(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2022년08월11일
(11) 등록번호 10-2431942
(24) 등록일자 2022년08월09일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 21/66 (2006.01) *G01D 21/02* (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01L 22/12 (2013.01)
G01D 21/02 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2020-7011998
(22) 출원일자(국제) 2018년09월25일
심사청구일자 2021년09월23일
(85) 번역문제출일자 2020년04월24일
(65) 공개번호 10-2020-0047749
(43) 공개일자 2020년05월07일
(86) 국제출원번호 PCT/US2018/052507
(87) 국제공개번호 WO 2019/067375
국제공개일자 2019년04월04일
(30) 우선권주장
62/564,119 2017년09월27일 미국(US)
16/138,813 2018년09월21일 미국(US)
(56) 선행기술조사문헌
US20110080585 A1
US20170177760 A1
WO2017102299 A1

(73) 특허권자
케이엘에이 코포레이션
미합중국, 캘리포니아 95035, 밀피타스, 원 테크놀로지 드라이브
(72) 발명자
앳킨스 필립 알
미국 캘리포니아주 95126 산호세 아파트먼트 162 더 앨러미다 1326
데이 퀴
미국 캘리포니아주 95131 산호세 아베니다 베니토 1213
리 리에-퀀 리치
미국 캘리포니아주 94539 프리몬트 파크메도우 드라이브 44659
(74) 대리인
김태홍, 김진희

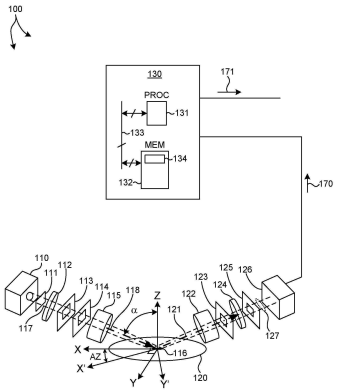
전체 청구항 수 : 총 20 항 심사관 : 홍종선

(54) 발명의 명칭 **비대칭 구조체의 치수의 검출 및 측정**

(57) 요 약

반도체 구조체의 비대칭 피처의 분광 측정을 수행하기 위한 방법 및 시스템이 본원에서 제시된다. 하나의 양태에서, 임의적으로 배향된 비대칭 피처에 대한 감도를 보장하기 위해, 두 개 이상의 방위각에서 측정이 수행된다. 비대칭성에 민감한 하나 이상의 비대각 뮐러 매트릭스 엘리먼트와 관련되는 스펙트럼은, 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭을 결정하기 위해 파장에 걸쳐 통합된다. 몇몇 실시형태에서, 통합은 신호 대 노이즈 비를 증가시키기 위해 선택되는 하나 이상의 파장 하위 영역에 걸쳐 수행된다. 비대칭 피처를 특성 묘사하는 파라미터의 값은 전통적인 스펙트럼 매칭 기반의 기술에 의해 측정되는 임계 치수 파라미터 및 스펙트럼 응답 메트릭에 기초하여 결정된다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
H01L 22/30 (2013.01)

명 세 서

청구범위

청구항 1

계측 시스템(metrology system)으로서,

일정 양의 광대역 광학 방사선(broadband optical radiation)을 생성하도록 구성되는 조명 소스;

두 개 이상의 방위각(azimuth angle)의 각각에서 상기 조명 소스로부터 반도체 웨이퍼의 표면 상의 측정 스팟으로 상기 일정 양의 광대역 광학 방사선을 지향시키는 하나 이상의 광학 엘리먼트;

상기 두 개 이상의 방위각의 각각에서의 반도체 웨이퍼의 조명에 응답하여 상기 반도체 웨이퍼로부터 측정 광의 양을 검출하도록 그리고 측정 광의 각각의 검출된 양에 기초하여 상기 조명에 대한 주목하는 구조체의 측정된 스펙트럼 응답 - 각각의 측정된 스펙트럼 응답은 뮐러 매트릭스(Mueller matrix)의 다수의 엘리먼트와 관련되는 스펙트럼을 포함함 - 을 결정하도록 구성되는 분광계(spectrometer); 및

컴퓨팅 시스템

을 포함하되, 상기 컴퓨팅 시스템은,

상기 두 개 이상의 방위각과 관련되는 상기 측정된 스펙트럼 응답에 대한 모델링된 스펙트럼 응답의 피팅(fitting)에 기초하여 상기 주목하는 구조체를 특성 묘사하는(characterizing) 하나 이상의 임계 치수 파라미터(critical dimension parameter)의 값을 추정하도록;

각각의 측정된 스펙트럼 응답과 관련되는 상기 뮐러 매트릭스의 하나 이상의 비대각 엘리먼트(off-diagonal element)의 적어도 하나의 스펙트럼의 파장의 하나 이상의 하위 범위를 선택하도록;

파장의 상기 선택된 하나 이상의 하위 범위에 걸쳐 상기 뮐러 매트릭스의 상기 하나 이상의 비대각 엘리먼트의 상기 적어도 하나의 스펙트럼을 통합하여 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭(spectral response metric)을 생성하도록;

상기 하나 이상의 임계 치수 파라미터의 상기 값 및 상기 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭에 기초하여 주목하는 상기 구조체의 비대칭 피처(asymmetric feature)를 설명하는 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터(geometric parameter)의 값을 추정하도록

구성되는 것인, 계측 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 컴퓨팅 시스템은 또한,

상기 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값을 반도체 제조 툴에 전달하도록(communicate) 구성되고, 상기 반도체 제조 툴은 측정된 비대칭성에 의해 특성 묘사되는 구조적 결함을 감소시키기 위해 상기 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값에 기초하여 반도체 제조 프로세스의 제어 파라미터를 조정하는 것인, 계측 시스템.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 두 개 이상의 방위각은 서로 수직인 두 개의 방위각을 포함하는 것인, 계측 시스템.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 뮐러 매트릭스의 상기 하나 이상의 비대각 엘리먼트는 상기 뮐러 매트릭스의 M_{30} 엘리먼트를 포함하는

것인, 계측 시스템.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 뮐러 매트릭스의 상기 하나 이상의 비대각 엘리먼트는 상기 뮐러 매트릭스의 M_{20} 및 M_{02} 엘리먼트의 합을 포함하는 것인, 계측 시스템.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 뮐러 매트릭스의 하나 이상의 비대각 엘리먼트의 적어도 하나의 스펙트럼의 파장의 상기 하나 이상의 하위 범위의 선택은, 파장의 상기 하나 이상의 하위 범위 내에서 미리 결정된 임계 값을 초과하는 스펙트럼 응답을 갖는 파장의 하나 이상의 하위 범위를 선택하는 것을 수반하는 것인, 계측 시스템.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값의 추정은 복수의 스펙트럼 응답 메트릭에 기초하되, 상기 복수의 스펙트럼 응답 메트릭의 각각은 상이하게 가중되는 것인, 계측 시스템.

청구항 8

제1항에 있어서,

주목하는 상기 구조체의 비대칭 피쳐를 설명하는 상기 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터는 홀 피쳐(hole faature)의 경사각(tilt angle) 및 배향각(orientation angle) 중 임의의 것을 포함하는 것인, 계측 시스템.

청구항 9

제1항에 있어서,

주목하는 상기 구조체는 고 애스펙트비(high aspect ratio) 메모리 구조체인 것인, 계측 시스템.

청구항 10

제1항에 있어서,

상기 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값의 추정은, 상기 하나 이상의 임계 치수 파라미터의 값 및 상기 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭을 상기 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값에 관련시키는 트레이닝된 신경망 모델을 수반하는 것인, 계측 시스템.

청구항 11

제1항에 있어서,

상기 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값의 추정은, 상기 하나 이상의 임계 치수 파라미터의 값 및 상기 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭을 상기 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터에 관련시키는 선형 회귀 모델(linear regression model)을 수반하는 것인, 계측 시스템.

청구항 12

방법으로서,

두 개 이상의 방위각의 각각에서 일정 양의 광대역 광학 방사선으로 반도체 웨이퍼 상에 제조되는 주목하는 구조체를 조명하는 단계;

상기 두 개 이상의 방위각의 각각에서의 상기 반도체 웨이퍼의 상기 조명에 응답하여 상기 반도체 웨이퍼로부터 측정 광의 양을 검출하는 단계;

측정 광의 각각의 검출된 양에 기초하여 상기 두 개 이상의 방위각의 각각에서 제공되는 상기 조명에 대한 주목하는 상기 구조체의 측정된 스펙트럼 응답 - 각각의 측정된 스펙트럼 응답은 뮐러 매트릭스의 다수의 엘리먼트와 관련되는 스펙트럼을 포함함 - 을 결정하는 단계;

상기 두 개 이상의 방위각과 관련되는 상기 측정된 스펙트럼 응답에 대한 모델링된 스펙트럼 응답의 피팅에 기초하여 하나 이상의 임계 치수 파라미터의 값을 추정하는 단계;

각각의 측정된 스펙트럼 응답과 관련되는 상기 뮐러 매트릭스의 하나 이상의 비대각 엘리먼트의 적어도 하나의 스펙트럼의 파장의 하나 이상의 하위 범위를 선택하는 단계;

파장의 상기 선택된 하나 이상의 하위 범위에 걸쳐 상기 뮐러 매트릭스의 상기 하나 이상의 비대각 엘리먼트의 상기 적어도 하나의 스펙트럼을 통합하여 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭을 생성하는 단계; 및

상기 하나 이상의 임계 치수 파라미터의 값 및 상기 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭에 기초하여 주목하는 상기 구조체의 비대칭 피쳐를 설명하는 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값을 추정하는 단계

를 포함하는, 방법.

청구항 13

제12항에 있어서,

상기 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값을 반도체 제조 툴에 전달하는 단계를 더 포함하되, 상기 반도체 제조 툴은 측정된 비대칭성에 의해 특성 묘사되는 구조적 결함을 감소시키기 위해 상기 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값에 기초하여 반도체 제조 프로세스의 제어 파라미터를 조정하는 것인, 방법.

청구항 14

제12항에 있어서,

상기 두 개 이상의 방위각은 서로 수직인 두 개의 방위각을 포함하는 것인, 방법.

청구항 15

제12항에 있어서,

상기 뮐러 매트릭스의 하나 이상의 비대각 엘리먼트의 적어도 하나의 스펙트럼의 파장의 상기 하나 이상의 하위 범위의 선택은, 파장의 상기 하나 이상의 하위 범위 내에서 미리 결정된 임계 값을 초과하는 스펙트럼 응답을 갖는 파장의 하나 이상의 하위 범위를 선택하는 것을 수반하는 것인, 방법.

청구항 16

제12항에 있어서,

상기 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값의 추정은, 상기 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터를, 상기 하나 이상의 임계 치수 파라미터의 값 및 상기 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭에 관련시키는 트레이닝된 신경망 모델을 수반하는 것인, 방법.

청구항 17

제12항에 있어서,

상기 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값의 추정은, 상기 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터를, 상기 하나 이상의 임계 치수 파라미터의 값 및 상기 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭에 관련시키는 선형 회귀 모델을 수반하는 것인, 방법.

청구항 18

제12항에 있어서,

상기 뮐러 매트릭스의 상기 하나 이상의 비대각 엘리먼트는 상기 뮐러 매트릭스의 적어도 두 개의 엘리먼트의 합을 포함하는 것인, 방법.

청구항 19

계측 시스템으로서,

조명 소스로부터 반도체 웨이퍼의 표면 상의 측정 스팟으로 일정 양의 광대역 광학 방사선을 지향시키는 하나 이상의 광학 엘리먼트;

반도체 웨이퍼의 조명에 응답하여 상기 반도체 웨이퍼로부터 측정 광의 양을 검출하도록 그리고 측정 광의 상기 검출된 양에 기초하여 주목하는 구조체의 측정된 스펙트럼 응답 - 상기 측정된 스펙트럼 응답은 뮐러 매트릭스의 다수의 엘리먼트와 관련되는 스펙트럼을 포함함 - 을 결정하도록 구성되는 분광계; 및

명령어를 포함하는 컴퓨터 판독 가능 매체

를 포함하되, 상기 명령어는, 하나 이상의 프로세서에 의한 실행시, 상기 하나 이상의 프로세서로 하여금,

상기 측정된 스펙트럼 응답에 대한 모델링된 스펙트럼 응답의 피팅에 기초하여 하나 이상의 임계 치수 파라미터의 값을 추정하게 하고;

상기 측정된 스펙트럼 응답과 관련되는 상기 뮐러 매트릭스의 하나 이상의 비대각 엘리먼트의 적어도 하나의 스펙트럼의 파장의 하나 이상의 하위 범위를 선택하게 하고;

파장의 상기 선택된 하나 이상의 하위 범위에 걸쳐 상기 뮐러 매트릭스의 상기 하나 이상의 비대각 엘리먼트의 상기 적어도 하나의 스펙트럼을 통합하여 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭을 생성하게 하고;

상기 하나 이상의 임계 치수 파라미터의 상기 값 및 상기 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭에 기초하여 주목하는 상기 구조체의 비대칭 피쳐를 설명하는 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값을 추정하게

하는 것인, 계측 시스템.

청구항 20

제19항에 있어서,

상기 컴퓨터 판독 가능 매체는, 하나 이상의 프로세서에 의한 실행시, 상기 하나 이상의 프로세서로 하여금, 상기 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값을 반도체 제조 툴에 전달하게 하는 명령어를 더 포함하고, 상기 반도체 제조 툴은 측정된 비대칭성에 의해 특성 묘사되는 구조적 결함을 감소시키기 위해 상기 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값에 기초하여 반도체 제조 프로세스의 제어 파라미터를 조정하는 것인, 계측 시스템.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] [관련 출원에 대한 교차 참조] 본 특허 출원은 2017년 9월 27일자로 출원된 발명의 명칭이 "Detection And Measurement of Dimensions of Asymmetric Structures"인 미국 특허 가출원 일련 번호 제62/564,119호로부터의 35 U.S.C. §119 하에서의 우선권을 주장하는데, 상기 특허 가출원의 주제는 참조에 의해 그 전체가 본원에 통합된다.

[0002] [기술 분야] 설명되는 실시형태는 계측(metrology) 시스템 및 방법에 관한 것으로, 특히, 반도체 구조체의 향상된 측정을 위한 방법 및 시스템에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0003] 로직 및 메모리 디바이스와 같은 반도체 디바이스는 시료(specimen)에 대해 적용되는 일련의 프로세싱 단계에 의해 통상적으로 제조된다. 반도체 디바이스의 다양한 피쳐(feature) 및 다수의 구조적 레벨(structural level)은 이들 프로세싱 단계에 의해 형성된다. 예를 들면, 다른 것들 중에서도, 리소그래피는 반도체 웨이퍼 상에 패턴을 생성하는 것을 수반하는 하나의 반도체 제조 프로세스이다. 반도체 제조 프로세스의 추가적인 예는, 화학적 기계적 연마, 에칭, 퇴적(deposition), 및 이온 주입을 포함하지만, 그러나 이들로 제한되지는 않는다. 다수의 반도체 디바이스는 단일의 반도체 웨이퍼 상에서 제조될 수도 있고, 그 다음, 개개의 반도체 디바이스로 분리될 수도 있다.

[0004] 계측 프로세스는, 웨이퍼 상에서 결함을 검출하여 더 높은 수율을 촉진시키기 위해, 반도체 제조 프로세스 동안

다양한 단계에서 사용된다. 광학적 계측 기술은 샘플 파괴의 위험 없이 높은 스루풋에 대한 잠재성을 제공한다. 나노스케일 구조체의 임계 치수(critical dimension), 막 두께, 조성, 오버레이 및 다른 파라미터의 특성을 묘사하기 위해, 산란측정법(scatterometry) 및 반사측정법(reflectometry) 구현 및 관련 분석 알고리즘을 포함하는 다수의 광학적 계측 기반의 기술이 일반적으로 사용된다.

[0005] 많은 광학 계측 시스템(optical metrology system)은 시료의 물리적 속성(property)을 간접적으로 측정한다. 대부분의 경우, 측정된 광학 신호는 주목하는 물리적 속성을 직접적으로 결정하기 위해 사용될 수 없다.

[0006] 전통적으로, 측정 프로세스는, 특정한 계측 시스템과의 측정 타겟의 상호 작용의 모델에 기초하여 측정된 광학 신호를 예측하려고 시도하는 계측 모델을 공식화하는 것으로 구성된다. 측정 모델은, 주목하는 측정 타겟의 물리적 속성(예를 들면, 막 두께, 임계 치수, 굴절률, 격자 피치 등)의 관점에서 구조체의 파라미터화를 포함한다. 또한, 측정 모델은 측정 툴 그 자체의 파라미터화(예를 들면, 파장, 입사각, 편광 각도, 등등)를 포함한다. 예를 들면, 머신 파라미터는 계측 툴 그 자체를 특성 묘사하기 위해 사용되는 파라미터이다. 예시적인 머신 파라미터는 입사각(angle of incidence; AOI), 분석기 각도(analyzer angle; A_0), 편광기 각도(P_0), 조명 파장, 개구수(numerical aperture; NA) 등등을 포함한다. 시료 파라미터는 시료의 기하학적 속성 및 재료적 속성을 특성 묘사하기 위해 사용되는 파라미터이다. 박막 시료의 경우, 예시적인 시료 파라미터는 굴절률, 유전함수 텐서(dielectric function tensor), 모든 층의 공칭 층 두께, 층 시퀀스, 등등을 포함한다.

[0007] 측정 목적을 위해, 머신 파라미터는 공지된 고정된 파라미터로서 취급되고, 시료 파라미터, 또는 시료 파라미터의 서브세트는 미지의 플로팅 파라미터(floating parameter)로서 취급된다. 플로팅 파라미터는, 측정 모델로부터 유도되는 이론적으로 예측된 스펙트럼 데이터와 측정된 스펙트럼 데이터 사이의 최상의 적합을 생성하는 피팅 프로세스(fitting process)(예를 들면, 회귀(regression), 라이브러리 매칭, 등등)에 의해 결정된다. 미지의 시료 파라미터는 변동되고 모델링된 스펙트럼은 계산되고, 모델링된 스펙트럼과 측정된 스펙트럼 사이의 가장 가까운 매치로 귀결되는 시료 파라미터 값의 세트가 결정될 때까지, 반복적인 방식으로 측정된 스펙트럼 데이터와 비교된다.

[0008] 이 전통적인 모델 기반의 측정 접근법은 비대칭 구조적 피쳐 및 대칭 구조적 피쳐를 설명하는 파라미터의 추정에 적용되었다. 몇몇 예에서, 비대칭 구조적 피쳐를 설명하는 파라미터의 추정은, 특정한 비대각 뮐러 엘리먼트(off-diagonal Mueller element)와 관련되는 매치하는 모델링된 및 측정된 스펙트럼을 강조하는 것에 의해 향상된다. 이 접근법은 Rabello 등등에 대한 미국 특허 제8,525,993호에서 더욱 상세하게 설명되는데, 그 내용은 참조에 의해 그 전체가 본원에 통합된다.

[0009] 불행하게도, 많은 경우에, 주목하는 몇몇 파라미터, 특히, 비대칭 구조적 피쳐를 설명하는 파라미터는 측정된 스펙트럼 응답과 약하게 상관된다. 이들 경우에, 비대칭 구조적 피쳐를 설명하는 파라미터에서의 변화는, 결과적으로 나타나는 스펙트럼에서의 유의미한 변화로 나타나지 않는다. 이것은, 측정 노이즈 및 측정 모델에서의 에러 둘 모두에 기인하여, 이들 파라미터의 회귀 추정된 값(regressed value)의 불확실성을 증가시킨다.

[0010] 더구나, 스펙트럼 피팅 방법은 통상적으로 몇몇 모델 파라미터에 대한 최상의 적합을 달성하는 것을 수반한다. 시뮬레이팅된 스펙트럼과 측정된 스펙트럼 사이의 최상의 매치를 제공하는 파라미터의 세트를 검색하는 동안, 다수의 모델 파라미터가 변동된다. 이것은 최상의 적합에 대한 검색 공간의 차원을 증가시키고, 종종, 측정된 스펙트럼 응답과 약하게 상관되는 파라미터, 특히, 비대칭 구조적 피쳐를 설명하는 파라미터를 강조 해제한다(de-emphasize).

[0011] 또한, 주목하는 파라미터의 모델 기반의 측정은, 종종, 단일의 입사 평면(plane of incidence)으로부터의 주목하는 구조체의 측정에 기초한다. 비대칭 피쳐가 입사 평면을 따라 놓이는 경우, 결과적으로 나타나는 스펙트럼 신호(예를 들면, 하나 이상의 비대각 뮐러 신호)는 비대칭에 둔감할 수도 있다.

[0012] 결과적으로, 전통적인 기술을 사용하여 모델링된 스펙트럼을 측정된 스펙트럼과 매칭시키는 것에 의해 비대칭 구조적 피쳐를 설명하는 파라미터를 신뢰성 있게 결정하는 것은 종종 가능하지 않다.

[0013] 요약하면, 피쳐 사이즈에서의 지속적인 감소 및 구조적 피쳐의 증가하는 깊이는 광학 계측 시스템에 대한 어려운 요건을 부과한다. 광학 계측 시스템은, 비용 효율성을 유지하기 위해 높은 스루풋에서 점점 더 복잡해지는 타겟에 대해 높은 정밀도 및 정확도 요건을 충족해야만 한다. 주목하는 많은 구조적 피쳐는 비대칭성을 나타낸다. 특히, 고급(advanced) 메모리 구조체의 제조는, 빈번하게 비대칭성을 나타내는 깊은 홀을 수반한다. 이러한 맥락에서, 비대칭 구조적 피쳐의 신뢰 가능한 측정은 광학 계측 시스템의 유효성에서 중요한 인자로서 출현하였다. 따라서, 비대칭 구조적 피쳐의 측정과 관련되는 한계를 극복하기 위한 향상된 계측 시스템 및 방법이 소망

된다.

발명의 내용

[0014] 반도체 구조체의 비대칭 피처의 분광 측정(spectroscopic measurement)을 수행하기 위한 방법 및 시스템이 본원에서 제시된다. 측정된 스펙트럼은, 고급 반도체 구조체의 제조로부터 발생하는 대칭 파괴 결함의 측정을 강조하도록 프로세싱된다.

[0015] 하나의 양태에서, 주목하는 구조체의 비대칭 피쳐를 설명하는 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터(geometric parameter)의 값은, 스펙트럼 매칭 및 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭(spectral response metric)에 의해 신뢰성 있게 추정되는 하나 이상의 임계 치수 파라미터의 값에 기초하여 결정된다. 스펙트럼 응답 메트릭은 하나 이상의 비대각 뮐러 매트릭스 엘리먼트와 관련되는 스펙트럼으로부터 유도되는 스칼라 값이다. 일반적으로, 스펙트럼 응답 메트릭은 비대칭 피쳐 및 스펙트럼 매칭에 의해 신뢰성 있게 결정되는 다른 임계 치수에 의존한다.

[0016] 몇몇 실시형태에서, 트레이닝된 선형 모델은 비대칭 파라미터를 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭 및 스펙트럼 매칭에 의해 신뢰성 있게 결정되는 하나 이상의 임계 치수에 관련시킨다. 비대칭 파라미터의 추정된 값은 트레이닝된 모델의 회귀에 의해 결정된다.

[0017] 몇몇 실시형태에서, 트레이닝된 신경망 모델은 측정된 스펙트럼 응답 메트릭 및 임계 치수 파라미터를 비대칭 파라미터의 값에 매핑한다.

[0018] 몇몇 실시형태에서, 트레이닝된 선형 모델 및 트레이닝된 신경망 모델과 같은 모델의 조합은 하나 이상의 비대칭 파라미터의 값을 추정하기 위해 활용된다.

[0019] 추가적인 양태에서, 주목하는 구조체의 스펙트럼 측정은 두 개 이상의 상이한 방위각(azimuth angle)에서 수행된다. 결과적으로 나타나는 측정은, 구조체의 비대칭 피쳐를 특성 묘사하는 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터를 추정하기 위해 활용된다. 바람직한 실시형태에서, 스펙트럼 측정은 서로 직교하는 두 개의 방위각에서 수행된다. 다수의 직교 측정의 조합은 주목하는 구조체의 비대칭 피쳐 및 비대칭 피쳐가 따라서 놓이는 축을 특성 묘사하는 기하학적 형상 파라미터의 정확한 추정을 가능하게 한다.

[0020] 다른 추가적인 양태에서, 스펙트럼 응답 메트릭은 뮐러 매트릭스의 하나 이상의 비대각 엘리먼트와 관련되는 측정된 스펙트럼을 통합하는 것에 의해 결정된다. 스펙트럼 응답 메트릭은 비대칭성에 기인하는 스펙트럼 응답의 스칼라 척도이다. 측정된 스펙트럼에 걸친 통합은 노이즈를 감소시키고 뮐러 매트릭스 엘리먼트 또는 뮐러 매트릭스 엘리먼트의 조합과 관련되는 신호 강도를 증가시킨다.

[0021] 다른 추가적인 양태에서, 뮐러 매트릭스의 하나 이상의 비대각 엘리먼트와 관련되는 파장의 하나 이상의 하위 범위(sub-range)가 선택된다. 더구나, 스펙트럼 응답 메트릭은 파장의 선택된 하위 범위에 걸쳐 뮐러 매트릭스의 하나 이상의 비대각 엘리먼트와 관련되는 스펙트럼을 통합하는 것에 의해 결정된다. 몇몇 예에서, 이용 가능한 측정된 스펙트럼의 선택된 부분에 기초하여 스펙트럼 응답 메트릭을 결정하는 것은 비대칭 피쳐를 설명하는 파라미터(들)에 대한 스펙트럼 응답 메트릭의 감도를 증가시킨다. 이것은 비대칭 피쳐에 대한 가장 큰 감도의 파장을 강조하는 것 및 통합을 통해 랜덤 노이즈의 영향을 감소시키는 것에 의해 달성된다.

[0022] 추가적인 양태에서, 상이한 스펙트럼 응답 메트릭은, 예를 들면, 각각의 스펙트럼 응답 메트릭을 상이한 상수로 스케일링하는 것에 의해 상이하게 가중된다. 이러한 방식으로, 특정한 비대칭 파라미터에 더욱 민감한 스펙트럼 응답 메트릭은, 특정한 비대칭 파라미터에 덜 민감한 스펙트럼 응답 메트릭 보다 더 크게 가중된다

[0023] 여전히 다른 양태에서, 본원에서 설명되는 측정 결과는 제조 프로세스 툴(예를 들면, 리소그래피 툴, 에칭 툴, 퇴적 툴, 등등)에 대한 능동 피드백(active feedback)으로서 제공된다.

[0024] 전술한 내용은 개요이며, 따라서, 필요에 의해, 세부사항의 단순화, 일반화, 및 생략을 포함하며; 결과적으로, 개요는 단지 예시적인 것이며 어떠한 방식으로든 제한하지는 않는다는 것을 기술 분야의 숙련된 자는 인식할 것이다. 본원에 설명되는 디바이스 및/또는 프로세스의 다른 양태, 독창적인 피쳐, 및 이점은, 본원에서 기술되는 비제한적인 상세한 설명에서 명확해질 것이다.

도면의 간단한 설명

[0025] 도 1은 하나의 실시형태에서 비대칭 구조적 피쳐의 분광 측정을 수행하기 위한 계측 시스템(100)을 묘사한다.

도 2는 경사 홀 피쳐(tilted hole feature)(150)를 포함하는 도 1에서 묘사되는 웨이퍼(120)의 상면도를 묘사한다.

도 3은 도 2에서 묘사되는 섹션 A의 단면도를 묘사한다.

도 4는 다수의 홀 섹션을 포함하는, 도 2에서 묘사되는 섹션 A의 단면도를 묘사한다.

도 5는 뮐러 매트릭스 엘리먼트(M_{02} 및 M_{20})의 합과 관련되는 스펙트럼 응답(153)의 예시를 묘사한다.

도 6은 시뮬레이션과 관련되는 실제 경사각과 본원에서 설명되는 트레이닝된 선형 모델에 의해 추정되는 경사각의 회귀 추정된 값 사이의 비교를 예시하는 시뮬레이팅된 결과의 플롯을 묘사한다.

도 7은 도 6에서 묘사되는 동일한 시뮬레이션과 관련되는 실제 배향각(orientation angle)과 본원에 설명되는 트레이닝된 선형 모델에 의해 추정되는 배향각의 회귀 추정된 값 사이의 비교를 예시하는 시뮬레이팅된 결과의 플롯을 묘사한다.

도 8은 신경망 모델 및 트레이닝된 선형 모델의 조합에 의해 추정되는 경사각의 회귀 추정된 값과 실제 경사각 사이의 비교를 예시하는 시뮬레이팅된 결과의 플롯을 묘사한다.

도 9는 신경망 모델 및 트레이닝된 선형 모델의 조합에 의해 추정되는 배향각의 회귀 추정된 값과 실제 배향각 사이의 비교를 예시하는 시뮬레이팅된 결과의 플롯을 묘사한다.

도 10은 트레이닝된 신경망 모델에 의해 추정되는 경사각의 회귀 추정된 값과 실제 경사각 사이의 비교를 예시하는 시뮬레이팅된 결과의 플롯을 묘사한다.

도 11은 주목하는 예시적인 고 애스펙트비(high aspect ratio) NAND 구조체를 묘사한다.

도 12는 적어도 하나의 신규 양태에서 비대칭 구조적 피쳐의 분광 측정을 수행하는 방법(200)을 예시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0026] 이제, 배경 기술의 예 및 본 발명의 몇몇 실시형태에 대한 상세한 참조가 이루어질 것인데, 본 발명의 실시형태의 예는 첨부의 도면에서 예시된다.

[0027] 반도체 구조체의 비대칭 피쳐의 분광 측정을 수행하기 위한 방법 및 시스템이 본원에서 제시된다. 측정된 스펙트럼은, 고급 반도체 구조체의 제조로부터 발생하는 대칭 파괴 결함의 측정을 강조하도록 프로세싱된다. 예를 들면, 깊은 홀(deep hole)을 에칭하는 프로세스를 제어하는 것은, 고 애스펙트비 메모리 구조체, 예를 들면, 삼차원 NAND 메모리의 제조에서 중요한 프로세스 요건으로서 출현하였다. 임의적으로 배향된 비대칭 피쳐에 대한 감도를 보장하기 위해, 주목하는 구조체의 측정은 두 개 이상의 방위각에서 수행된다. 비대칭성에 민감한 하나 이상의 비대각 뮐러 매트릭스 엘리먼트와 관련되는 스펙트럼이 추가 분석을 위해 선택된다. 선택된 스펙트럼은 신호 대 노이즈 비를 증가시키기 위해 선택되는 하나 이상의 파장 하위 영역으로 더 세분된다. 선택된 스펙트럼은 선택된 파장 하위 영역에 걸쳐 통합되어 비대각 뮐러 매트릭스 엘리먼트와 관련되는 스펙트럼 응답 메트릭을 생성한다. 비대칭 피쳐의 기하학적 형상을 특성 묘사하는 파라미터의 값은, 전통적인 스펙트럼 매칭 기반의 기술에 의해 측정되는 임계 치수 파라미터 및 스펙트럼 응답 메트릭에 기초하여 결정된다. 이들 피쳐는, 개별적으로, 또는 조합하여, 높은 스루풋, 정밀도 및 정확도를 갖는, 고 애스펙트비 구조체(예를 들면, 1 마이크로미터 이상의 깊이를 갖는 구조체)의 비대칭 피쳐의 높은 스루풋 측정을 가능하게 한다.

[0028] 도 1은 반도체 구조체의 비대칭 구조적 피쳐의 측정을 수행하기 위한 예시적인 계측 시스템(100)을 묘사한다. 몇몇 예에서, 반도체 구조체는 적어도 하나의 고 애스펙트비(high aspect ratio; HAR) 구조체를 포함한다. 도 1에서 묘사되는 바와 같이, 계측 시스템(100)은 광대역 분광 타원편광 해석기(broadband spectroscopic ellipsometer)로서 구성된다. 그러나, 일반적으로, 계측 시스템(100)은 분광 반사계(spectroscopic reflectometer), 산란계(scatterometer), 타원편광 해석기(ellipsometer), 또는 이들의 임의의 조합으로 구성될 수도 있다.

[0029] 계측 시스템(100)은, 웨이퍼(120) 상에 입사하는 조명 광(117)의 빔을 생성하는 조명 소스(110)를 포함한다. 몇몇 실시형태에서, 조명 소스(110)는, 자외선, 가시광선, 및 적외선 스펙트럼에서 조명 광을 방출하는 광대역 조명 소스이다. 하나의 실시형태에서, 조명 소스(110)는 레이저 지속 플라즈마(laser sustained plasma; LSP) 광원(일명, 레이저 구동 플라즈마 소스)이다. LSP 광원의 펌프 레이저는 연속파 또는 펄스식일 수도 있다. 레이저 구동 플라즈마 소스는 150 나노미터에서부터 2000 나노미터까지의 전체 파장 범위에 걸쳐 크세논(Xenon) 램프보

다 훨씬 더 많은 광자를 생성할 수 있다. 조명 소스(110)는 단일의 광원 또는 복수의 광대역 또는 불연속 파장 광원의 조합일 수 있다. 조명 소스(110)에 의해 생성되는 광은, 자외선에서부터 적외선까지의(예를 들면, 진공 자외선 내지 중간 적외선) 연속 스펙트럼 또는 연속 스펙트럼의 일부를 포함한다. 일반적으로, 조명 광원(110)은 초 연속 레이저 소스(super continuum laser source), 적외선 헬륨-네온 레이저 소스, 아크 램프, 또는 임의의 다른 적절한 광원을 포함할 수도 있다.

[0030] 추가적인 양태에서, 조명 광의 양은 적어도 500 나노미터에 걸치는 파장의 범위를 포함하는 광대역 조명 광이다. 하나의 예에서, 광대역 조명 광은 250 나노미터 미만의 파장 및 750 나노미터 초과의 파장을 포함한다. 일반적으로, 광대역 조명 광은 120 나노미터와 3,000 나노미터 사이의 파장을 포함한다. 몇몇 실시형태에서, 3,000 나노미터를 넘어서는 파장을 포함하는 광대역 조명 광이 활용될 수도 있다.

[0031] 도 1에서 묘사되는 바와 같이, 계측 시스템(100)은 웨이퍼(120) 상에 형성되는 하나 이상의 구조체로 조명 광(117)을 지향시키도록 구성되는 조명 서브시스템을 포함한다. 조명 서브시스템은 광원(110), 하나 이상의 광학 필터(111), 편광 컴포넌트(polarizing component)(112), 시야 조리개(field stop)(113), 어퍼쳐 조리개(aperture stop)(114), 및 조명 광학기기(illumination optic)(115)를 포함하는 것으로 도시되어 있다. 하나 이상의 광학 필터(111)는 조명 서브시스템으로부터의 광 레벨, 스펙트럼 출력, 또는 둘 모두를 제어하기 위해 사용된다. 몇몇 예에서, 하나 이상의 다중 구역 필터(multi-zone filter)가 광학 필터(111)로서 활용된다. 편광 컴포넌트(112)는 조명 서브시스템을 빠져나가는 소망되는 편광 상태를 생성한다. 몇몇 실시형태에서, 편광 컴포넌트는 편광기(polarizer), 보상기(compensator), 또는 둘 모두이고, 임의의 적절한 상업적으로 입수 가능한 편광 컴포넌트를 포함할 수도 있다. 편광 컴포넌트는 고정될 수 있거나, 상이한 고정된 위치로 회전 가능할 수 있거나, 또는 연속적으로 회전할 수 있다. 비록 도 1에서 묘사되는 조명 서브시스템이 하나의 편광 컴포넌트를 포함하지만, 조명 서브시스템은 하나보다 더 많은 편광 컴포넌트를 포함할 수도 있다. 시야 조리개(113)는 조명 서브시스템의 시야(field of view; FOV)를 제어하고 임의의 적절한 상업적으로 입수 가능한 시야 조리개를 포함할 수도 있다. 어퍼쳐 조리개(114)는 조명 서브시스템의 개구수(NA)를 제어하고 임의의 적절한 상업적으로 입수 가능한 어퍼쳐 조리개를 포함할 수도 있다. 조명 소스(110)로부터의 광은 조명 광학기기(115)를 통해 웨이퍼(120) 상의 하나 이상의 구조체(도 1에 도시되지 않음) 상에 집속되도록 지향된다. 조명 서브시스템은 광학 필터(들)(111), 편광 컴포넌트(112), 시야 조리개(113), 어퍼쳐 조리개(114) 및 분광 타원편광 해석법(spectroscopic ellipsometry), 반사측정법 및 산란측정법에서 공지되어 있는 조명 광학기기(115)의 임의의 타입 및 배열을 포함할 수도 있다.

[0032] 묘사되는 바와 같이, 도 1에서, 조명 광(117)의 빔은, 빔이 조명 소스(110)로부터 웨이퍼(120)로 전파됨에 따라, 광학 필터(들)(111), 편광 컴포넌트(112), 시야 조리개(113), 어퍼쳐 조리개(114), 및 조명 광학기기(115)를 통과한다. 빔(117)은 측정 스팟(116) 위에서 웨이퍼(120)의 일부를 조명한다.

[0033] 계측 시스템(100)은 또한, 하나 이상의 구조체와 입사 조명 빔(117) 사이의 상호 작용에 의해 생성되는 광을 수집하도록 구성되는 수집 광학기기(collection optic) 서브시스템을 포함한다. 수집된 광(127)의 빔은 수집 광학기기(122)에 의해 측정 스팟(116)으로부터 수집된다. 수집된 광(127)은 수집 광학기기 서브시스템의 수집 어퍼쳐 조리개(collection aperture stop)(123), 편광 엘리먼트(124), 및 시야 조리개(125)을 통과한다.

[0034] 수집 광학기기(122)는 웨이퍼(120) 상에 형성되는 하나 이상의 구조체로부터 광을 수집하기 위한 임의의 적절한 광학 엘리먼트를 포함한다. 수집 어퍼쳐 조리개(123)는 수집 광학기기 서브시스템의 NA를 제어한다. 편광 엘리먼트(124)는 소망되는 편광 상태를 분석한다. 편광 엘리먼트(124)는 편광기 또는 보상기이다. 편광 엘리먼트(124)는 고정될 수 있거나, 상이한 고정된 위치로 회전 가능할 수 있거나, 또는 연속적으로 회전할 수 있다. 비록 도 1에서 묘사되는 수집 서브시스템이 하나의 편광 엘리먼트를 포함하지만, 수집 서브시스템은 하나보다 더 많은 편광 엘리먼트를 포함할 수도 있다. 수집 시야 조리개(collection field stop)(125)는 수집 서브시스템의 시야를 제어한다. 수집 서브시스템은 웨이퍼(120)로부터 광을 취하고, 수집 광학기기(122) 및 편광 엘리먼트(124)를 통해 수집 시야 조리개(125) 상에 집속되도록 그 광을 지향시킨다. 몇몇 실시형태에서, 수집 시야 조리개(125)는 검출 서브시스템의 분광계(spectrometer)에 대한 분광계 슬릿(spectrometer slit)으로서 사용된다. 그러나, 수집 시야 조리개(125)는 검출 서브시스템의 분광계의 분광계 슬릿에 또는 그 근처에 위치될 수도 있다.

[0035] 수집 서브시스템은 분광계 타원편광 해석법, 반사측정법, 및 산란측정법의 기술 분야에서 공지되어 있는 수집 광학기기(122), 어퍼쳐 조리개(123), 편광 엘리먼트(124), 및 시야 조리개(125)의 임의의 타입 및 배열을 포함할 수도 있다.

[0036] 도 1에서 묘사되는 실시형태에서, 수집 광학기기 서브시스템은 광을 분광계(126)로 지향시킨다. 분광계(126)는 조명 서브시스템에 의해 조명되는 하나 이상의 구조체로부터 수집되는 광에 응답하여 출력을 생성한다. 하나의 예에서, 분광계(126)의 검출기는 자외선 및 가시광(예를 들면, 190 나노미터와 860 나노미터 사이의 파장을 갖는 광)에 민감한 전하 결합 소자(charge coupled device; CCD)이다. 다른 예에서, 분광계(126)의 검출기 중 하나 이상은 적외선(예를 들면, 950 나노미터와 2500 나노미터 사이의 파장을 갖는 광)에 민감한 광 검출기 어레이(photo detector array; PDA)이다. 그러나, 일반적으로, 다른 검출기 기술(예를 들면, 위치 감지 검출기(position sensitive detector; PSD), 적외선 검출기, 광기전 검출기(photovoltaic detector), 등등)이 고려될 수도 있다. 각각의 검출기는 입사광을 입사광의 스펙트럼 강도를 나타내는 전기 신호로 변환한다. 일반적으로, 분광계(126)는 조명 광에 대한 피측정 구조체의 스펙트럼 응답을 나타내는 출력 신호(170)를 생성한다.

[0037] 계측 시스템(100)은 또한, 주목하는 구조체의 측정된 스펙트럼 응답을 나타내는 신호(170) 및 측정된 스펙트럼 응답에 기초하여 측정된 구조체(들)의 비대칭 피처를 설명하는 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터(171)의 추정 값을 수신하도록 구성되는 컴퓨팅 시스템(130)을 포함한다.

[0038] 일반적으로, 주목하는 구조체의 측정된 스펙트럼 응답은 측정된 응답을 특성 묘사하기 위해 활용되는 뮐러 매트릭스 공식화(Mueller matrix formulation)의 엘리먼트와 관련되는 스펙트럼을 포함한다. 스톡스-뮐러 형식론(Stokes-Mueller formalism)은 편광에 의한 여기에 대한 매체의 응답을 설명한다. 식 (1)은, 스톡스 벡터(Stokes vector)(S_I)에 의해 특성 묘사되는 입사 빔과 스톡스 벡터(S_R)에 의해 특성 묘사되는 반사 빔 사이의 관계를 설명하는 뮐러 매트릭스(M)를 예시한다.

[0039] $$S_R = MS_I \qquad (1)$$

[0040] 일반적으로, 스톡스 벡터는 광파(light wave)의 편광의 상태를 나타낸다. 예로서, 식 (2)은 스톡 벡터(S)를 예시하는데, 여기서 I는 총 강도이고, I_0은 전파 방향에 수직인 평면에서 P 편광 축에 대한 0 도의 각도에서 배향되는 선형 편광기에 의해 투과되는 강도이고, I_{45}는 전파 방향에 수직인 평면에서 P 편광 축에 대한 45 도의 각도에서 배향되는 선형 편광기에 의해 투과되는 강도이고, I_{-45}는 전파 방향에 수직인 평면에서 P 편광 축에 대한 -45 도의 각도에서 배향되는 선형 편광기에 의해 투과되는 강도이고, I_R은 우측 원형 편광기에 의해 투과되는 강도이고, I_L은 좌측 원형 편광기에 의해 투과되는 강도이다. 괄호 안의 수량은 공간적으로 그리고 시간적으로 평균된다.

$$S = \begin{bmatrix} I \\ \langle I_0 - I_{90} \rangle \\ \langle I_{45} - I_{-45} \rangle \\ \langle I_R - I_L \rangle \end{bmatrix} \qquad (2)$$

[0041]

[0042] 특정한 분광 측정을 위해, 입사 빔의 조명 강도 및 편광 속성이 프로그래밍된다. 따라서, 입사 빔과 관련되는 스톡스 벡터(S_I)의 엘리먼트의 일부 또는 모두는 선험적으로 알려져 있다. 더구나, 반사된 빔의 강도 및 편광 속성은 분광계(즉, 분광계(126))에 의해 측정된다. 따라서, 반사된 빔과 관련되는 스톡스 벡터(S_R)의 엘리먼트의 일부 또는 모두가 측정된다. 결과적으로, 뮐러 매트릭스 엘리먼트의 일부 또는 모두는 입사 광 및 반사된 광 각각의 공지된 및 측정된 속성에 기초하여 결정된다. 식 [3]은 뮐러 매트릭스의 엘리먼트 및 스톡스 벡터(S_I 및 S_R) 각각의 공지된 및 측정된 엘리먼트와의 그들의 관계를 예시한다.

$$S_R = \begin{bmatrix} M_{00} & M_{01} & M_{02} & M_{03} \\ M_{10} & M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{20} & M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{30} & M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} S_I \qquad (3)$$

[0043]

[0044] 뮐러 매트릭스의 엘리먼트의 일부 또는 모두는, 식 [3]에서 예시되는 선형 관계에 기초하여, 스톡스 벡터(S_I 및 S_R)의 공지된 엘리먼트로부터 직접적으로 결정될 수도 있다. 뮐러 매트릭스 엘리먼트의 일부 또는 모두가 결정되는지의 여부는, 입사광의 공지된 강도 및 편광 속성 및 반사된 광의 측정된 강도 및 편광 속성에 의존한다. 예

를 들면, 편광기(112)가 회전 편광기(rotating polarizer)로서 구성되고 편광기(124)가 회전 분석기(rotating analyzer)로서 구성되는 경우, 뮐러 매트릭스의 처음 세 개의 행 및 처음 세 개의 열의 엘리먼트가 결정될 수도 있다. 또한, 계측 시스템(100)의 조명 경로 및 수집 경로에서 회전 보상기(rotating compensator)가 활용되는 경우, 4×4 뮐러 매트릭스의 모든 엘리먼트가 결정될 수도 있다.

[0045] 추가적인 양태에서, 하나 이상의 임계 치수 파라미터의 값은 뮐러 매트릭스의 하나 이상의 엘리먼트와 관련되는 측정된 스펙트럼 응답에 대한 모델링된 스펙트럼 응답의 피팅에 기초하여 결정된다. 통상적으로, 피측정 구조체의 비대칭 피쳐를 설명하지 않는 많은 임계 치수 파라미터는 하나 이상의 뮐러 매트릭스 엘리먼트에 걸친 스펙트럼 매칭에 기초하여 신뢰성 있게 추정된다. 그러나, 심지어 뮐러 매트릭스의 특정한 비대각 엘리먼트와 관련되는 스펙트럼 매칭이 활용되는 경우에도, 구조체의 비대칭 피쳐를 설명하는 기하학적 형상 파라미터는, 통상적으로, 스펙트럼 매칭에 의해 신뢰성 있게 추정되지 않는다.

[0046] 하나의 양태에서, 주목하는 구조체의 비대칭 피쳐를 설명하는 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값은 스펙트럼 매칭 및 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭에 의해 신뢰성 있게 추정되는 하나 이상의 임계 치수 파라미터의 값에 기초하여 결정된다. 스펙트럼 응답 메트릭은 하나 이상의 비대각 뮐러 매트릭스 엘리먼트와 관련되는 스펙트럼으로부터 유도되는 스칼라 값이다. 일반적으로, 스펙트럼 응답 메트릭은 비대칭 피쳐 및 스펙트럼 매칭에 의해 신뢰성 있게 결정되는 다른 임계 치수에 의존한다. 본 발명자는, 비대칭 파라미터 값의 추정으로부터 스펙트럼 매칭을 통한 임계 치수 파라미터의 추정을 분리하는 것이 비대칭 파라미터 값의 측정을 향상시킨다는 것을 발견하였다. 몇몇 실시형태에서, 트레이닝된 선형 모델은 비대칭 파라미터를 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭 및 스펙트럼 매칭에 의해 신뢰성 있게 결정되는 하나 이상의 임계 치수에 관련시킨다. 비대칭 파라미터의 추정된 값은 트레이닝된 모델의 회귀에 의해 결정된다. 몇몇 실시형태에서, 트레이닝된 신경망 모델은 측정된 스펙트럼 응답 메트릭 및 임계 치수 파라미터를 비대칭 파라미터의 값에 매핑한다. 몇몇 실시형태에서, 트레이닝된 선형 모델 및 트레이닝된 신경망 모델과 같은 모델의 조합은 하나 이상의 비대칭 파라미터의 값을 추정하기 위해 활용된다. 일반적으로, 하나 이상의 비대칭 파라미터의 값을 추정하기 위해, 임의의 적절한 모델링 방법론이 활용될 수도 있다.

[0047] 도 2는 웨이퍼(120) 상에 제조되는 비대칭 홀 피쳐(150)를 묘사한다. 도 2에서 묘사되는 바와 같이, X-Y 좌표 프레임이 웨이퍼(120)에 부착된다. X-Y 좌표 프레임의 X 축은 웨이퍼(120)의 스크라이브 라인(scribe line)(154)과 정렬된다. 도 2에서 묘사되는 바와 같이, 홀 피쳐(150)는 웨이퍼(120)의 표면에 대해 수직이 아니다. 홀 피쳐의 스큐(skew)의 방향은, 웨이퍼(120)의 스크라이브 라인(154)의 방향에 대하여 각도 OA에서 배향된다. 유사하게, 홀 피쳐의 스큐의 방향은 웨이퍼(120)에 부착되는 X-Y 좌표 프레임의 X 방향에 대하여 배향각 OA에 있다.

[0048] 도 3은 도 1에서 묘사되는 홀 피쳐(150)의 스큐의 방향과 정렬되는 A-A 단면도를 묘사한다. 구체적으로, 도 3은 웨이퍼(120)의 표면 바로 아래의 최상부 층(top layer) 또는 일련의 층(120A)을 묘사한다. 도 3에서 묘사되는 바와 같이, 홀 피쳐(150)는 웨이퍼(120)의 표면 법선에 대하여 각도 TA로 기울어진다. 도 2 및 도 3에서 묘사되는 예에서, 비대칭 홀 피쳐(150)는 두 개의 비대칭 파라미터: 배향각 OA 및 경사각(tilt angle) TA에 의해 설명된다.

[0049] 도 4는 도 1에서 묘사되는 홀 피쳐(150)의 스큐의 방향과 정렬되는 A-A 단면도를 묘사한다. 구체적으로, 도 4는 웨이퍼(120)의 표면 바로 아래의 최상부 층 또는 일련의 층(120A) 및 층(들)(120A) 바로 아래의 매립 층 또는 일련의 층(120B)을 묘사한다. 도 4에서 묘사되는 바와 같이, 홀 섹션(150)은 웨이퍼(120)의 표면 법선에 대하여 각도 TA_1로 기울어지고, 홀 섹션(152)은 웨이퍼(120)의 표면 법선에 대하여 각도 TA_2로 기울어진다. 또한, 홀 섹션(152)은 오버레이 오프셋(overlay offset) OL에 의해 홀 섹션(150)에 대하여 수평으로(즉, 웨이퍼(120)의 표면에 평행한 방향으로) 시프트된다. 도 4에서 묘사되는 예에서, 비대칭 홀 섹션(150 및 152)은 네 개의 비대칭 파라미터: 배향각 OA, 경사각 TA_1 및 TA_2, 및 오버레이 오프셋 OL에 의해 설명된다.

[0050] 기울어진 홀 섹션(150 및 152)은 비제한적인 예로서 제공된다. 일반적으로, 많은 상이한 구조체가 비대칭 피쳐를 나타낼 수도 있다. 더구나, 동일한 비대칭 피쳐는 비대칭 파라미터의 상이한 세트에 의해 설명될 수도 있다. 하나의 예에서, 비대칭 홀 피쳐는 또한, 홀의 타원형 형상에 의해 파라미터화될 수도 있다.

[0051] 추가적인 양태에서, 주목하는 구조체의 스펙트럼 측정은 두 개 이상의 상이한 방위각에서 수행된다. 결과적으로 나타나는 측정은, 본원에서 설명되는 바와 같이 주목하는 구조체의 비대칭 피쳐를 특성 묘사하는 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터를 추정하기 위해 활용된다. 바람직한 실시형태에서, 스펙트럼 측정은 서로 직교하는 두

개의 방위각에서 수행된다. 다수의 직교 측정의 조합은 주목하는 구조체의 비대칭 피쳐 및 비대칭 피쳐가 따라서 놓이는 축을 특성 묘사하는 기하학적 형상 파라미터의 정확한 추정을 가능하게 한다. 예를 들면, 비대칭 피쳐가 하나의 측정의 입사 평면을 따라 놓이는 경우, 직교하는 측정은 비대칭성에 민감할 것이다.

[0052] 도 1에서 묘사되는 바와 같이, Z 축은 웨이퍼(120)의 표면에 수직으로 배향된다. X 및 Y 축은 웨이퍼(120)의 표면과 동일 평면에 있고, 따라서 Z 축에 수직이다. 유사하게, X' 및 Y' 축은 웨이퍼(120)의 표면과 동일 평면에 있고, 따라서 Z 축에 수직이다. X' 및 Y' 축은 X 및 Y 축에 대해 방위각 AZ만큼 회전된다. 방위각은 Z 축을 중심으로 웨이퍼(120)로의 광 전달의 방향을 명시한다. 조명 광(117)의 빔의 주 광선(chief ray)(118) 및 수집된 광(127)의 빔의 주 광선(121)은 입사 평면을 정의한다. X' 축은 입사 평면과 정렬되고 Y' 축은 입사 평면에 직교한다. 이러한 방식으로, 입사 평면은 X'Z 평면에 놓인다. 조명 광(117)의 빔은, Z 축에 대하여 입사각 α에서 웨이퍼(120)의 표면 상에 입사하고 입사 평면 내에 놓인다.

[0053] 일반적으로, 피측정 웨이퍼에 대한 비대칭 피쳐의 방위(orientation)는 선험적으로 공지되어 있지 않다. 다수의 방위각에서의 측정은, 측정 중 적어도 하나가 비대칭 피쳐에 민감한 것을 보장한다. 또한, 두 직교 방위각에서 측정을 수행하는 것은 비대칭의 축을 정확하게 결정할 가능성을 증가시킨다. 이것은, 예를 들면, 측정의 제1 세트의 입사 평면에 대한 비대칭 피쳐의 배향각을 측정하는 것 및 측정의 제2 세트와 관련되는 제2 입사 평면에 대한 비대칭 피쳐의 배향각을 측정하는 것에 의해 달성된다. 두 개의 측정과 관련되는 입사 평면의 방위가 웨이퍼에 대해 공지되어 있으므로, 웨이퍼에 대한 비대칭 피쳐의 배향각은 측정 둘 모두로부터 직접적으로 결정된다. 많은 측정 시나리오에서, 측정 둘 모두는 웨이퍼에 대한 배향각의 독립적 추정치를 제공한다. 그러나, 비대칭 피쳐가 특정한 측정의 입사 평면과 정렬되는 몇몇 시나리오에서, 측정은 비대칭성에 민감하지 않다. 이들 시나리오에서, 직교 측정은 동일한 비대칭 피쳐에 가장 민감하며, 따라서, 웨이퍼에 대한 비대칭 피쳐의 배향각의 가장 신뢰 가능한 추정치를 제공한다.

[0054] 일반적으로, 다수의 상이한 방위각에서의 측정은 이용 가능한 신호 정보를 증가시키고 비대칭 피쳐의 측정 정확도를 향상시킨다. 따라서, 비록 두 개의 직교하는 각도에서의 측정을 언급하는 예가 본원에서 제공되지만, 일반적으로, 본원에 설명되는 방법에 따라 측정 정확도를 향상시키기 위해, 상이한 방위각에서 임의의 수의 측정이 활용될 수도 있다.

[0055] 추가적인 양태에서, 뮐러 매트릭스의 하나 이상의 비대각 엘리먼트와 각각 관련되는 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭은, 뮐러 매트릭스의 하나 이상의 비대각 엘리먼트와 관련되는 측정된 스펙트럼을 통합하는 것에 의해 결정된다. 스펙트럼 응답 메트릭은 비대칭성에 기인하는 스펙트럼 응답의 스칼라 척도이다. 측정된 스펙트럼에 걸친 통합은 노이즈를 감소시키고 뮐러 매트릭스 엘리먼트 또는 뮐러 매트릭스 엘리먼트의 조합과 관련되는 신호 강도를 증가시킨다.

[0056] 하나의 예에서, 식 (4)에 의해 예시되는 바와 같이, 뮐러 매트릭스 엘리먼트(M_{30})와 관련되는 스펙트럼이 파장에 걸쳐 통합된다.

[0057] $$SRM_{M_{30}} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} (M_{30}) d\lambda \qquad (4)$$

[0058] 몇몇 예에서, 통합은 뮐러 매트릭스의 다수의 엘리먼트의 합에 걸쳐 수행된다. 식 (5)는 뮐러 매트릭스 엘리먼트(M_{20} 및 M_{02})의 합과 관련되는 스펙트럼을 통합하는 것에 의해 결정되는 스펙트럼 응답 메트릭을 예시한다.

[0059] $$SRM_{M_{02}+M_{20}} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} (M_{02} + M_{20}) d\lambda \qquad (5)$$

[0060] 바람직한 실시형태에서, 비대각 뮐러 매트릭스 엘리먼트(M_{02} 및 M_{20})의 합은 스펙트럼 응답 메트릭으로서 활용되는데, 그 이유는, 비대칭성이 없는 상태에서 합(M_{02} + M_{20})이 제로와 동일하기 때문이다. 그러한 만큼, 비대칭성의 측정은 제로로부터의 $SRM_{M02+M20}$의 편차에 의해 표현된다. 유사하게, 바람직한 실시형태에서, 비대각 뮐러 매트릭스 엘리먼트(M_{30})는 스펙트럼 응답 메트릭으로서 활용되는데, 그 이유는, 비대칭성이 없는 상태에서 M_{30}이 제로와 동일하기 때문이다. 그러한 만큼, 비대칭성의 측정은 제로로부터의 SRM_{M30}의 편차에 의해 표현된다. 다른 바람직한 실시형태에서, 스펙트럼 응답 메트릭($SRM_{M02+M20}$ 및 SRM_{M30}) 둘 모두는 본원에서 설명되는 바와 같이 주목하는 구조체의 비대칭 피쳐를 설명하는 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값을 추정하기 위해 활용된다.

[0061] 비록 M_{30} 및 합(M_{02} + M_{20})에 기초한 스펙트럼 응답 메트릭이 본원에서 구체적으로 설명되지만, 일반적으로, 임의의 적절한 뮐러 매트릭스 엘리먼트 또는 뮐러 매트릭스 엘리먼트의 조합에 기초한 스펙트럼 응답 메트릭이 본 특허 문헌의 범위 내에서 고려될 수도 있다. 예를 들면, 스펙트럼 응답 메트릭은 M_{03}, 합(M_{12} + M_{21}), 등등에 기초하여 결정될 수도 있다.

[0062] 다른 양태에서, 뮐러 매트릭스의 하나 이상의 비대각 엘리먼트와 관련되는 스펙트럼은 파장의 하나 이상의 하위 범위로 세분된다. 더구나, 스펙트럼 응답 메트릭은 파장의 하나 이상의 하위 범위에 걸쳐 뮐러 매트릭스의 하나 이상의 비대각 엘리먼트와 관련되는 스펙트럼을 통합하는 것에 의해 결정된다. 몇몇 예에서, 이용 가능한 측정된 스펙트럼의 선택된 부분에 기초하여 스펙트럼 응답 메트릭을 결정하는 것은 비대칭 피처를 설명하는 파라미터(들)에 대한 스펙트럼 응답 메트릭의 감도를 증가시킨다. 이것은 비대칭 피처에 대한 가장 큰 감도의 파장을 강조하는 것 및 통합을 통해 랜덤 노이즈의 영향을 감소시키는 것에 의해 달성된다.

[0063] 도 5는 합(M_{02} + M_{20})과 관련되는 예시적인 스펙트럼 응답(153)을 묘사한다. 도 5에서 묘사되는 바와 같이, 신호 응답의 스펙트럼의 상당 부분은 측정의 노이즈 플로어(noise floor) 내에 있고, 한편, 스펙트럼의 다른 부분은, 측정의 노이즈 플로어를 상당히 초과하는 신호 응답을 나타낸다. 하나의 예에서, 미리 결정된 임계 값 T를 초과하는 스펙트럼의 부분은, 노이즈 플로어를 초과하는 신호 응답을 식별하기 위해 스펙트럼으로부터 선택된다. 예시된 예에서, 파장 하위 범위 λ_{12} 및 λ_{34}는 이용 가능한 스펙트럼으로부터 선택된다. 또한, 합(M_{02} + M_{20})과 관련되는 스펙트럼 응답 메트릭은 식 (6)에 의해 예시되는 바와 같이 선택된 하위 범위에만 걸쳐 합(M_{02} + M_{20})을 통합하는 것에 의해 결정된다.

[0064] $$SRM = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2}(M_{02} + M_{20})d\lambda + \int_{\lambda_3}^{\lambda_4}(M_{02} + M_{20})d\lambda \qquad (6)$$

[0065] 도 2 및 도 3에서 묘사되는 예에서, 경사 홀(tilted hole)(150)의 비대칭성은 경사각 TA 및 배향각 OA에 의해 특성 묘사된다. 또한, 경사 홀은, 홀의 높이 H 및 홀의 직경 CD와 같은, 홀 피처의 비대칭성을 설명하지 않는 다른 임계 치수에 의해 특성 묘사된다. 배향각 OA는 도 1에서 묘사되는 X 축의 양의 방향에 대하여 정의된다. 따라서, 배향각이 제로인 경우, 비대칭 피처는 X 축의 양의 방향에서 왜곡된다(skew). 마찬가지로, 배향각이 90도인 경우, 비대칭 피처는 Y 축의 양의 방향에서 왜곡된다. 홀의 중심 축이 웨이퍼에 대해 수직인 경우(즉, 스큐가 없는 경우), 경사각 TA는 제로인 것으로 정의된다.

[0066] 하나의 예에서, 계측 시스템(100)은 두 개의 직교하는 방위각에서 경사 홀(150)의 분광 측정을 수행하기 위해 활용된다. 하나의 측정에서, 조명 광의 입사 평면은 도 1에서 묘사되는 X 축과 정렬된다. 다른 측정에서, 조명 광의 입사 평면은 도 1에서 묘사되는 Y 축과 정렬된다.

[0067] 방위각 둘 모두에서 모든 이용 가능한 뮐러 매트릭스 엘리먼트와 관련되는 측정된 스펙트럼(170)은 컴퓨팅 시스템(130)에 의해 수신된다. 컴퓨팅 시스템(130)은 측정된 스펙트럼에 기초하여 몇몇 스펙트럼 응답 메트릭을 결정한다. 하나의 예에서, 컴퓨팅 시스템(130)은 뮐러 엘리먼트(M_{30})의 선택된 부분 및 방위각 둘 모두에 대한 뮐러 행렬 엘리먼트의 합(M_{20} + M_{02})을 통합하는 것에 의해 스펙트럼 응답 메트릭을 결정한다. 식 (7) 내지 (10)은, 180 도 방위각에서 측정되는 (M_{20} + M_{02})의 이용 가능한 스펙트럼의 Nλ 세그먼트, 180 도 방위각에서 측정되는 M_{30}의 이용 가능한 스펙트럼의 Nλ 세그먼트, 90 도 방위각에서 측정되는 (M_{20} + M_{02})의 이용 가능한 스펙트럼의 Nλ 세그먼트, 및 90 도 방위각에서 측정되는 M_{30}의 이용 가능한 스펙트럼의 Nλ 세그먼트에 걸친 통합에 의해 결정되는 스펙트럼 응답 메트릭을 각각 예시한다. 아래 첨자 a는 뮐러 매트릭스 엘리먼트의 합(M_{20} + M_{02})을 나타내고, 아래 첨자 b는 뮐러 매트릭스 엘리먼트(M_{30})를 나타낸다. 비록 식(7) 내지 (10)에 의해 예시되는 스펙트럼 응답 메트릭 각각이 이용 가능한 스펙트럼의 Nλ 세그먼트에 걸쳐 통합하는 것에 의해 결정되지만, 일반적으로, 통합을 위해 선택되는 파장 세그먼트는 각각의 스펙트럼 응답 메트릭에 대해 고유할 수도 있다.

$$SRM_{a,180} = \sum_{i=1}^{N_\lambda} \int_{\lambda_{i,Min}}^{\lambda_{i,Max}} (M_{20} + M_{02}) d\lambda \quad (7)$$

$$SRM_{b,180} = \sum_{i=1}^{N_\lambda} \int_{\lambda_{i,Min}}^{\lambda_{i,Max}} M_{30} d\lambda \quad (8)$$

$$SRM_{a,90} = \sum_{i=1}^{N_\lambda} \int_{\lambda_{i,Min}}^{\lambda_{i,Max}} (M_{20} + M_{02}) d\lambda \quad (9)$$

$$SRM_{b,90} = \sum_{i=1}^{N_\lambda} \int_{\lambda_{i,Min}}^{\lambda_{i,Max}} M_{30} d\lambda \quad (10)$$

[0068]

[0069] 컴퓨팅 시스템(130)은 또한, 이용 가능한 뮐러 매트릭스 엘리먼트의 임의의 조합과의 모델 기반의 스펙트럼 매칭에 의해, 홀 높이 H, 홀 직경 CD, 홀 경사각 TA, 및 배향각 OA의 값을 추정한다. 본원에서 앞서 논의되는 바와 같이, H 및 CD의 신뢰 가능한 추정치는 모델 기반의 스펙트럼 매칭으로부터 예상되지만, TA 및 OA의 추정된 값은 통상적으로 부정확하다.

[0070] 컴퓨팅 시스템(130)은 식 (7) 내지 (10)을 참조하여 설명되는 스펙트럼 응답 메트릭 및 스펙트럼 매칭에 의해 추정되는 CD 및 H의 값에 기초하여 TA 및 OA의 값을 추정한다.

[0071] 몇몇 예에서, 컴퓨팅 시스템(130)은 TA 및 OA의 값을 추정하기 위해 후속하여 활용되는 트레이닝된 선형 모델을 생성한다.

[0072] 스펙트럼 응답 메트릭 SRM의 값은 CD, H, TA 및 OA에 의존한다는 것이 가정된다. 일반적으로 CD 및 H에 대한 의속성은 TA 및 OA에 대한 의속성과 독립적이지 않을 수도 있다. 식 (11)은, 스펙트럼 응답 메트릭 SRM이 CD, H, TA 및 OA에 의존한다는 가정을 예시하지만, 그러나 그 의존성은, CD 및 H에 의존하는 함수 g와, TA 및 OA에 의존하는 함수 h의 조합으로서 표현될 수 있다.

$$SRM(\text{CD}, \text{높이}, \text{TA}, \text{OA}) = g(\text{CD}, \text{높이}) \cdot h(\text{TA}, \text{OA}) \quad (11)$$

[0073]

[0074] 함수 h는 식 (12) 및 (13)에서 예시되는 바와 같이 각각의 광축을 따라 경사각 TA의 정도에 직접적으로 비례한다는 것이 가정된다.

$$h_{90}(\text{TA}, \text{OA}) \propto \cos(\text{OA}) \cdot \text{높이} \cdot \tan(\text{TA}) \quad (12)$$

$$h_{180}(\text{TA}, \text{OA}) \propto \sin(\text{OA}) \cdot \text{높이} \cdot \tan(\text{TA}) \quad (13)$$

[0075]

[0076] 함수 g는 TA 및 OA에 둔감한 것으로 가정되고, 이 함수의 고려는, 함수 h의 고려와는 효과적으로 분리될 수 있다. 또한, 본 발명자는, 함수 g가 내 개의 스펙트럼 응답 메트릭 $SRM_{a,180}$, $SRM_{b,180}$, $SRM_{a,90}$ 및 $SRM_{b,90}$의 각각에 대해 대략 동일하다는 것을 발견하였다.

[0077] 함수 h와 주목하는 파라미터 OA 및 TA 사이의 관계는 CD 및 H의 공칭 값에 대해 결정될 수 있지만, 그러나 그 관계는 임의의 CD 및 H에 대해 유효하지 않다. 이 이슈를 해결하기 위해, 컴퓨팅 시스템(130)은, CD 및 H의 일반 값과 관련되는 스펙트럼 응답 메트릭 SRM을, CD 및 H의 공지된 공칭 값과 관련되는 정규화된 스펙트럼 응답 메트릭 SRM'에 매핑하도록 선형 최소 제곱 회귀(linear least squares regression)를 실행하는데, 여기서 SRM'은 식 (14)에 의해 예시된다.

$$SRM' = SRM(\text{CD}_{\text{Nom}}, \text{H}_{\text{Nom}}, \text{TA}, \text{OA}) = g(\text{CD}_{\text{Nom}}, \text{H}_{\text{Nom}}) \cdot h(\text{TA}, \text{OA}) \quad (14)$$

[0078]

[0079] 스펙트럼 응답 메트릭 SRM은, 식 (15)에 의해 예시되는 바와 같이, 정규화 인자 $g(CD,H)/g(CD_{NOM}, H_{NOM})$에 의해 정규화된 스펙트럼 응답 메트릭 SRM'에 관련된다.

$$SRM(\text{CD}, \text{H}, \text{TA}, \text{OA}) = SRM'(\text{TA}, \text{OA}) \frac{g(\text{CD}, \text{H})}{g(\text{CD}_{\text{Nom}}, \text{H}_{\text{Nom}})} \quad (15)$$

[0080]

[0081] TA 및 OA에 대해 공칭의 사소하지 않은 값을 가정하면, 컴퓨팅 시스템(130)은, N 개의 상이한 값의 CD 및 M 개의 상이한 값의 H를 갖는 홀 피처의 측정과 관련되는 다수의 스펙트럼 응답 메트릭 SRM 및 CD 및 H에 대한 선택된 공칭 값에서 홀 피처의 측정과 관련되는 스펙트럼 응답 메트릭의 세트를 생성한다.

[0082] 식 (16)에서 예시되는 미지의 계수((C0, ..., CN) 및 (D0, ..., DM))는, 정규화 인자 g(CD,H)/g(CDNOM, HNOM)에 대한 모델에 도달하도록, 선형 최소 제곱 회귀를 사용하여 결정된다.

$$\begin{bmatrix} 1 & CD & \cdots & CD^N & H & \cdots & H^M \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_0 \\ \vdots \\ C_N \\ D_1 \\ \vdots \\ D_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{SRM(CD,H,TA_{Nom},OA_{Nom})}{SRM(CD_{Nom},H_{Nom},TA_{Nom},OA_{Nom})} \\ \vdots \end{bmatrix} = \frac{g(CD,H,)}{g(CD_{Nom},H_{Nom})} \quad (16)$$

[0083]

[0084] CD 및 H의 공칭 값을 가정하여, 컴퓨팅 시스템(130)은 TA 및 OA의 다양한 값과 관련되는 다수의 정규화된 스펙트럼 응답 메트릭 SRM'을 생성한다.

[0085] 식 (17)에서 예시되는 미지의 계수(A1 및 A2)는 선형 최소 제곱 회귀를 사용하여 결정된다.

$$\begin{bmatrix} SRM'^2_{a,180} + SRM'^2_{a,90} & SRM'^2_{b,180} + SRM'^2_{b,90} \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [H \cdot \tan(TA)]^2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (17)$$

[0086]

[0087] 식 (18)에서 예시되는 미지의 계수(B1 및 B2)는 또한 선형 최소 제곱 회귀를 사용하여 결정된다.

$$\begin{bmatrix} SRM'_{a,180} & SRM'_{b,180} \\ SRM'_{a,90} & SRM'_{b,90} \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(OA) \cdot H \cdot \tan(TA) \\ \cos(OA) \cdot H \cdot \tan(TA) \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (18)$$

[0088]

[0089] 식 (11) 내지 (18)의 결과는, 주목하는 비대칭 파라미터 OA 및 TA를 비대칭 구조체의 측정으로부터 유도되는 스펙트럼 응답 메트릭에 관련시키는 트레이닝된 선형 모델에 도달하도록 조합된다. 이러한 방식으로, 트레이닝된 선형 모델에 대한 값은 식 (19) 내지 (21)에 의해 예시된다.

$$SRM'_{(a,b),(90,180)} = \frac{SRM_{(a,b),(90,180)}(CD,H,TA,OA)}{C_0+C_1 \cdot CD+\cdots+C_N \cdot CD^N+D_1 \cdot H+\cdots+D_M \cdot H^M} \quad (19)$$

$$TA = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{A_1 \cdot (SRM'^2_{a,180}+SRM'^2_{a,90})+A_2 \cdot (SRM'^2_{b,180}+SRM'^2_{b,90})}}{H}\right) \quad (20)$$

$$OA = \operatorname{atan2}\left(B_1 \cdot SRM'_{a,180} + B_2 \cdot SRM'_{b,180}, B_1 \cdot SRM'_{a,90} + B_2 \cdot SRM'_{b,90}\right) \quad (21)$$

[0090]

[0091] 도 6은 시뮬레이션과 관련되는 실제 경사각(156)과 식 (11) 내지 (21)을 참조하여 설명되는 트레이닝된 선형 모델을 사용한 경사각(157)의 회귀 추정된 값 사이의 비교를 예시하는 시뮬레이팅된 결과의 플롯(155)을 묘사한다. 도 7은 동일한 시뮬레이션과 관련되는 실제 배향각(161)과 식 (11) 내지 (21)을 참조하여 설명되는 트레이닝된 선형 모델을 사용한 배향각(162)의 회귀 추정된 값 사이의 비교를 예시하는 시뮬레이팅된 결과의 플롯(160)을 묘사한다. 이 예에서, 경사 홀 피처의 CD 및 H는 5 % 범위에 걸쳐 랜덤하게 변경되며, 경사각은 0° 에서부터 0.5° 까지 변하고, 배향각은 0° 에서부터 360° 까지 변한다. 시뮬레이팅된 측정 신호에 랜덤 가우시안 노이즈를 가지고 주입되었고 스펙트럼 응답 메트릭의 결정을 위해 단일 파장 서브섹션이 사용되었다. 도 6에서 묘사되는 바와 같이, 경사각의 추정된 값은 실제 경사각 값과 잘 일치한다. 유사하게, 도 7에서 묘사되는 바와 같이, 배향각의 추정된 값은 실제 배향각 값과 잘 일치한다.

[0092] 몇몇 예에서, 컴퓨팅 시스템(130)은 TA 및 OA의 값을 추정하기 위해 후속하여 활용되는 트레이닝된 신경망 모델을 생성한다.

[0093] 몇몇 예에서, 신경망 모델은 본원에서 앞서 설명된 스펙트럼 응답 메트릭 및 신뢰 가능하게 회귀 추정된 임계 치수(regressed critical dimension)를, 피측정 비대칭 피처를 특성 묘사하는 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값에 매핑하도록 트레이닝된다.

[0094] 하나의 예에서, 신경망 모델의 트레이닝 입력은 식 (7) 내지 (10)을 참조하여 설명되는 네 개의 스펙트럼 응답 메트릭, 즉, SRMa,180, SRMb,180, SRMa,90, 및 SRMb,90, 및 CD 및 높이의 신뢰 가능하게 회귀 추정된 값을 포함한다.

트레이닝 출력은 정규화 인자 $g(CD,H)/g(CD_{NOM},H_{NOM})$를 포함한다. 몇몇 예에서, 본원에서 앞서 설명된 선형 최소 제곱 회귀는 트레이닝된 신경망에 의해 결정되는 정규화 인자를 사용하여 활용된다.

[0095] 하나의 예에서, 2 개의 숨겨진 층을 갖는 20 개의 뉴런의 신경망은 정규화 인자 $g(CD,H)/g(CD_{NOM},H_{NOM})$를 예측하도록 트레이닝된다. 입력 데이터는 도 6 및 도 7을 참조하여 설명되는 것과 동일한 방식으로 CD, 높이, TA, 및 OA 값을 랜덤하게 변경시키는 것과 관련되는 합성 스펙트럼으로부터 생성된다. 공칭 CD 및 높이는 트레이닝 데이터의 단일의 랜덤 프로파일로부터 선택된다. 본원에서 앞서 설명된 선형 최소 제곱 회귀는 트레이닝된 신경망에 의해 결정되는 정규화 인자를 사용하여 활용된다.

[0096] 도 8은 삼각형 형상의 기준 마크(reference mark)를 가지고 묘사되는 실제 경사각과 정사각형 형상의 기준 마크를 가지고 묘사되는 회귀 추정된 경사각 값 사이의 비교를 예시하는 시뮬레이팅된 결과의 플롯(165)을 묘사한다. 실제 값과 회귀 추정된 값 사이의 차이는 플롯라인(166)에 의해 예시된다. 이 예에서, 경사각의 실제 값과 회귀 추정된 값 사이의 차이의 3 시그마 값(즉, 표준 편차의 3 배)은 0.00298이다.

[0097] 도 9는 삼각형 형상의 기준 마크를 가지고 묘사되는 실제 배향각과 정사각형 형상의 기준 마크를 가지고 묘사되는 회귀 추정된 배향각 값 사이의 비교를 예시하는 시뮬레이팅된 결과의 플롯(175)을 묘사한다. 실제 값과 회귀 추정된 값 사이의 차이는 플롯라인(176)에 의해 예시된다. 이 예에서, 배향각의 실제 값과 회귀 추정된 값 사이의 차이의 3 시그마 값(즉, 표준 편차의 3 배)은 0.19000이다.

[0098] 다른 예에서, 비대칭 파라미터의 값을 추정하기 위해 선형 회귀(linear regression)를 활용하는 대신, 정규화 인자 및 측정된 입력에 기초하여 TA 및 OA를 결정하도록 여전히 다른 신경망 모델이 트레이닝된다.

[0099] 다른 예에서, 신경망 모델의 트레이닝 입력은 식 (7) 내지 (10)을 참조하여 설명되는 네 개의 스펙트럼 응답 메트릭, 즉, $SRM_{a,180}$, $SRM_{b,180}$, $SRM_{a,90}$ 및 $SRM_{b,90}$, 및 CD 및 높이의 신뢰 가능하게 회귀 추정된 값을 포함한다. 트레이닝 출력은 TA 및 OA의 대응하는 값을 포함한다.

[0100] 도 10은, 네 개의 스펙트럼 응답 메트릭 및 CD 및 높이의 신뢰성 있게 회귀 추정된 값으로부터 TA 및 OA를 직접 추정하기 위해 트레이닝된 신경망 모델을 활용하는 시뮬레이팅된 결과의 플롯(180)을 묘사한다. 도 10은 삼각형 형상의 기준 마크를 가지고 묘사되는 실제 경사각과 정사각형 형상의 기준 마크를 가지고 묘사되는 회귀 추정된 경사각 값 사이의 비교를 예시한다. 실제 값과 회귀 추정된 값 사이의 차이는 플롯라인(181)에 의해 예시된다. 이 예에서, 경사각의 실제 값과 회귀 추정된 값 사이의 차이의 3 시그마 값(즉, 표준 편차의 3 배)은 0.00783이다.

[0101] 여전히 다른 예에서, 신경망 모델의 트레이닝 입력은 식 (7) 내지 (10)을 참조하여 설명되는 네 개의 스펙트럼 응답 메트릭을 포함하지만, 그러나 CD 및 높이의 신뢰 가능하게 회귀 추정된 값을 포함하지 않는다. 트레이닝 출력은 TA 및 OA의 대응하는 값을 포함한다. 이 접근법의 유효성을 확인하는 시뮬레이션 결과는, 경사각의 실제 값과 회귀 추정된 값 사이의 차이의 3 시그마 값이 0.18000임을 나타내는데, 이것은 앞서 설명된 접근법만큼 효과적이지는 않다.

[0102] 일반적으로, 본원에서 설명되는 주목하는 구조체의 비대칭 피쳐를 설명하는 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값을 결정하는 방법은 반복적인 방식으로 효과적으로 적용된다. 몇몇 예에서, 비대칭 파라미터의 추정된 값은 하나 이상의 임계 치수의 향상된 추정치에 도달하도록 스펙트럼 매칭 분석으로 피드포워딩된다. 임계 치수의 이들 향상된 추정치는 스펙트럼 응답 메트릭을 업데이트하기 위해 사용되는데, 이것은, 이어서, 비대칭 파라미터의 향상된 추정치를 생성하기 위해 사용된다. 이 반복은 비대칭 파라미터의 값에 수렴될 때까지 계속된다. 비대칭 파라미터의 추정된 값은 메모리(예를 들면, 메모리(132))에 저장된다.

[0103] 몇몇 실시형태에서, 다수의 상이한 스펙트럼 응답 메트릭이, 상이한 비대각 뮐러 매트릭스 엘리먼트 또는 뮐러 매트릭스 엘리먼트의 조합(예를 들면, M_{30} 및 합(M_{20} + M_{02}))에 기초하여 각각 결정된다. 추가적인 양태에서, 상이한 스펙트럼 응답 메트릭은, 예를 들면, 각각의 스펙트럼 응답 메트릭을 상이한 상수로 스케일링하는 것에 의해 상이하게 가중된다. 이러한 방식으로, 특정한 비대칭 파라미터에 더욱 민감한 스펙트럼 응답 메트릭은, 특정한 비대칭 파라미터에 덜 민감한 스펙트럼 응답 메트릭 보다 더 크게 가중된다

[0104] 도 12는 적어도 하나의 신규 양태에서 비대칭 파라미터의 분광 측정을 수행하는 방법(200)을 예시한다. 방법(200)은 본 발명의 도 1에서 예시되는 계측 시스템(100)과 같은 계측 시스템에 의한 구현에 적합하다. 하나의 양태에서, 방법(200)의 데이터 프로세싱 블록은, 컴퓨팅 시스템(130), 또는 임의의 다른 범용 컴퓨팅 시스템의 하나 이상의 프로세서에 의해 실행되는 미리 프로그래밍된 알고리즘을 통해 실행될 수도 있다는 것이 인식된다.

본원에서는, 계측 시스템(100)의 특정한 구조적 양태는 제한을 나타내지 않으며 예시적인 것으로서만 해석되어야 한다는 것이 인식된다.

[0105] 블록(201)에서, 반도체 웨이퍼 상에 제조되는 주목하는 구조체는 두 개 이상의 별개의 방위각의 각각에서 일정 양의 광대역 광학 방사선으로 조명된다.

[0106] 블록(202)에서, 두 개 이상의 방위각의 각각에서의 반도체 웨이퍼의 조명에 응답하여 반도체 웨이퍼로부터 측정 광의 양이 검출된다.

[0107] 블록(203)에서, 두 개 이상의 방위각의 각각에서 제공되는 조명에 대한 주목하는 구조체의 측정된 스펙트럼 응답은, 측정 광의 각각의 검출된 양에 기초하여 결정된다. 각각의 측정된 스펙트럼 응답은 뮐러 매트릭스의 다수의 엘리먼트와 관련되는 스펙트럼을 포함한다.

[0108] 블록(204)에서, 하나 이상의 임계 치수 파라미터의 값은, 두 개 이상의 방위각과 관련되는 측정된 스펙트럼 응답에 대한 모델링된 스펙트럼 응답의 피팅에 기초하여 추정된다.

[0109] 블록(205)에서, 각각의 측정된 스펙트럼 응답과 관련되는 뮐러 매트릭스의 하나 이상의 비대각 엘리먼트의 적어도 하나의 스펙트럼의 파장의 하나 이상의 하위 범위가 선택된다.

[0110] 블록(206)에서, 뮐러 매트릭스의 하나 이상의 비대각 엘리먼트의 적어도 하나의 스펙트럼은 파장의 선택된 하나 이상의 하위 범위에 걸쳐 통합되어 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭을 생성한다.

[0111] 블록(207)에서, 주목하는 구조체의 비대칭 피쳐를 설명하는 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값은, 하나 이상의 임계 치수 파라미터의 값 및 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭에 기초하여 추정된다.

[0112] 본원에서 설명되는 바와 같이 구성될 수도 있는 예시적인 측정 기술은, 분광 타원편광 해석법(spectroscopic ellipsometry; SE) - 뮐러 매트릭스 타원편광 해석법(MMSE), 회전 편광기 SE(rotating polarizer; RPSE), 회전 편광기, 회전 보상기 SE(rotating polarizer, rotating compensator SE; RPRC), 회전 보상기, 회전 보상기 SE(rotating compensator, rotating compensator; RCRC)를 포함함 - 분광 반사측정법(spectroscopic reflectometry; SR) - 편광 SR(polarized SR), 비편광 SR(unpolarized SR)을 포함함 - , 분광 산란측정법, 산란측정법 오버레이, 빔 프로파일 반사측정법, 각도 분해 및 편광 분해 양자, 빔 프로파일 타원편광 해석법, 단일의 또는 다수의 이산 파장 타원편광 해석법, 등등을 포함하지만, 그러나 이들로 제한되지는 않는다. 일반적으로, 측정 신호에 광범위한 각도 정보를 포함하는 임의의 계측 기술이, 개별적으로 또는 임의의 조합으로, 고려될 수도 있다. 예를 들면, 이미지 기반의 계측 기술을 비롯한, 반도체 구조체의 특성 묘사에 적용 가능한 임의의 SR 또는 SE 기술이, 개별적으로, 또는 임의의 조합으로, 고려될 수도 있다.

[0113] 또 다른 실시형태에서, 시스템(100)은 본원에서 설명되는 방법에 따라 수집되는 분광 측정 데이터에 기초하여 실제 디바이스 구조체의 측정을 수행하기 위해 활용되는 하나 이상의 컴퓨팅 시스템(130)을 포함한다. 하나 이상의 컴퓨팅 시스템(130)은 분광계에 통신 가능하게 커플링될 수도 있다. 하나의 양태에서, 하나 이상의 컴퓨팅 시스템(130)은 시료(120)의 구조체의 측정과 관련되는 측정 데이터(170)를 수신하도록 구성된다.

[0114] 본 개시의 전체에 걸쳐 설명되는 하나 이상의 단계는 단일의 컴퓨터 시스템(130), 또는, 대안적으로, 다수의 컴퓨터 시스템(130)에 의해 수행될 수도 있다는 것이 인식되어야 한다. 또한, 시스템(100)의 상이한 서브시스템은, 본원에서 설명되는 단계의 적어도 일부를 수행하기에 적절한 컴퓨터 시스템을 포함할 수도 있다. 따라서, 상기 언급된 설명은 본 발명에 대한 제한으로서 해석되어선 안되며 단지 예시로서 해석되어야 한다.

[0115] 또한, 컴퓨터 시스템(130)은 기술 분야에서 공지되어 있는 임의의 방식으로 분광계에 통신 가능하게 커플링될 수도 있다. 예를 들면, 하나 이상의 컴퓨팅 시스템(130)은 분광계와 관련되는 컴퓨팅 시스템에 커플링될 수도 있다. 다른 예에서, 분광계는 컴퓨터 시스템(130)에 커플링되는 단일의 컴퓨터 시스템에 의해 직접적으로 제어될 수도 있다.

[0116] 계측 시스템(100)의 컴퓨터 시스템(130)은, 유선부 및/또는 무선부를 포함할 수도 있는 송신 매체에 의해 시스템(예를 들면, 분광계 및 등등)의 서브시스템으로부터 데이터 또는 정보를 수신 및/또는 획득하도록 구성될 수도 있다. 이러한 방식에서, 송신 매체는, 컴퓨터 시스템(130)과 시스템(100)의 다른 서브시스템 사이의 데이터 링크로서 역할을 할 수도 있다.

[0117] 계측 시스템(100)의 컴퓨터 시스템(130)은, 유선부 및/또는 무선무를 포함할 수도 있는 송신 매체에 의해 다른 시스템으로부터 데이터 또는 정보(예를 들면, 측정 결과, 모델링 입력, 모델링 결과, 기준 측정 결과(reference

measurement result), 등등)를 수신 및/또는 획득하도록 구성될 수도 있다. 이 방식에서, 송신 매체는 컴퓨터 시스템(130)과 다른 시스템(예를 들면, 메모리 온보드 계측 시스템(100), 외부 메모리, 또는 다른 외부 시스템) 사이의 데이터 링크로서 역할을 할 수도 있다. 예를 들면, 컴퓨팅 시스템(130)은 데이터 링크를 통해 저장 매체(즉, 메모리(132) 또는 외부 메모리)로부터 측정 데이터를 수신하도록 구성될 수도 있다. 예를 들면, 본원에서 설명되는 분광계를 사용하여 획득되는 스펙트럼 결과는 영구적인 또는 반영구적인 메모리 디바이스(예를 들면, 메모리(132) 또는 외부 메모리)에 저장될 수도 있다. 이와 관련하여, 스펙트럼 결과는 온보드 메모리로부터 또는 외부 메모리 시스템으로부터 임포트(가져오기)될 수도 있다. 또한, 컴퓨터 시스템(130)은 송신 매체를 통해 데이터를 다른 시스템으로 전송할 수도 있다. 예를 들면, 컴퓨터 시스템(130)에 의해 결정되는 추정된 파라미터 값(171) 또는 측정 모델은 전달되어 외부 메모리에 저장될 수도 있다. 이와 관련하여, 측정 결과는 다른 시스템으로 엑스포트(내보내기)될 수도 있다.

[0118] 컴퓨팅 시스템(130)은, 퍼스널 컴퓨터 시스템, 메인프레임 컴퓨터 시스템, 워크스테이션, 이미지 컴퓨터, 병렬 프로세서, 또는 기술 분야에서 공지되어 있는 임의의 다른 디바이스를 포함할 수도 있지만, 그러나 이들로 제한되지는 않는다. 일반적으로, 용어 "컴퓨팅 시스템"은, 메모리 매체로부터의 명령어를 실행하는 하나 이상의 프로세서를 구비하는 임의의 디바이스를 망라하도록 광의적으로 정의될 수도 있다.

[0119] 본원에서 설명되는 방법과 같은 방법을 구현하는 프로그램 명령어(134)는, 와이어, 케이블, 또는 무선 전송 링크와 같은 송신 매체를 통해 송신될 수도 있다. 예를 들면, 도 1에서 예시되는 바와 같이, 메모리(132)에 저장되는 프로그램 명령어(134)는 버스(133)를 통해 프로세서(131)로 송신된다. 프로그램 명령어(134)는 컴퓨터 판독 가능 매체(예를 들면, 메모리(132))에 저장된다. 예시적인 컴퓨터 판독 가능 매체는 리드 온리 메모리, 랜덤 액세스 메모리, 자기 또는 광학 디스크, 또는 자기 테이프를 포함한다.

[0120] 몇몇 예에서, 본원에서 설명되는 측정 모델은, 미국 캘리포니아 밀피타스(Milpitas)의 KLA-Tencor Corporation으로부터 입수 가능한 SpectraShape® 광학 임계 치수 계측 시스템의 엘리먼트로서 구현된다. 이 방식에서, 모델은, 스펙트럼이 시스템에 의해 수집된 직후에 생성되어 사용 준비가 이루어진다.

[0121] 몇몇 다른 예에서, 본원에서 설명되는 측정 모델은, 예를 들면, 미국 캘리포니아 밀피타스의 KLA-Tencor Corporation으로부터 입수 가능한 AcuShape® 소프트웨어를 구현하는 컴퓨팅 시스템에 의해 오프라인에서 구현된다. 결과적으로 나타나는 트레이닝된 모델은, 측정을 수행하는 계측 시스템에 의해 액세스 가능한 AcuShape® 라이브러리의 엘리먼트로서 통합될 수도 있다.

[0122] 다른 양태에서, 본원에서 설명되는 반도체 디바이스의 분광 계측을 위한 방법 및 시스템은 고 애스펙트비(HAR) 구조체, 큰 횡방향 치수 구조체, 또는 둘 모두의 비대칭 피처의 측정에 적용된다. 설명된 실시형태는, Samsung Inc.(삼성 인코포레이티드)(대한민국), SK Hynix Inc.(SK 하이닉스 인코포레이티드)(대한민국), Toshiba Corporation(도시바 코포레이션)(일본), 및 Micron Technology, Inc.(미크론 테크놀로지 인코포레이티드)(미국), 등등과 같은 다양한 반도체 제조사에 의해 제조되는, 삼차원 NAND 구조체, 예컨대 수직 NAND(vertical-NAND; V-NAND) 구조체, 동적 랜덤 액세스 메모리(dynamic random access memory) 구조체(DRAM), 등등을 포함하는 반도체 디바이스의 비대칭 피처의 계측을 가능하게 한다. 도 11은, 비대칭 피처 결함을 포함할 수도 있는 예시적인 고 애스펙트비 NAND 구조체(190)를 묘사한다. 광대역 성능 및 광범위한 방위각을 갖는 분광 타원편광 해석기는 이들 고 애스펙트비 구조체의 측정에 적합하다. HAR 구조체는, 종종, HAR에 대한 에칭 프로세스를 용이하게 하기 위해 하드 마스크 층(hard mask layer)을 포함한다. 본원에 설명되는 바와 같이, 용어 "HAR 구조체"는 10:1을 초과하며 100:1 만큼 높거나 또는 더 높을 수도 있는 애스펙트비에 의해 특성 묘사되는 임의의 구조체를 지칭한다.

[0123] 여전히 다른 양태에서, 본원에서 설명되는 측정 결과는 제조 프로세스 툴(예를 들면, 리소그래피 툴, 에칭 툴, 퇴적 툴, 등등)에 대한 능동 피드백(active feedback)으로서 제공된다. 예를 들면, 본원에서 설명되는 측정 방법에 기초하여 결정되는 측정된 파라미터의 값은, 리소그래피 시스템을 조정하여 소망되는 출력(즉, 감소된 비대칭 에러, 등등)을 달성하도록 리소그래피 툴로 전달된다. 유사한 방식으로, 에칭 파라미터(예를 들면, 에칭 시간, 확산성, 등등) 또는 퇴적 파라미터(예를 들면, 시간, 농도, 등등)가, 에칭 툴 또는 퇴적 툴 각각에 대한 측정된 파라미터의 능동 피드백에 기초하여 조정된다. 몇몇 예에서, 측정된 비대칭 파라미터에 기초하여 결정되는 프로세스 파라미터에 대한 보정은, 리소그래피 툴, 에칭 툴, 퇴적 툴, 등등으로 전달된다. 응답에서, 제조 툴은, 측정된 비대칭성에 의해 특성 묘사되는 구조적 결함을 감소시키도록, 반도체 제조 프로세스의 제어 파라미터를 조정한다.

[0124] 본원에서 설명되는 바와 같이, 용어 "임계 치수"는, 구조체의 임의의 임계 치수(예를 들면, 하부 임계 치수, 중

간 임계 치수, 상부 임계 치수, 측벽 각도, 격자 높이, 등등), 임의의 둘 이상의 구조체 사이의 임계 치수(예를 들면, 두 구조체 사이의 거리), 및 둘 이상의 구조체 사이의 변위(예를 들면, 오버레이 격자 구조체 사이의 오버레이 변위, 등등)를 포함한다. 구조체는 삼차원 구조체, 패턴화된 구조체, 오버레이 구조체, 등등을 포함할 수도 있다.

[0125] 본원에서 설명되는 바와 같이, 용어 "임계 치수 애플리케이션" 또는 "임계 치수 측정 애플리케이션"은 임의의 임계 치수 측정을 포함한다.

[0126] 본원에서 설명되는 바와 같이, 용어 "계측 시스템"은, 임계 치수 계측, 오버레이 계측, 초점/조사량 계측, 및 조성 계측과 같은 측정 애플리케이션을 비롯한, 임의의 양태에서 시료의 특성을 적어도 부분적으로 묘사하는 데 활용되는 임의의 시스템을 포함한다. 그러나, 기술 분야의 그러한 용어는 본원에서 설명되는 바와 같은 용어 "계측 시스템"의 범위를 제한하지는 않는다. 또한, 계측 시스템(100)은 패턴화된 웨이퍼 및/또는 패턴화되지 않은 웨이퍼의 측정을 위해 구성될 수도 있다. 계측 시스템은 LED 검사 툴, 에지 검사 툴, 이면 검사 툴, 매크로 검사 툴, 또는 멀티 모드 검사 툴(하나 이상의 플랫폼으로부터의 데이터를 동시적으로 수반함), 및 임계 치수 데이터에 기초한 시스템 파라미터의 캘리브레이션으로부터 이익을 얻는 임의의 다른 계측 또는 검사 툴로서 구성될 수도 있다.

[0127] 임의의 반도체 프로세싱 툴(예를 들면, 검사 시스템 또는 리소그래피 시스템) 내에서 시료를 측정하기 위해 사용될 수도 있는 반도체 측정 시스템에 대한 다양한 실시형태가 본원에서 설명된다. 용어 "시료"는, 본원에서, 웨이퍼, 레티클, 또는 기술 분야에서 공지되어 있는 수단에 의해 프로세싱될 수도 있는(예를 들면, 결함에 대해 검사 또는 인쇄될 수도 있는) 임의의 다른 샘플을 가리키기 위해 사용된다.

[0128] 본원에서 사용될 때, 용어 "웨이퍼"는 반도체 또는 비반도체 재료로 형성되는 기판을 일반적으로 지칭한다. 예는, 단결정 실리콘, 갈륨 비화물, 및 인듐 인화물을 포함하지만, 그러나 이들로 제한되지는 않는다. 그러한 기판은 반도체 제조 설비에서 공통적으로 발견될 수도 있고 및/또는 프로세싱될 수도 있다. 몇몇 경우에서, 웨이퍼는 기판(즉, 베어 웨이퍼(bare wafer))만을 포함할 수도 있다. 대안적으로, 웨이퍼는 기판 상에 형성되는 상이한 재료의 하나 이상의 층을 포함할 수도 있다. 웨이퍼 상에 형성되는 하나 이상의 층은 "패턴화될" 수도 있거나 또는 "패턴화되지 않을" 수도 있다. 예를 들면, 웨이퍼는 반복 가능한 패턴 피쳐를 갖는 복수의 다이를 포함할 수도 있다.

[0129] "레티클"은 레티클 제조 프로세스의 임의의 스테이지에서의 레티클일 수도 있거나, 또는 반도체 제조 설비에서의 사용을 위해 발매될(released) 수도 있는 또는 발매되지 않을 수도 있는 완성된 레티클일 수도 있다. 레티클, 또는 "마스크"는, 실질적으로 불투명한 영역이 상부에 형성되며 어떤 패턴으로 구성되는 실질적으로 투명한 기판으로서 일반적으로 정의된다. 기판은, 예를 들면, 비정질의 SiO_2와 같은 유리 재료를 포함할 수도 있다. 레티클은, 레티클 상의 패턴이 레지스트로 전사될 수도 있도록, 리소그래피 프로세스의 노광 단계 동안 레지스트로 피복된 웨이퍼 위에 배치될 수도 있다.

[0130] 웨이퍼 상에 형성되는 하나 이상의 층은 패턴화될 수도 있거나 또는 패턴화되지 않을 수도 있다. 예를 들면, 웨이퍼는, 반복 가능한 패턴 피쳐를 각각 구비하는 복수의 다이를 포함할 수도 있다. 재료의 그러한 층의 형성 및 프로세싱은 궁극적으로는 완성된 디바이스로 귀결될 수도 있다. 많은 상이한 타입의 디바이스가 웨이퍼 상에 형성될 수도 있고, 본원에서 사용되는 바와 같은 용어 웨이퍼는, 기술 분야에서 공지되어 있는 임의의 타입의 디바이스가 상부에서 제조되고 있는 웨이퍼를 망라하도록 의도된다.

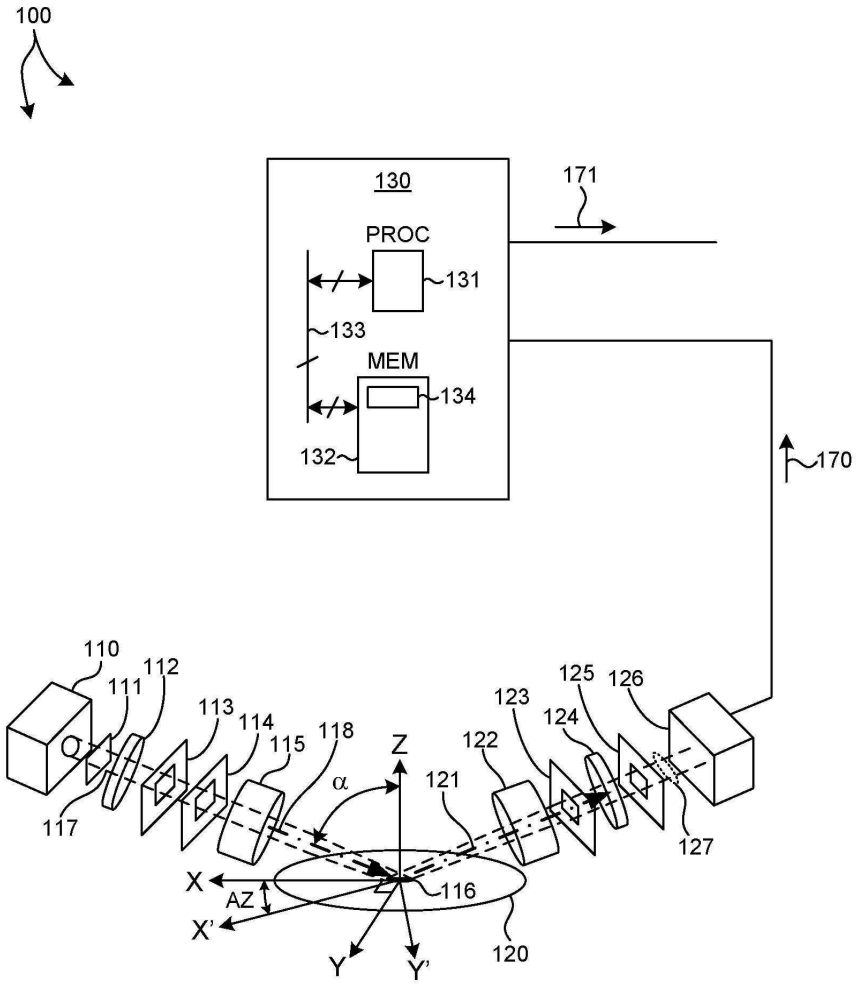
[0131] 하나 이상의 예시적인 실시형태에서, 설명되는 기능은 하드웨어, 소프트웨어, 펌웨어 또는 이들의 임의의 조합으로 구현될 수도 있다. 소프트웨어로 구현되면, 기능은 하나 이상의 명령어 또는 코드로서 컴퓨터 판독 가능 매체 상에 저장될 수도 있거나 또는 컴퓨터 판독 가능 매체를 통해 송신될 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 매체는 한 장소에서 다른 장소로 컴퓨터 프로그램의 전송을 가능하게 하는 임의의 매체를 포함하는 컴퓨터 저장 매체 및 통신 매체 둘 다를 포함한다. 저장 매체는 범용 컴퓨터 또는 특수 목적용 컴퓨터에 의해 액세스될 수 있는 임의의 이용 가능한 매체일 수도 있다. 제한이 아닌 예로서, 그러한 컴퓨터 판독 가능 매체는 RAM, ROM, EEPROM, CD-ROM 또는 다른 광학 디스크 스토리지, 자기 디스크 스토리지 또는 다른 자기 스토리지 디바이스, 또는 명령어 또는 데이터 구조의 형태로 소망되는 프로그램 코드 수단을 반송(carry) 또는 저장하기 위해 사용될 수 있으며 범용 컴퓨터 또는 특수 목적용 컴퓨터, 또는 범용 프로세서 또는 특수 목적용 프로세서에 의해 액세스될 수 있는 임의의 다른 매체를 포함할 수 있다. 또한, 임의의 연결이 컴퓨터 판독 가능 매체로 적절히 칭해진다. 예를 들면, 소프트웨어가 동축 케이블, 광섬유 케이블, 연선(twisted pair), 디지털 가입자 회선(digital subscriber line; DSL), 또는 적외선, 무선, 및 마이크로파와 같은 무선 기술을 사용하여 웹사이트, 서버, 또는

다른 원격 소스로부터 송신되면, 동축 케이블, 광섬유 케이블, 연선, DSL, 또는 적외선, 무선, 및 마이크로파와 같은 무선 기술은 매체의 정의에 포함된다. 디스크(disk) 및 디스크(disc)는, 본원에서 사용되는 바와 같이, 콤팩트 디스크(compact disc; CD), 레이저 디스크, 광학 디스크, 디지털 다기능 디스크(digital versatile disc; DVD), 플로피 디스크 및 블루레이 디스크를 포함하는데, 여기서 디스크(disk)는 통상 자기적으로 데이터를 재생하고, 디스크(disc)는 레이저를 이용하여 광학적으로 데이터를 재생한다. 상기의 조합도 컴퓨터 판독 가능 매체의 범위 내에 또한 포함되어야 한다.

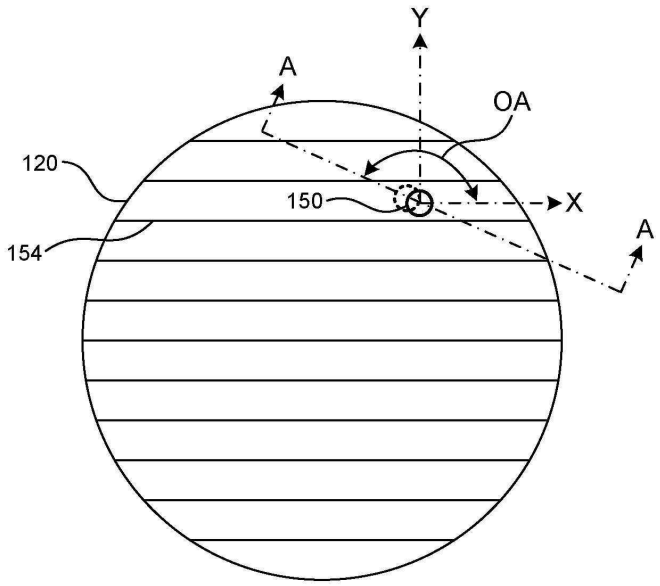
[0132] 소정의 특정한 실시형태가 교수적인 목적을 위해 상기에서 설명되었지만, 본 특허 문헌의 교시는 일반적인 적용 가능성을 가지며 상기에서 설명되는 특정한 실시형태로 제한되는 것은 아니다. 따라서, 설명된 실시형태의 다양한 피처의 다양한 수정예, 적응예, 및 조합예는 청구범위에서 기술되는 바와 같은 본 발명의 범위를 벗어나지 않으면서 실시될 수 있다.

도면

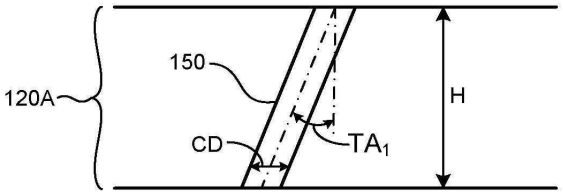
도면1



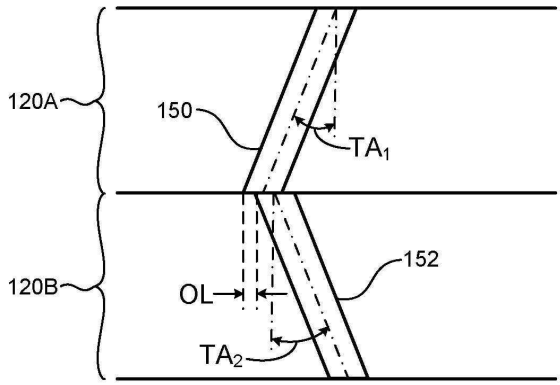
도면2


Y
A
OA
120
150
X
154
A

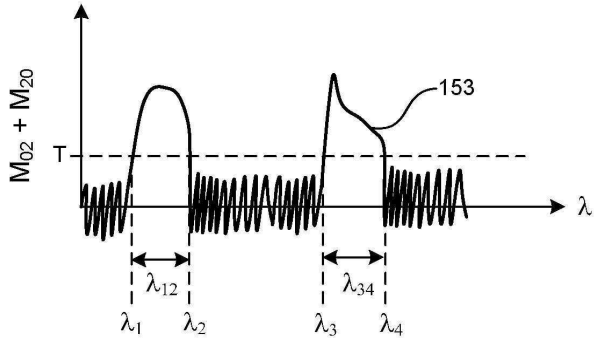
도면3


150
120A
H
CD
TA1

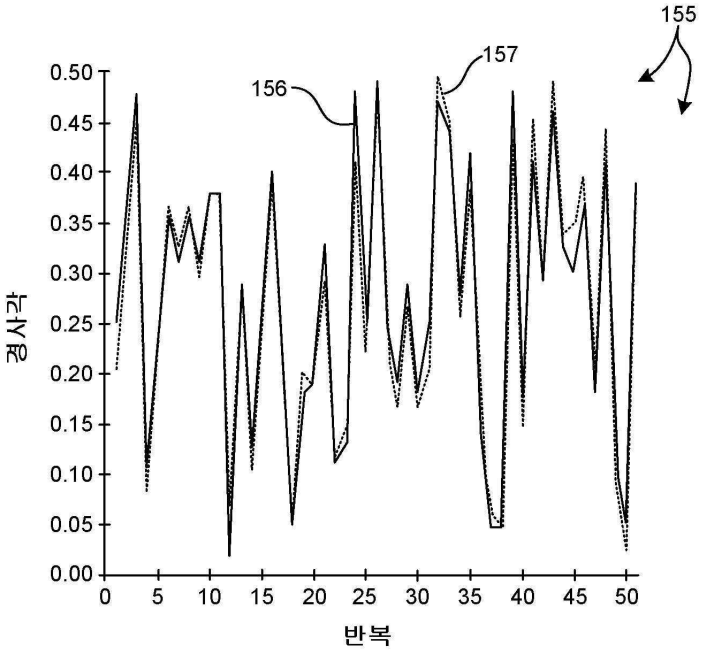
도면4


120A
150
TA1
120B
152
OL
TA2

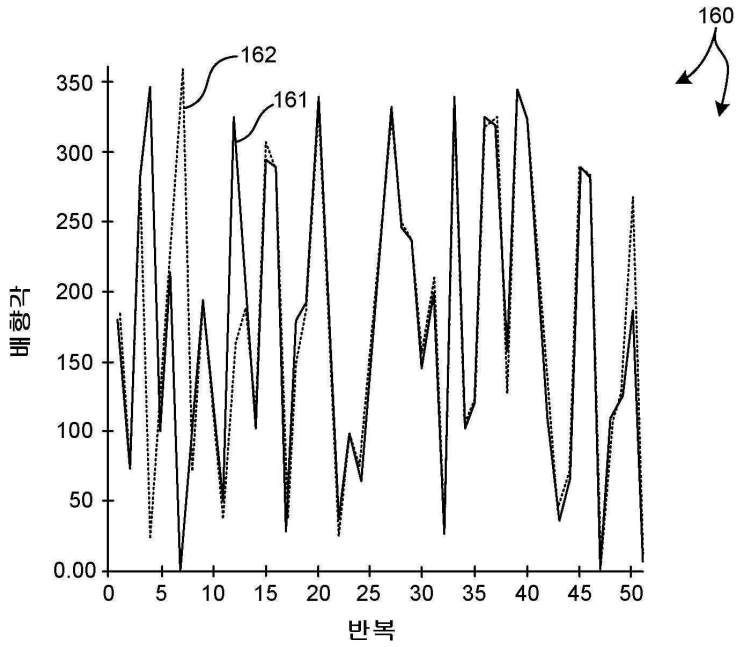
도면5


M02 + M20
T
153
λ
λ12
λ34
λ1
λ2
λ3
λ4

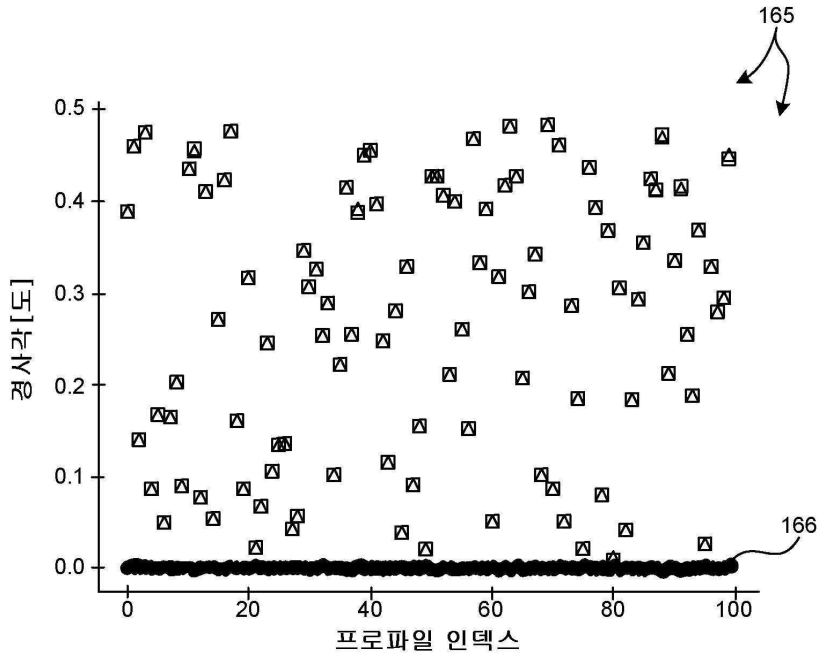
도면6


155
157
156
0.50
0.45
0.40
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
경사각
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
반복

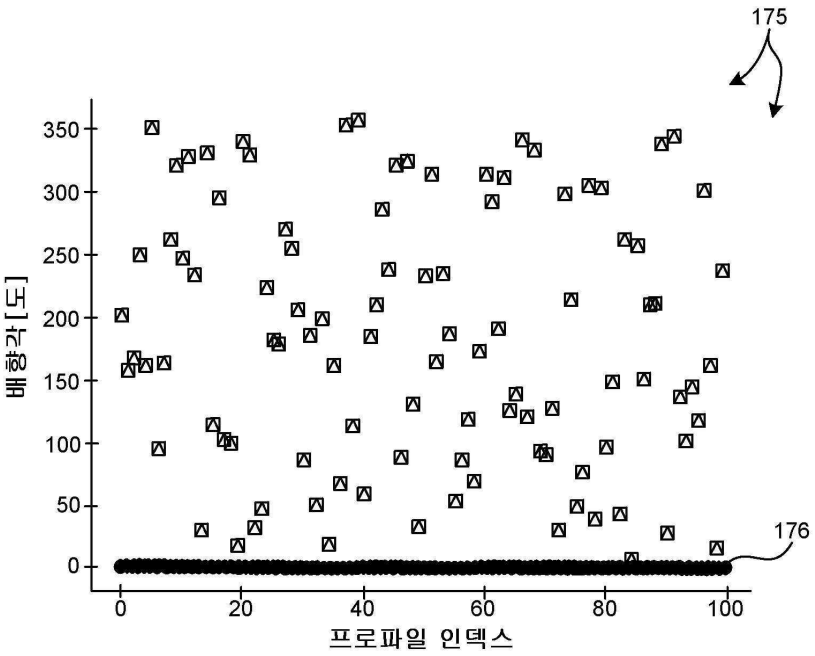
도면7


160
162
161
350
300
250
200
150
100
50
0.00
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
배향각
반복

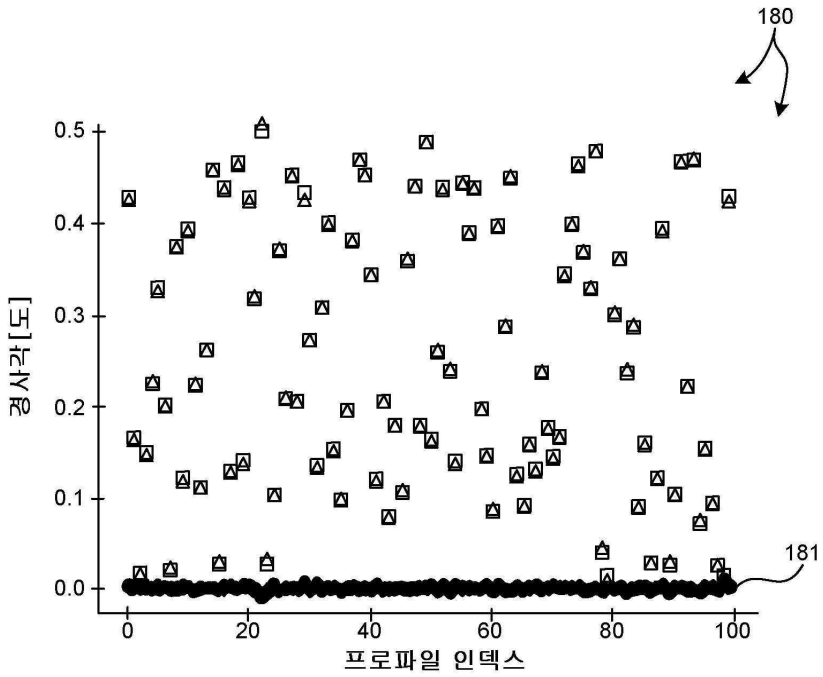
도면8


165
166
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
0
20
40
60
80
100
경사각[도]
프로파일 인덱스

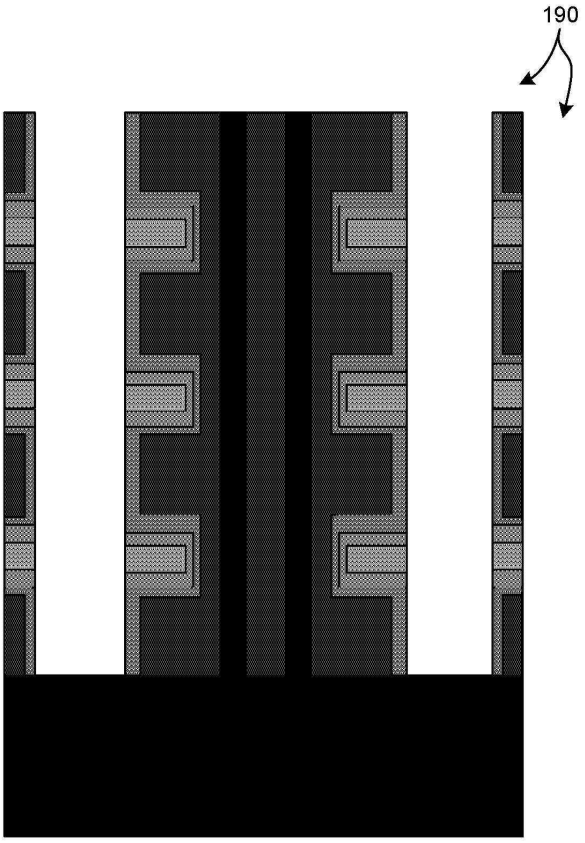
도면9


175
176
배향각[도]
350
300
250
200
150
100
50
0
0
20
40
60
80
100
프로파일 인덱스

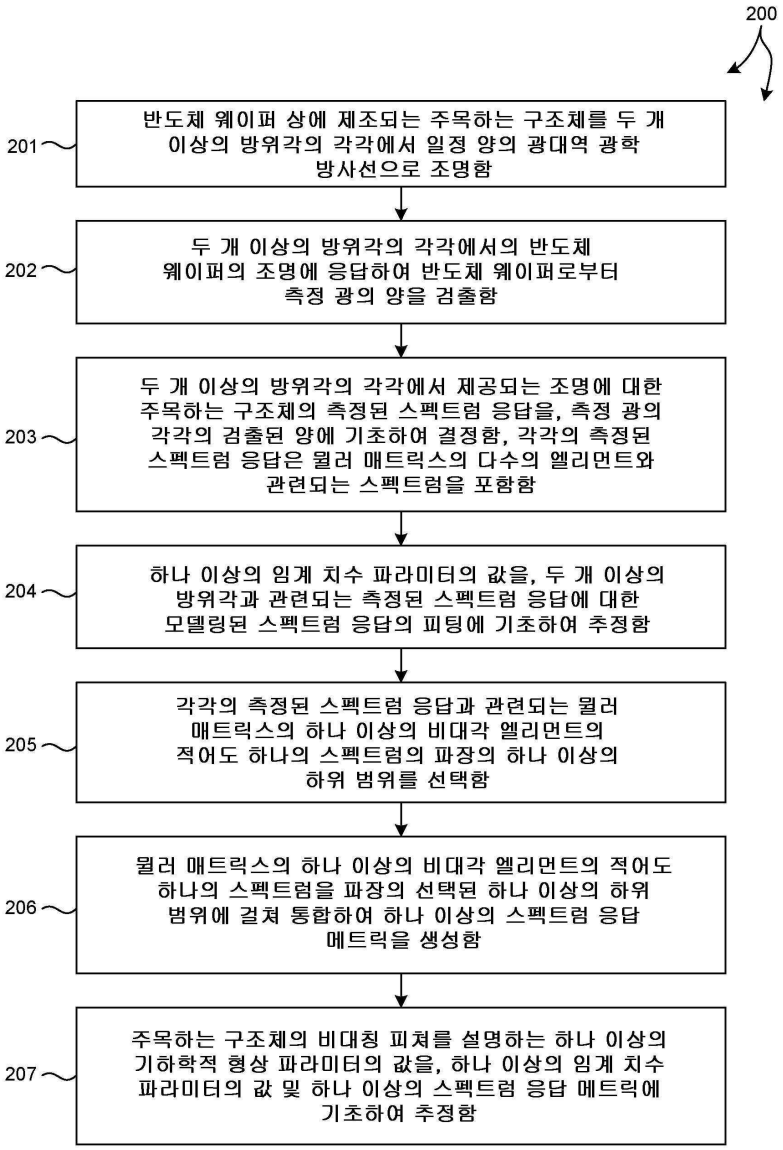
도면10


180
181
경사각[도]
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
0
20
40
60
80
100
프로파일 인덱스

도면11



도면12


200
201
반도체 웨이퍼 상에 제조되는 주목하는 구조체를 두 개 이상의 방위각의 각각에서 일정 양의 광대역 광학 방사선으로 조명함
202
두 개 이상의 방위각의 각각에서의 반도체 웨이퍼의 조명에 응답하여 반도체 웨이퍼로부터 측정 광의 양을 검출함
203
두 개 이상의 방위각의 각각에서 제공되는 조명에 대한 주목하는 구조체의 측정된 스펙트럼 응답을, 측정 광의 각각의 검출된 양에 기초하여 결정함, 각각의 측정된 스펙트럼 응답은 뮬러 매트릭스의 다수의 엘리먼트와 관련되는 스펙트럼을 포함함
204
하나 이상의 임계 치수 파라미터의 값을, 두 개 이상의 방위각과 관련되는 측정된 스펙트럼 응답에 대한 모델링된 스펙트럼 응답의 피팅에 기초하여 추정함
205
각각의 측정된 스펙트럼 응답과 관련되는 뮬러 매트릭스의 하나 이상의 비대각 엘리먼트의 적어도 하나의 스펙트럼의 파장의 하나 이상의 하위 범위를 선택함
206
뮬러 매트릭스의 하나 이상의 비대각 엘리먼트의 적어도 하나의 스펙트럼을 파장의 선택된 하나 이상의 하위 범위에 걸쳐 통합하여 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭을 생성함
207
주목하는 구조체의 비대칭 피쳐를 설명하는 하나 이상의 기하학적 형상 파라미터의 값을, 하나 이상의 임계 치수 파라미터의 값 및 하나 이상의 스펙트럼 응답 메트릭에 기초하여 추정함