될 수 있다. 그러나, 이는 에일리어싱을 피하기 위하여, 신호 대역폭(BW)의 적어도 세배인 CW 주파수를 요한다. 이는 도 11 및 12에 도시된다. 도 11은 z 공간에서 헤테로다인 검출을 나타낸다. 낮은 주파수 신호는 캐리어 신호에 의해 곱해지고, 두 개의 측면 로브를 생성한다. 이들 측면 로브가 낮은 주파수 성분과 오버랩되지 않는다면, 헤테로다인닝은 에일리어싱 없이 실행될 수 있다. 도 12는 헤테로다인 방법론을 실행하는데 실제적인 어려움을 나타낸다. 측정된 신호의 분리성(discreteness)은 z(주파수) 공간내의 신호 성분들 간의 오버랩을 생성하여, 에일리어싱 에러에 리딩(leading)한다.

[0129] 그리고 나서, 식 11에서의 세 번째 항은 신호를 회복시키기 위해, 캐리어에 의해 곱해진다.

[0130] (12)
$$S = (S e^{-ik\Delta z}) e^{ik\Delta z}$$

[0131] 그러나, 백색광 간섭계에 의해 생성된 스펙트럴 측정치에 이러한 방법의 적용을 고려하면, 간섭 신호가 검출기에 의해 이산적으로 샘플링되기 때문에, 본 방법은 이산 푸리에 변환을 사용하여 실행된다. 그러나, 이산 푸리에 이미징 프로세싱은 스펙트럴 누설에 처한다. 비주기적인 k의 임의의 함수는 인접한 빈(bin)으로 누설될 것이다. 이는 4개의 구성들 사이에 크로스-토크로 이어지고, 추출된 신호를 오염시킨다. 샘플의 스펙트럼 및 캐리어 $e^{ik\Delta z}$ 는 측정된 k-공간 윈도우상에서 주기적이라는 보장은 실용적이지 않다. 간섭 신호를 윈도우하는 것(windowing)은 누설을 완화시키나 민감한 계측 적용에 대해서는 충분하지 않다.

[0132] 상기 문제점을 극복하기 위하여, 본 발명은 다양한 접근법을 제공한다. 호모다인 간섭계에서, 신호의 완전한 회복을 위해 적어도 3개의 위상 시프트가 필요하다는 것에 유의해야 한다. 일정하게 가변하는 위상 시프트로서 CW 캐리어를 고려해보자. 신호가 매우 천천히 가변하기 때문에($3BW \leq CW$), 캐리어는 적어도 3개의 서로 다른 위상을 각각의 신호 정보 "셀"을 샘플링한다. 이는 3-위상 캐리어에 의해 관심 신호의 샘플링을 나타내는 도 13에 도시된다.

[0133] 샘플 신호가 실수-값 기저 함수 $f_{kn}, n = 1, \dots, N$ 의 유한한 수의 합산으로 표현될 수 있다고 가정하면, 우리는 다음 식을 얻는다.

[0134] (13)
$$S_k = \sum_n f_{kn}(a_n + ib_n)$$

[0135] 적절한 기저 함수를 위한 가능한 후보는 적절한 k-공간 샘플링 그리드의 중앙에 있거나, 이러한 그리드상의 싱크(sinc) 또는 싱크 제곱되거나(sinc-squared) 또는 삼각 함수(선형 1D 유한한 요소 형상 함수(shape function)이다. 샘플링 그리드는 기저 함수 대역폭과 매칭되기 위해 조절될 필요가 있다는 것, 즉, 인접한 함수들 사이의 간격이 너무 크면 에일리어싱 문제가 있을 것이라는 점에 유의해야 한다.

[0136] 다음으로, 샘플 세기($|S_k|^2$), 기준 세기($|R_k|^2$), 및 간섭 세기 I_k 가 측정된다고 가정하고, 여기서, $k = 1, \dots, K$ 이고, 간섭 세기는 다음과 같이 주어진다.

[0137] (14)
$$I_k = |S_k|^2 + |R_k|^2 + \gamma_k(S_k^* R_k e^{+ik\Delta z} + S_k R_k^* e^{-ik\Delta z})$$

[0138] 여기서, $\gamma_k \leq 1$ 은 디코히런스 항이고, z-지터로부터, 유한한 코히런스 길이, 검출기 잡음, 퓨필 또는 필드 또는 편광과 같은 다른 자유도에 대한 적분이다.

[0139] 식의 이러한 시스템을 풀기 위하여, γ_k 는 알려지지 않은 계수로 흡수된다. 즉,

[0140] (15)
$$\gamma_k S_k = \sum_n f_{kn}(a_n + ib_n)$$

[0141] 그리고나서, 선형 시스템이 풀린다.

[0142] (16)
$$\sum_n [|R_k| \cos k\Delta z f_{kn} \quad |R_k| \sin k\Delta z f_{kn}] \begin{bmatrix} a_n \\ b_n \end{bmatrix} =$$

[0142]
$$I_k - |S_k|^2 - |R_k|^2$$

[0143] 마지막으로, 디코히런스의 추정이 추출되고, 솔루션은,

[0144] (17)
$$\gamma_k = \frac{|\sum_n f_{kn}(a_n + ib_n)|}{|S_k|}$$

[0144] (18)
$$S_k = \frac{\sum_n f_{kn}(a_n + ib_n)}{\gamma_k}$$

[0145] 자유도를 생각해 보자. 2N의 알려지지 않은 계수 및 K 측정치가 있는데, 이는 $K \geq 2N$ 이다. 샘플 세기($|S_k|^2$)도 측정되기 때문에, 전형적인 헤테로다인 검출 스킴으로부터 예상된 3-폴드 요구사항과 비교하여 감소된 것이다.

[0146] 대수적인 방법의 이점은 그것이 제어하고 추정하기 어려운 디코히런스 효과를 수용하고, 또한 그들의 강도에 대한 추정치를 산출한다는 것이다. 또한, 디코히런스 효과를 포함하는 것은 간섭 신호의 정확한 재구성을 가능하게 하여, 솔루션 잔여 대 실제 추정치를 얻을 수 있다.

[0147] 캐리어 주파수(Δz)는 충분히 커서, 매트릭스가 잘 조절되고 수치적으로 역으로된다(즉, 위상 변화가 각각의 기저 함수(f_{kn})의 충분한 샘플을 가져야 한다는 물리적 요구사항). 마지막 요구사항은 다양한 래그(z_j)에서 여러 추정치와 교환될 수 있고, 각각의 기저 함수(f_{kn})는 여러 Δz_j 에 의한 충분한 위상에 의해 샘플링된다. 선형 시스템을 푸는 것이 빠르기 때문에, 알려지지 않은 파라미터가 미세-튜닝 Δz_j 과 같이 맞춰져서, 솔루션 잔여 (solution residue)를 최소화할 수 있다. 이는 비교적 적은 수치적 리소스를 가진 복수의-z 점프 부정확도에 맞춰줄 수 있게 한다.

[0148] 임의의 스펙트럴 측정에서와 같이, $e^{ik\Delta z}$ 내의 z -모호성은 스펙트럼이 오직 선형 위상 항까지만 안다는 것을 의미한다는 것에 유의해야 한다. 검출된 신호를 주어진 스펙트럼과 비교하기 위하여, 가령, (이에 제한되지 않지만) 선형 위상 항을 영으로 설정하거나, 위상의 이차 미분만 고려함과 같은, 게이지-고정 절차를 수행할 필요가 있다.

[0149] 따라서, 가정된 스펙트럴 신호 $S_k = \sum_n f_{kn}(a_n + ib_n)$ 를 정확하게 기술하기 위해 충분한 기저 함수(N)가 요구된다는 것은 명백하다. 결국, 이는 적어도 $K \geq 2N$ 측정점을 요구하는데, 여기서, 캐리어는 각각의 기저 함수에 대해 충분히 오실레이트한다. 이는 Δz 가 충분히 커서 $e^{ik\Delta z}$ 이 기저 함수당 한 사이클을 수행하고, K 샘플링점은 간섭 신호를 정확하게 샘플링하기 위해 이격된다는 것을 의미한다. 그러나, 큰 Δz 에 의해, 간섭 무늬 명도는, 분광계의 코히런스 길이의 함수로서, 감소한다. 일정하고, 간단한 그레이팅을 가진 회절 제한된 간섭계에 있어서, 코히런스 함수는 삼각형을 가지는데, 이는 회절 제한된 간섭계에 대한 z 공간에서의 코히런스 함수와 간단한 그레이팅을 나타내는 도 14에 도시되는데, 여기서, N은 그레이팅 라인의 수이고, n은 회절 차수이다.

[0150] 코히런스 함수의 푸리에 변환은 분광계의 스펙트럴 레졸루션 포인트-스프레드 함수(PSF)이다.

[0151] (19)
$$\gamma(\lambda, \lambda') = \text{sinc}^2(2\pi Nn(\lambda - \lambda')/\lambda')$$

[0152] 그러므로, 미세한 세부사항을 가진 스펙트럼에 대해 헤테로다인 검출을 수행하기 위하여, 분광계는 스펙트럴 세기를 정확하게 샘플링하도록 요구되는 스펙트럴 레졸루션의 적어도 두 배를 가지는 것이 필요하고, 또한, 높은 무늬 명도는 적절한 신호-대-잡음(SNR)을 보장하며, 다른 가능한 디코히런스 문제를 극복하도록 요구될 수 있다.

[0153] 매우 빠른 광학 기술을 위하여, 간섭 측정 기술의 어려움을 우회할 수 있다. 매우 짧은 구간을 가진 광학 펄스(가령, 펨토초 펄스)는 매우 넓은 스펙트럴 성분을 포함한다. 일반적으로, 이러한 펄스의 스펙트럴 위상이 관심이 있고, 따라서, 다양한 특징 기술이 연구된다[Rick Trebino, Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulses. Springer (2002); Mitsuo Takeda et al/. "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry". J. Opt. Soc. Am. 72 156 (1982); US 6,611,336]. 이들 대부분의 기술은 스펙트럴 위상을 추론하기 위하여 비선형 광학 상호작용을 사용한다.

[0154] 본 경우에서, 매우 빠른 레이저 펄스는 그 펄스의 파장 전부가 위상 고정(변환 제한된 펄스)되는 경우에 사용된다. 샘플을 침해하는 변환 제한된 펄스,

[0155]
$$f(t) = \int |F(\omega)| \cdot \exp(i\omega t) d\omega$$
 는
$$s(t) = \int S(\omega) \cdot \exp(i\omega t) d\omega$$
 으로 변환되고,

여기서,
$$S(\omega) = |S(\omega)| \cdot \exp(i\varphi_\omega)$$
 이다.

[0156] 새로운 진폭($|S(\omega)|$)은 측정된 샘플의 반사 스펙트럼에 대응된다. 상대적 위상(φ_ω)은 펄스내의 각가기 \circ 주파수에 대한 샘플에 의해 유도된 서로 다른 위상 시프트(광학 경로 차이)에 대응된다. 언급된 바와 같이, 다양한 특징 기술이 반사된 펄스의 위상 함수를 측정할 수 있고, 따라서, 간섭계 없이 이러한 중요하고 실용적인 정보를 획득할 수 있다.

[0157] 본 발명의 스펙트럴 간섭계를 나타내는 도 1 내지 1c로 되돌아와서, 샘플은 간섭측정 물체를 통해 백색광 소스에 의해 조명된다. 신호가 수집되고, 스펙트로그래프상에 이미징된다. 간섭측정 물체는 가령, 진입 슬릿을 통해, 2D CCD의 하나의 축상에 샘플의 1D 이미징을 수행하고, CCD의 다른 축상에 각각의 이미징 픽셀의 스펙트럼을 펼친다.

[0158] 이러한 설정은 반사된 펄드의 스펙트럴 위상이 추출될 수 있게하고, 위상을 추출하는 특정한 방법에 의존하여, 유효한 SNR을 보장하고 원치않은 시스템 효과를 감소시킬 수 있다.

[0159] '표준' 간섭측정으로, 위상은 샘플 및 기준 반사도 및 결합된 간섭 신호의 측정에 의해 추출된다. 본 발명의 스

펙트럴 간섭 시스템의 사용은 공간 정보에서 더 풍부한 분광 사진 데이터를 획득하여서, 잡음 감소 및 위상의 공간 변화의 측정치를 평균화할 수 있다.

- [0160] 도 1b-1d 및 2a를 참조하여 상기 기술된 바와 같이, 샘플 및/또는 기준 거울의 틸팅 사용은, 평면들 중 하나 또는 이들 모두를 틸팅함에 의해, 이미징된 축을 따라 일정한 디포커스 그래디언트를 생성한다. 이는 결국, 이미징된 축을 따라 서로 다른 OPD에 의해 야기된, 필드에서의 선형 무늬를 생성한다. 이와 관련하여, 샘플 및/또는 기준 거울을 틸팅하는 효과를 나타내고, 위치-의존적인 무늬를 생성하는 15a를 참조한다. 이러한 위치 의존성은 스펙트럴 위상의 정확한 추출에 사용될 수 있다. 디포커스 그래디언트가 일정하기 때문에, 이는 신호의 더 우수한 맞춤을 가능하게 할 것이다.
- [0161] 도 1b-1d 및 2b를 참조하여 상기 기술된 바와 같이, 샘플/기준 거울의 디포커싱과 결합된 백 초점면(BFP) 이미징을 대안적으로 사용하여, 평면들 중 하나 또는 이들 모두를 디포커싱함에 의해, NA 평면내의 디포커스-의존적인 위상 변화에 의해 야기되는 필드에서 프레넬(Fresnel) 무늬를 초래한다. 이는 도 15b에 도시된다. 이러한 무늬 패턴에 맞춤에 의해, 스펙트럴 위상은 높은 정확도로 추출될 수 있다. 이러한 위상 변이는 특징적이고, 알려지며, 기능적인 의존도를 가진다. 디포커스가 단일 파라미터이기 때문에, 스펙트로그래프로 BFP를 이미징하는 것은 스펙트럴 위상을 추출하는 능력을 개선시킨다.
- [0162] 상기 기술된 방법에서, 시스템 속성이 고려되어야 한다. 예를 들어, 디포커싱 방법을 사용하는 BFP에서, 더 큰 NA에 대한 이점이 있어서, 디포커스 민감도를 가능하게 한다. 아니면, 프레넬 무늬가 나타나기 위해서는, 큰 디포커스 거리에 도달되어야 한다.
- [0163] 구체적으로, 타겟의 각 세기 프로필을 측정하기 위해 설계된 시스템(가령, 백 초점면 이미징 또는 돔 이미징)은 간섭계와 결합되어서, 위상 정보를 사용하여 측정된 정보를 보완할 수 있다. 대안적으로, 구체적으로 설계된 파면 센서(위상 검출기)는 간섭계 없이, 각 세기 및 위상을 측정하는데 사용될 수 있다. 이러한 옵션은, 본 출원의 수탁자에게 양수된 W02014/ 102792에 기술된 "Coherent Point Microscopy" (CPM)과 같은 위상 및 세기 특징의 다양한 방법을 포함한다. CPM 기술은 샘플의 산란 매트릭스의 푸리에 변환과 관련된 샘플로부터 광 세기 패턴을 측정기 위해 제공되어서, 진폭과 위상 모두에 대한 정보를 포함한다. CPM 접근법은 소위 "임계 조명(critical illumination)"이 있는, 즉, 샘플상에 다양한 조명각을 제공하고, 서로 다른 조명 각들 사이의 코히런트한 간섭을 제공하는 조명인 코히런트 광 소스와 함께 이미징 광학의 조합을 사용한다. 가령, 이는 측정하의 샘플상에 점형 소스를 직접 이미징함에 의해, 또는 대안적으로 샘플상에 시준된 레이저 빔을 포커싱함에 의해 획득될 수 있다.
- [0164] 이하에는 측정된 데이터 해석의 일부 예시이다.
- [0165] 많은 알고리즘적인 접근법이 측정된 스펙트럴 위상을 해석하기 위해 고안되고 최적화될 수 있다. OCD 스펙트럴 해석에 대한 표준 접근법은, 측정된 구조물의 일부 기하형상적인 묘사에 기초하여, 측정된 스펙트럼을 모델-기반의 계산과 비교하는 것과 관련된다. 다른 OCD-기반의 방법(라이브러리-기반, 실시간 회귀법 등)과 동일한 방식으로 많은 변형예와 개선책이 사용될 수 있다.
- [0166] 이러한 접근법에 추가로, 측정된 스펙트럼 내의 일부 특징이 적용예를 특징짓는 일부 파라미터와 상관되는 경우에, 모델-리스(model-less) 접근법을 사용할 수 있다. 상관도는 일부 물리적 이유를 통해 또는 알려진 속성의 여러 샘플을 측정하 이후(즉, 세미-경험적으로)에 획득될 수 있다.
- [0167] 임의의 다른 광학적 또는 비광학적 계측 방법과 함께, 이러한 계측 접근법을 사용할 수 있다. 예를 들어, 얻은 정보는 스펙트럴 반사계, 스펙트럴 엘립소메트리, 돔 스캐터로메트리, CD-SEM 데이터 등과 함께 사용될 수 있다. 이들 상보적인 데이터세트는 파라미터들간의 상관도를 제거하는데 사용될 수 있다. 대안적으로, 하나의 계측 방법으로부터의 정확한 정보(가령, CD-SEM으로부터의 탐-CD)는 스펙트럴 간섭 측정의 해석 프로세스내로 주입(고정된 값으로)될 수 있다.
- [0168] 상기 기술된 바와 같이, 도 1b-1d 및 2a-2d를 참조하면, 본 발명의 기술은 단일 측정을 사용하여 구조 파라미터를 추출하기 위해 요구되는 스펙트럴 간섭 데이터를 얻는 것을 제공한다. 필요하다면, 본 발명의 스펙트럴 간섭계는 소위 복수의-z 측정을 제공할 수 있다는 것에 유의해야 한다. 측정은 샘플 높이(광학 축의 방향으로)의 여러 값에 대해 또는 기준 거울의 다양한 위치에 대해 획득될 수 있고, 이들 측정치는 더 명확한 위상 측정치를 추출하는데 사용된다. 상기 기술된 바와 같이, z는 측정된 스펙트럼으로부터 추출될 수 있는 맞춤 파라미터로서 사용될 수 있다.
- [0169] 측정된 스펙트럼은 일부 기저 함수적인 세트의 선형 조합으로 이어질 수 있어서, 간단한 선형 문제의 형태인 맞

춤 프로세스를 바꾸어 말할 수 있다. 적절한 기저 함수의 선택은 맞춤 정확도는 물론, 잡음에 대한 강건성도 개선할 수 있다. 기저 함수의 복수의 타입에 대하여, 이러한 접근법은 가령, 고차 유한-요소 형상 함수를 사용하여 확장될 수 있다. 비변역물로 불변의 기저 함수에 대해, 접근법은 가령, 파형요소(wavelet), 다항 (polynomial)을 사용하여 확장될 수 있다.

[0170] 신호의 시간적인 코히런스에 대한 정보는 맞춤 프로세스에 포함될 수 있다. 이러한 요소에 대해 해명하는 것은 간섭 스펙트럼의 어떤 스미어링을 야기할 수 있는데, 이는 중요할 수 있다(특히, 스펙트럴 레졸루션이 높지 않다면). 코히런스 요소는 시스템의 광학 파라미터에 기초하여 바로 추정될 수 있다. 대안적으로, 코히런스 요소를 맞춤 파라미터로 사용함에 의해, 측정치(하나 또는 몇몇)로부터 코히런스 요소를 추론할 수 있다.

[0171] 측정 시스템의 다른 광학 설계가 사용될 수 있고, 스펙트로그래프를 포함하는 셋업을 통해 획득될 수 있어서, 복수의-채널 경우로 본 발명의 접근법이 확장될 수 있다.

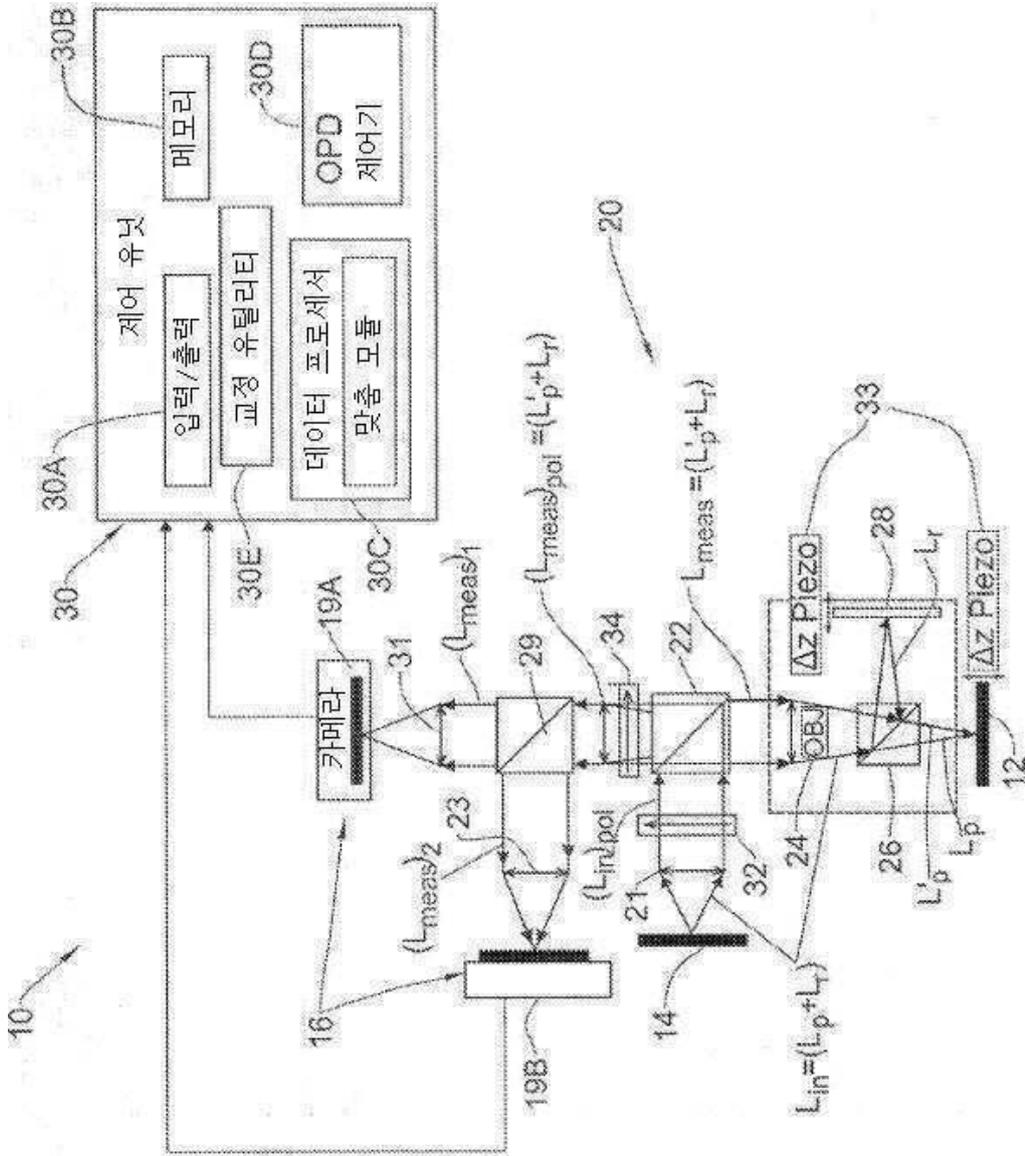
[0172] 본 발명의 측정 시스템은 램프, LED, 레이저, 수퍼콘티늄 레이저, 프라즈마로 구동되는 레이저와 같은 임의의 적절한 타입의 광 소스는 물론, Kohler, 임계, 확장된 대(vs) 점 등과 같은 조명 타입을 사용할 수 있다. 빔 스플리터/컴바이너의 임의의 적절한 타입 및 컨피규레이션, 가령 하프-실버 플레이트, 큐브, 파이버 스플리터/컴바이너, 평면 광파 회로 스플리터/컴바이너는 물론 편광된 빔 스플리터도 사용될 수 있다. 또한, 별도의 스플리터/컴바이너가 (Mach-Zehnder 컨피규레이션으로) 또는 단일 스플리터/컴바이너(Michelson 컨피규레이션으로) 사용될 수 있다. 이동식 빔 스플리터는 표준 반사 측정과 간섭 측정 사이를 교대로 하는데 사용될 수 있다. 검출 유닛은 복수의 병행 채널(가령, 이에 제한되지 않지만, 샘플 교차-섹션, 산란된 펄스 교차-섹션)에서 헤더로다인 스펙트럴 측정치를 획득하기 위해 스펙트로그래프의 사용 및/또는 간섭계의 컴바이너의 "거부된" 채널의 측정치를 획득하기 위한 제2 분광계의 사용, 및/또는 샘플로부터의 순수한(비간섭) 측정치를 동시에 획득하기 위한 추가적인 분광계의 사용의 옵션을 포함하여 임의의 분광계 타입 및 컨피규레이션을 사용할 수 있다. 본 발명의 측정 기술은 편광 또는 비편광된 광은 물론, 측정 동안에(다양한 교차-편광 측정을 포함하여) 조명 및 수집 편광 상태를 사용할 수 있다. 광학 경로 길이 제어는 고정된 경로 길이 차이, 거울, 역반사기, 공간적 광 변조기, 액체 결정, MEMS 등을 사용하여 실행되는 물론, 샘플 경로 또는 기준 경로 또는 둘 다를 제어할 수 있다. MEMS 기준 거울은 OPD 및 간섭계의 틸트를 제어하는데 사용될 수 있다. 또한, 샘플과의 광학적 상호작용의 임의의 적절한 스킴이 사용될 수 있는데, 가령, 투과도 또는 반사도 또는 샘플을 통한 이중-패스(샘플 뒤의 거울/반사기로), 수직 및/또는 경사진 조명 및 수집 각도, 다양한 방위각에서의 경사, 광학적으로 해결 또는 미해결된 샘플, 무족의(apodized) 조명/수집 어퍼처이다.

[0173] 광학 구성은, 가령 많거나 적은 NA의 물체, 맞춤형이거나 기준에 있는 것, 레이저 조명 및/또는 대역 밴드를 위해 최적화된, 반사성 또는 굴절성인 임의의 적절한 알려진 타입일 수 있다. 서로 다른 컨피규레이션은 Michelson, Mirau, Linnik과 같은 간섭계 요소에 가능하다. 또한, 측정의 수를 (서로 다른 z 또는 다른 것에서) 연장시킴에 의해 잡음 및 비선형성을 감소시킬 수 있다. 푸리에 평면(위상 명도와 같은)에 변화가 적용될 수 있거나, 푸리에 필터링이 사용될 수 있다.

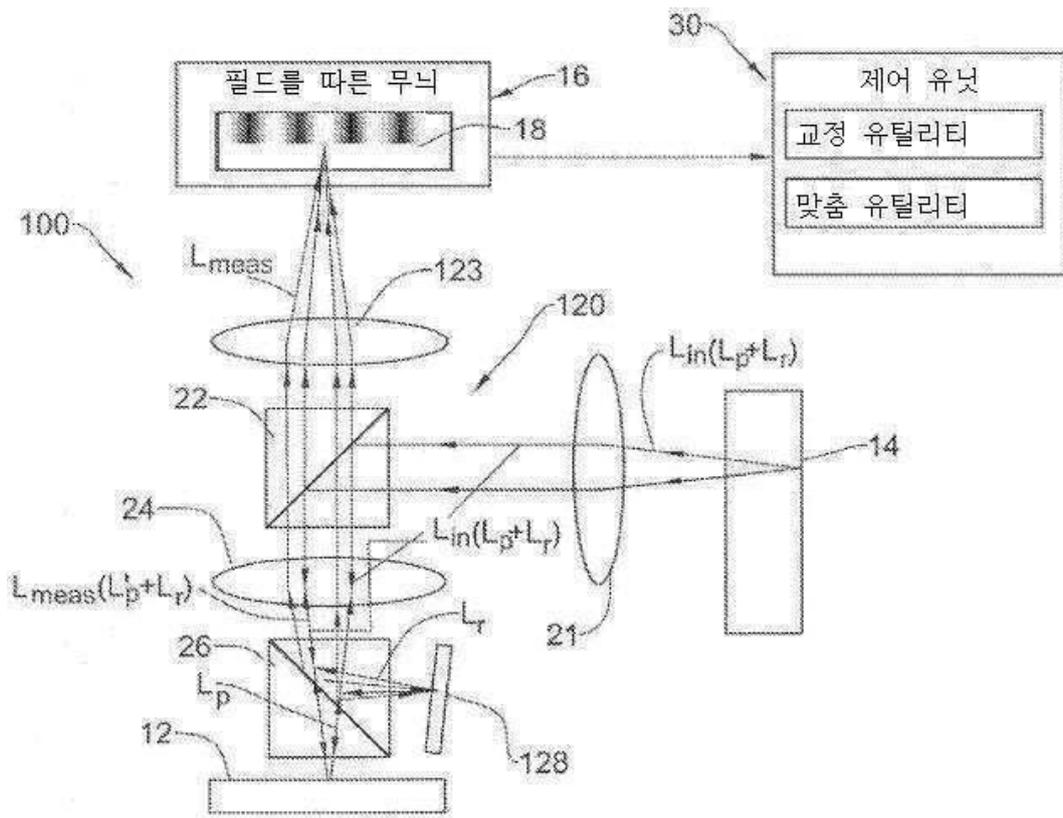
[0174] 본 발명의 기술은, 푸리에 평면에서 스펙트럴 위상을 직접 획득하는 다른 광학 기술, 가령, CPM과 관련되거나 결합될 수 있는데, 이 경우 Bertran 렌즈가 사용된다(본 출원의 수탁자에게 양수되고 본 명세서에 참조로서 포함되는 WO2014/102792에 기술되는 바와 같이). 스펙트럴 위상의 측정은 좀 더 포괄적인 OCD 계측 스킴에 유사하게 결합되어서, 다른 정보 채널을 실행할 수 있다. 예를 들어, 스펙트럴 위상 측정은, 추가적인 측정 유닛, 추가적인 측정 헤드나 심지어 동일한 계측 헤드 내의 서로 다른 채널로서, 각 위상 측정 기술을 동반할 수 있다.

도면

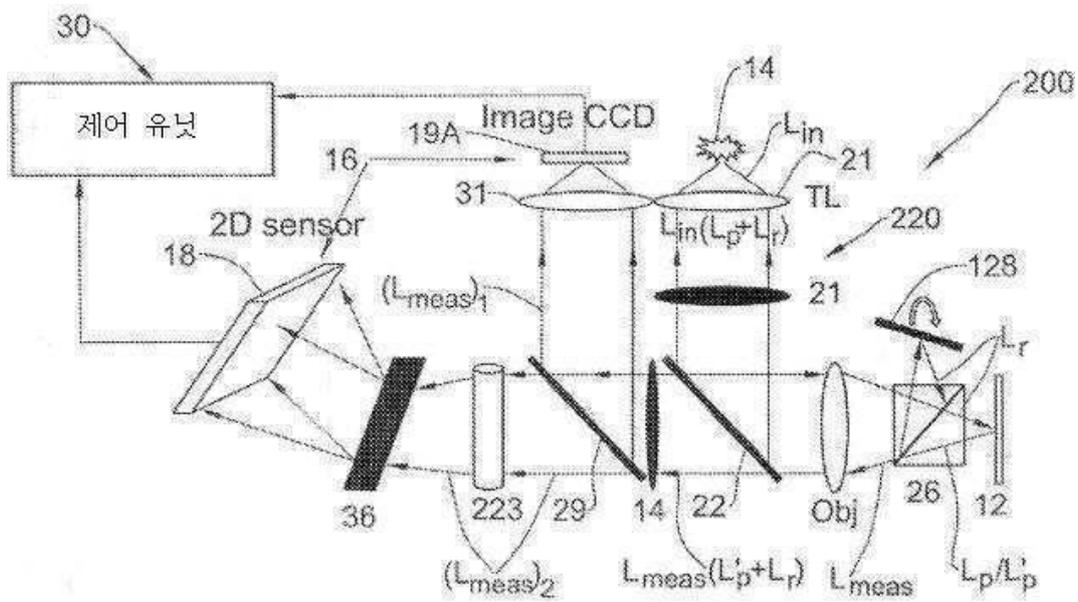
도면1a



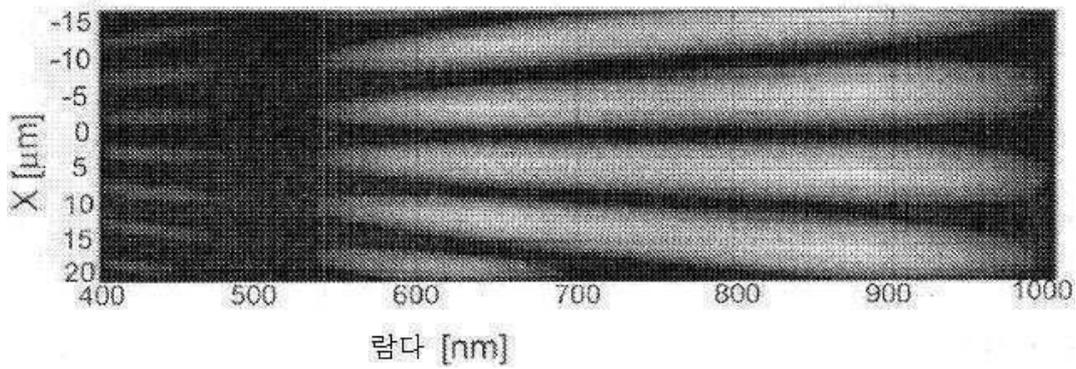
도면1b



도면1c

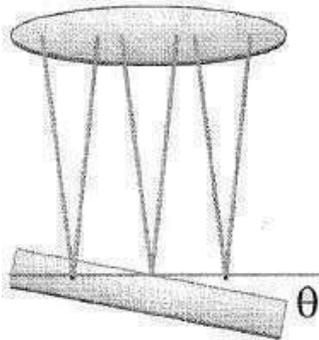


도면1d



도면2a

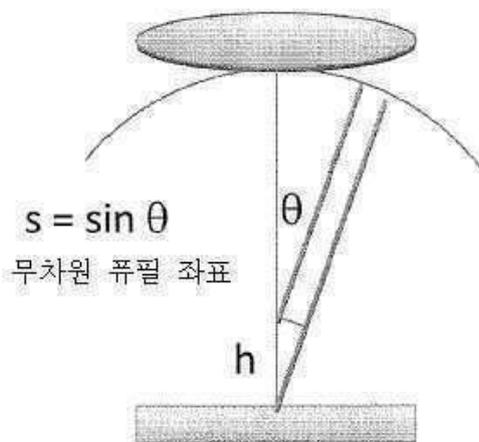
틸팅된 필드



$$\Delta z = x \tan \theta$$

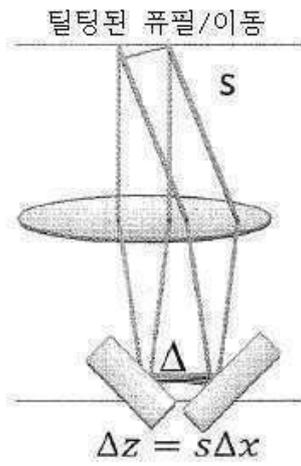
도면2b

디포커스된 필드

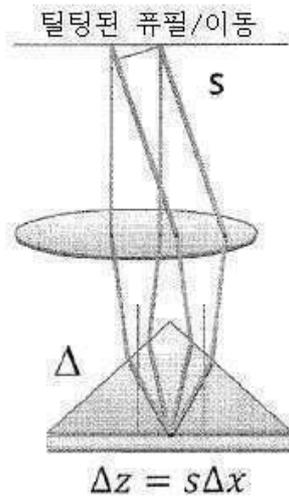


$$\Delta z = h \cos \theta = h \sqrt{1 - s^2}$$

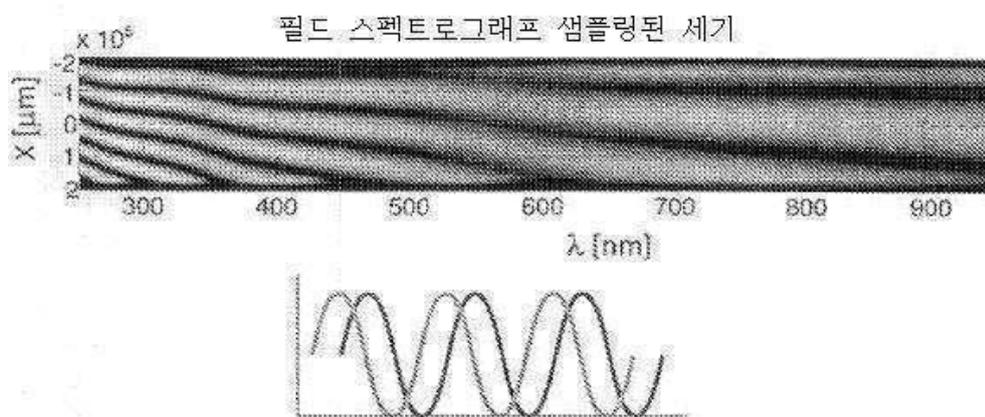
도면2c



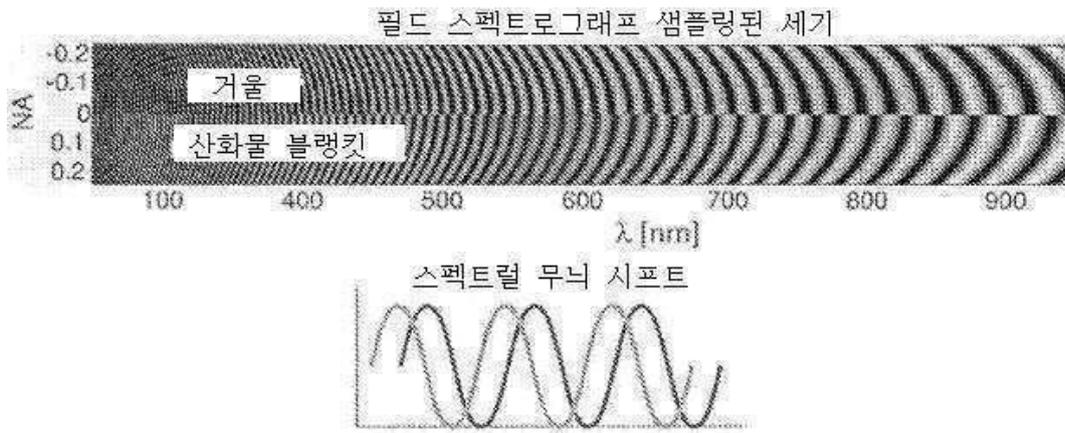
도면2d



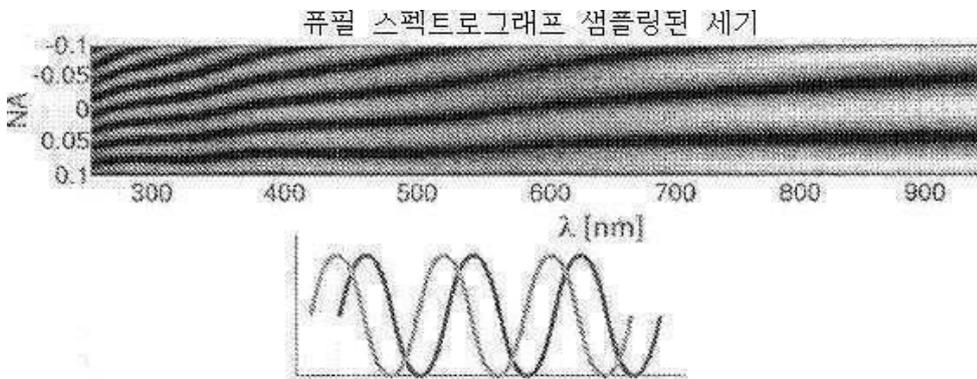
도면3a



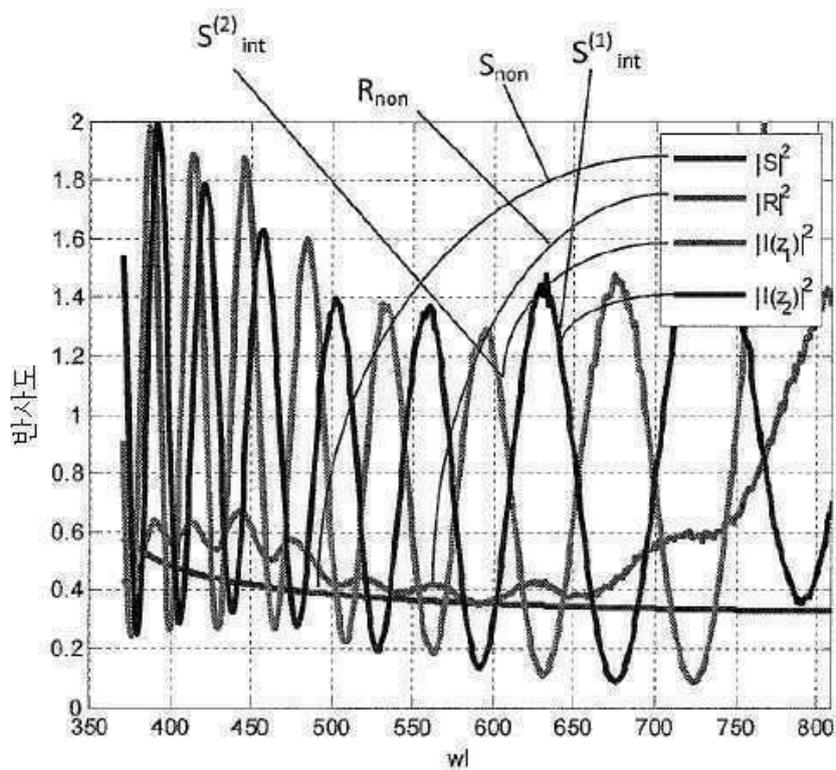
도면3b



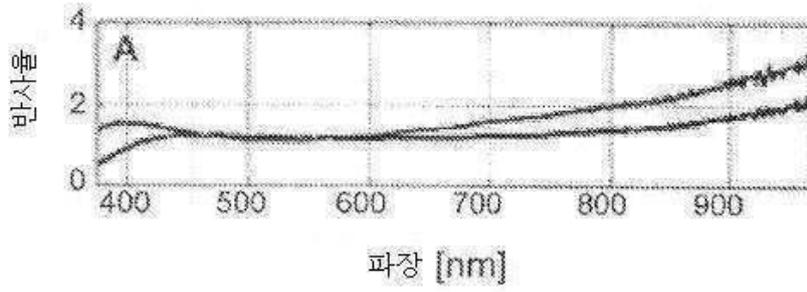
도면3c



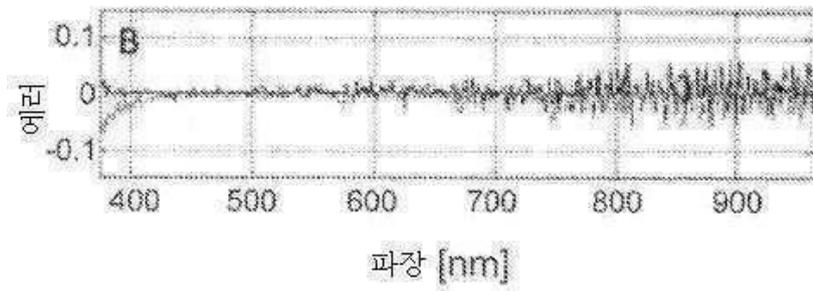
도면4



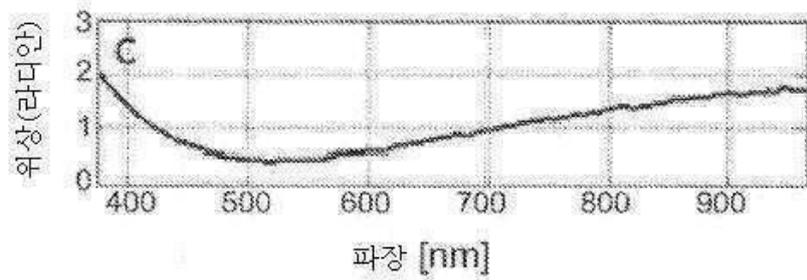
도면5a



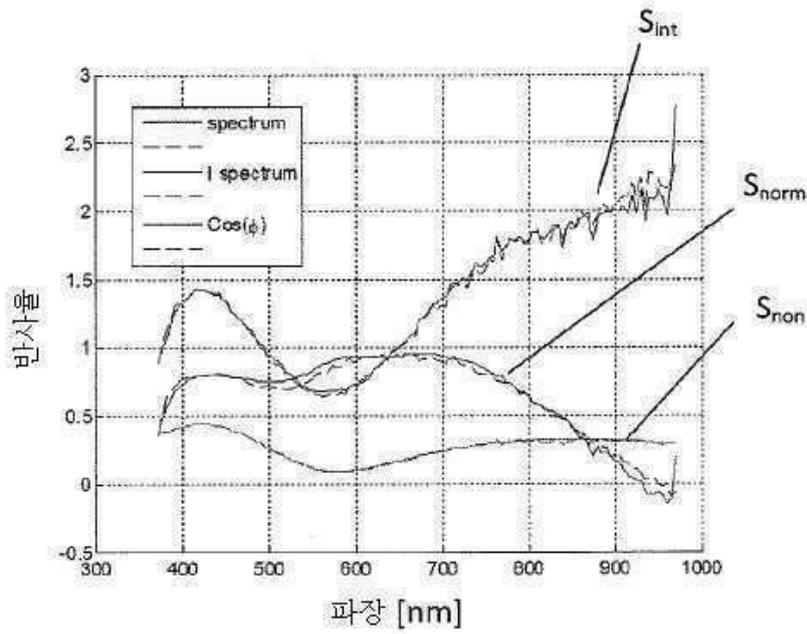
도면5b



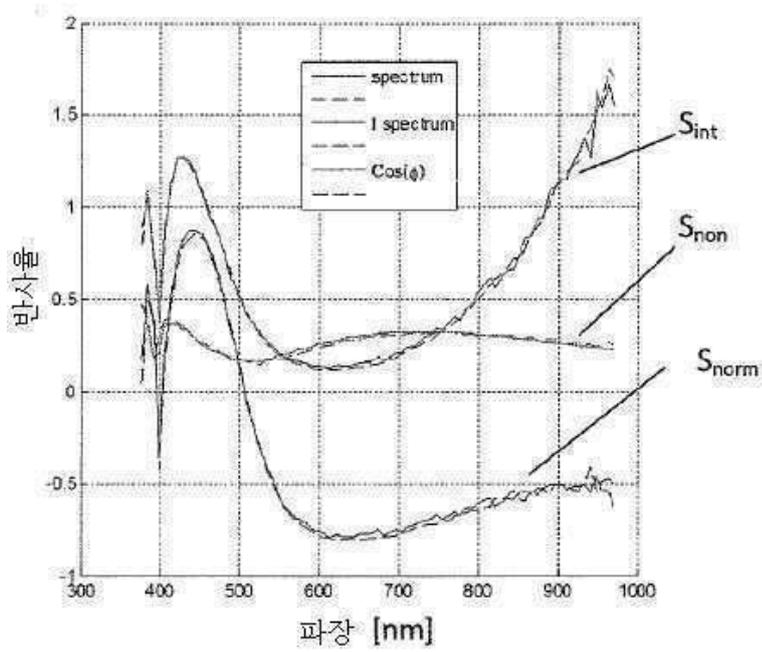
도면5c



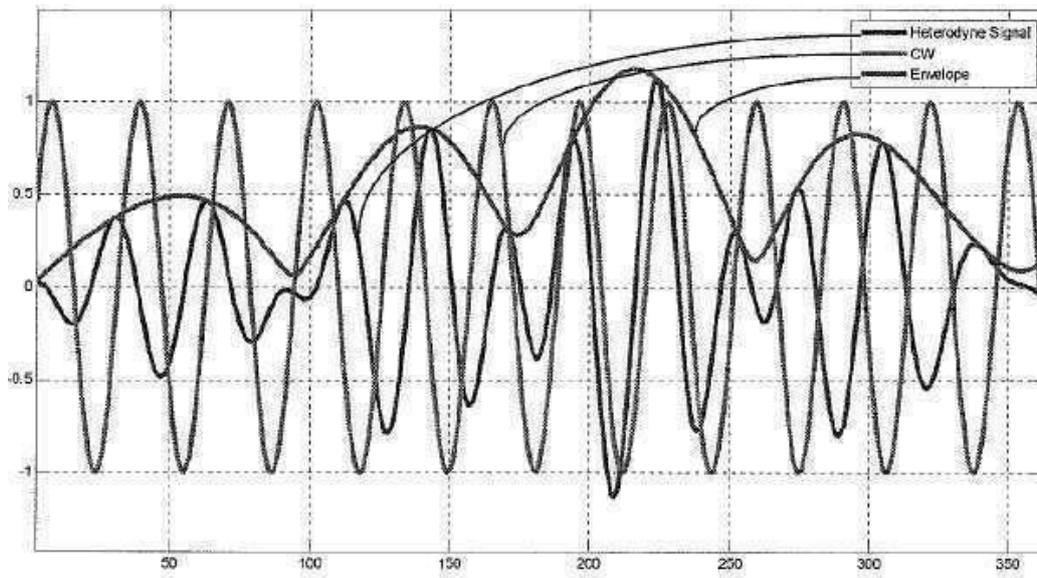
도면6



도면7

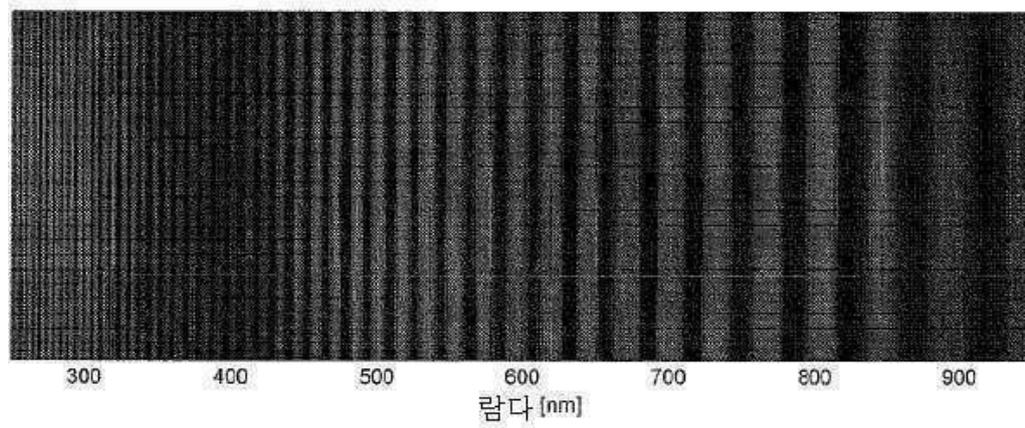


도면8

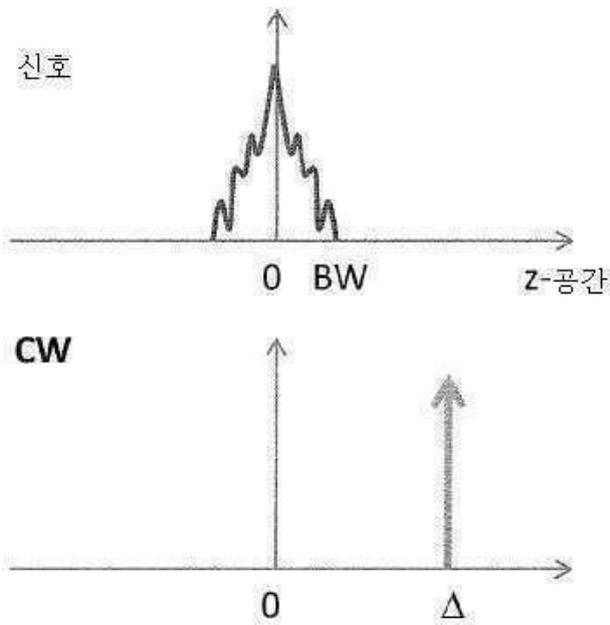


(종래 기술)

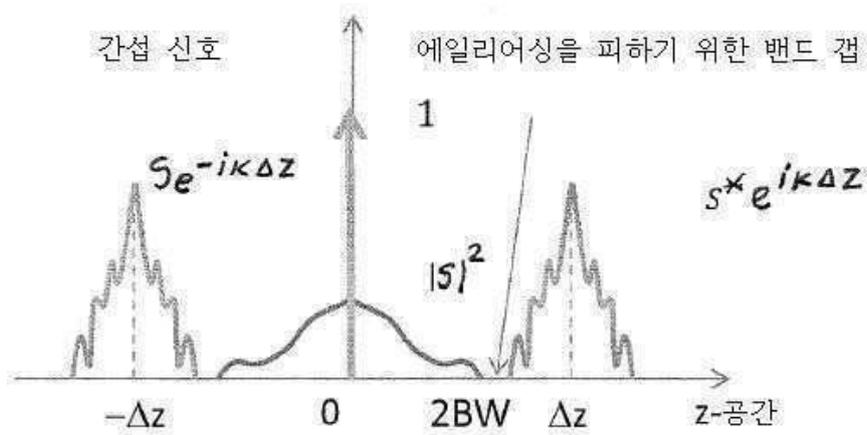
도면9



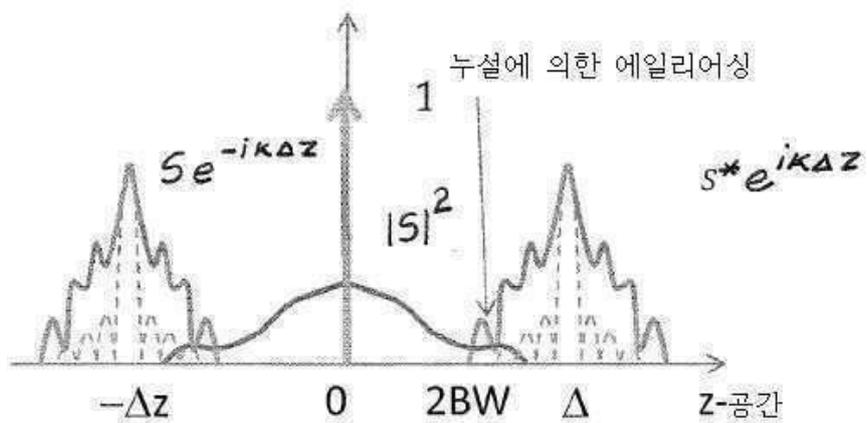
도면10



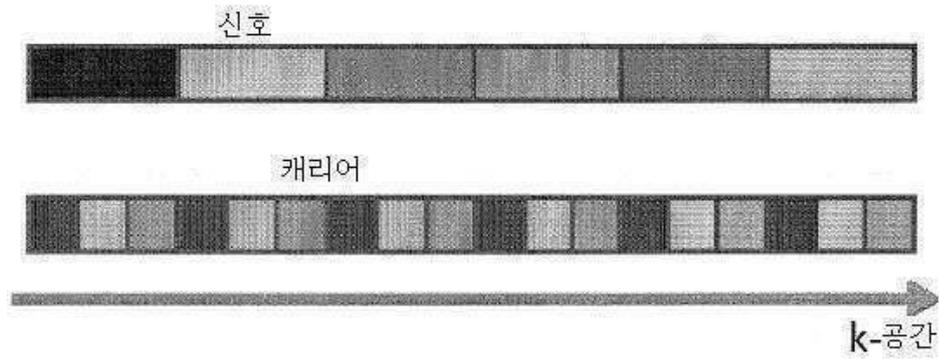
도면11



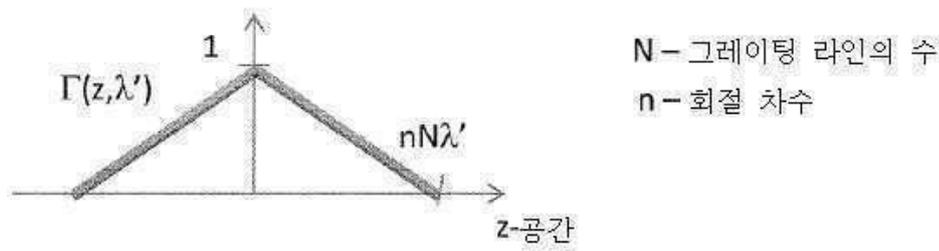
도면12



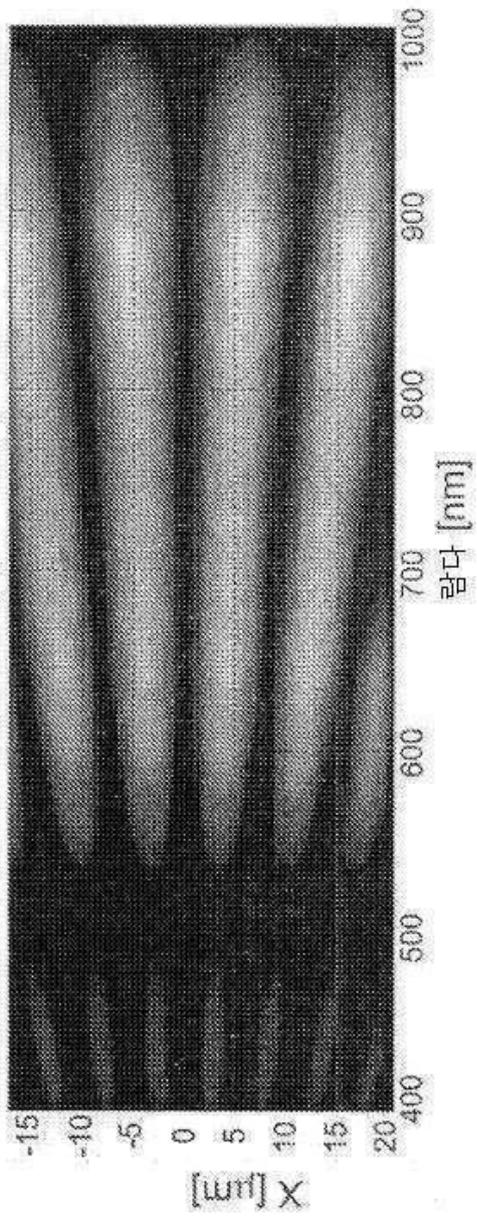
도면13



도면14



도면15a



도면15b

