



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2024년12월30일

(11) 등록번호 10-2748447

(24) 등록일자 2024년12월26일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G01B 15/00 (2006.01) G01B 15/02 (2006.01)

G03F 7/20 (2006.01) H01L 21/027 (2006.01)

H01L 21/66 (2006.01) H10B 10/00 (2023.01)

(52) CPC특허분류

G01B 15/00 (2023.02)

G01B 15/02 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2022-7027068

(22) 출원일자(국제) 2021년01월06일

심사청구일자 2023년12월04일

(85) 번역문제출일자 2022년08월04일

(65) 공개번호 10-2022-0122755

(43) 공개일자 2022년09월02일

(86) 국제출원번호 PCT/US2021/012236

(87) 국제공개번호 WO 2021/141933

국제공개일자 2021년07월15일

(30) 우선권주장

62/958,089 2020년01월07일 미국(US)

17/137,840 2020년12월30일 미국(US)

(56) 선행기술조사문헌

US20160320319 A1\*

US20170315055 A1\*

US20180224753 A1\*

US20190017946 A1\*

\*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

케이엘에이 코포레이션

미합중국, 캘리포니아 95035, 밀피타스, 원 테크  
놀로지 드라이브

(72) 발명자

쉬체그로프 안드레이 브이.

미국 캘리포니아주 95032 로스 개토즈 내셔널 애  
비뉴 15461

구트만 나다브

이스라엘 3091784 지크론 야코브 11 드로르 유닛  
12

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

김태홍, 김진희

전체 청구항 수 : 총 22 항

심사관 : 김윤선

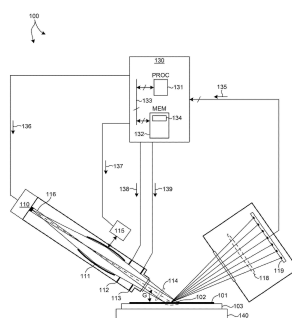
(54) 발명의 명칭 연질 x-선 산란계측에 기초한 오버레이 측정을 위한 방법 및 시스템

## (57) 요약

SXR(Soft X-Ray) 산란계측 측정 데이터에 기초한 오버레이 및 에지 배치 오차를 수행하기 위한 방법 및 시스템이 본원에 제시된다. 작은 조명 스폿 크기에 걸쳐 초점을 맞춘 단파장 SXR 방사선은 설계 규칙 타겟 또는 인-다이  
능동 디바이스 구조체를 측정할 수 있게 한다. 일부 실시예에서, SXR 산란계측 측정은 10 내지 5,000 전자볼트

(뒷면에 계속)

대표도 - 도3



범위의 에너지를 갖는 SXR 방사선으로 수행된다. 그 결과, SXR 파장에서의 측정은 실제 디바이스 오버레이를 밀접하게 나타내는 공정 설계 규칙에서 타겟 설계를 허용한다. 일부 실시예에서, 오버레이 및 형상 파라미터의 SXR 산란계측 측정은 에지 배치 오차의 정확한 측정을 가능하게 하기 위해 동일한 계측 타겟으로부터 동시에 수행된다. 다른 양태에서, 비주기적 디바이스 구조체의 오버레이는 실제 디바이스 타겟의 참조 측정에 대해 SXR 측정을 교정함으로써 설계 규칙 타겟의 SXR 측정에 기초하여 추정된다.

(52) CPC특허분류

*G03F 7/70516* (2023.05)

*G03F 7/70633* (2023.05)

*H01L 21/0276* (2013.01)

*H01L 22/12* (2013.01)

*H01L 22/20* (2013.01)

*H10B 10/12* (2023.02)

*G01B 2210/56* (2013.01)

(72) 발명자

**쿠즈넷소브 알렉산더**

미국 텍사스주 78727 오스틴 아르마가 스프링스 로드 13016

**젤리뉴 안토니오**

미국 캘리포니아주 95050 산타 클라라 해리슨 스트리트 865

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

계측 시스템에 있어서,

10 내지 5,000 전자볼트 범위의 에너지를 갖는 SXR(Soft X-Ray) 방사선 빔으로 기관 상에 배치된 측정 타겟의 제1 인스턴스를 조명하도록 구성된 SXR 조명 소스로서, 상기 측정 타겟은 상기 기관 위의 제1 높이에서 제조된 제1 층에 배치된 제1 구조체와 상기 기관 위의 제2 높이에서 제조된 제2 층에 배치된 제2 구조체를 포함하는 것인, 상기 SXR 조명 소스;

x-선 방사선의 입사 빔에 응답하여 상기 측정 타겟으로부터 산란된 x-선 방사선량의 하나 이상의 비제로 회절 차수(nonzero diffraction order)와 각각 관련된 복수의 강도를 검출하도록 구성된 x-선 검출기; 및

상기 하나 이상의 비제로 회절 차수 각각 내에서 상기 복수의 검출된 강도에 기초하여 상기 측정 타겟 또는 대응하는 인-다이 능동 디바이스 구조체(in-die active device structure)와 관련된 오버레이 오차의 값을 추정하도록 구성된 컴퓨팅 시스템

을 포함하는 계측 시스템.

#### 청구항 2

제1항에 있어서, 상기 x-선 검출기는 또한 상기 x-선 방사선의 입사 빔에 응답하여 상기 측정 타겟으로부터 산란된 x-선 방사선량의 제로 회절 차수와 관련된 강도를 검출하도록 구성되고,

상기 컴퓨팅 시스템은 또한,

상기 제로 회절 차수 내에서 상기 검출된 강도, 상기 하나 이상의 비제로 x-선 회절 차수 각각 내에서 상기 복수의 검출된 강도, 또는 이들의 임의의 조합에 기초하여 상기 측정 타겟의 형상을 특성화하는 하나 이상의 파라미터의 값을 추정하고;

오버레이의 상기 추정된 값 및 상기 측정 타겟의 형상을 특성화하는 하나 이상의 파라미터의 상기 추정된 값에 기초하여 상기 측정 타겟의 에지 배치 오차의 값을 추정하도록 구성되는 것인, 계측 시스템.

#### 청구항 3

제1항에 있어서, 상기 SXR 조명 소스는 또한 상기 SXR 방사선의 빔으로 상기 기관 상에 배치된 상기 측정 타겟의 제2 인스턴스를 조명하도록 구성되고,

상기 측정 타겟의 제1 인스턴스의 제1 구조체는 상기 제1 층과 정렬된 방향으로 오프셋 거리만큼 상기 측정 타겟의 제1 인스턴스의 제2 구조체로부터 오프셋되어 있고,

상기 측정 타겟의 제2 인스턴스의 제1 구조체는 상기 제1 층과 정렬된 방향과 반대 방향으로 상기 오프셋 거리만큼 상기 측정 타겟의 제2 인스턴스의 제2 구조체로부터 오프셋되어 있으며, 상기 x-선 검출기는 상기 x-선 방사선의 입사 빔에 응답하여 상기 측정 타겟의 상기 제2 인스턴스로부터 산란된 x-선 방사선량의 하나 이상의 비제로 회절 차수와 각각 관련된 복수의 강도를 검출하도록 구성되고,

상기 측정 타겟과 관련된 오버레이 오차의 값을 추정하는 것은, 상기 측정 타겟의 제1 인스턴스와 관련된 +1 회절 차수와 -1 회절 차수 내에서 검출된 강도들 사이의 차이와, 상기 측정 타겟의 제2 인스턴스와 관련된 +1 회절 차수와 -1 회절 차수 내에서 검출된 강도들 사이의 차이에 기초하는 것인, 계측 시스템.

#### 청구항 4

제1항에 있어서, 상기 측정 타겟과 관련된 오버레이 오차의 값을 추정하는 것은, 물리적 기반 측정 모델을 이용하여 상기 하나 이상의 비제로 회절 차수 내에서 상기 검출된 강도의 피팅 분석(fitting analysis)에 기초하는 것인, 계측 시스템.

#### 청구항 5

제1항에 있어서, 상기 SXR 방사선의 빔은 각각, 상이한 공칭 입사각, 상이한 공칭 방위각, 또는 둘 모두에서의 다수의 측정 인스턴스에서 상기 측정 타겟에 입사하는 것인, 계측 시스템.

#### 청구항 6

제5항에 있어서, 상기 측정 타겟과 관련된 오버레이 오차의 값을 추정하는 것은, 상기 다수의 측정 인스턴스 각각에서 상기 하나 이상의 비제로 회절 차수 각각 내에서 상기 복수의 강도의 변조(modulation)에 기초하는 것인, 계측 시스템.

#### 청구항 7

제1항에 있어서, 상기 측정 타겟 또는 대응하는 인-다이 타겟과 관련된 오버레이 오차의 값은 트레이닝된 머신러닝 기반 측정 모델에 의해 상기 하나 이상의 비제로 회절 차수 내에서 검출된 강도로부터 직접 결정되는 것인, 계측 시스템.

#### 청구항 8

제7항에 있어서, 상기 측정 타겟은 주기적이지 않은 것인, 계측 시스템.

#### 청구항 9

제7항에 있어서, 상기 SXR 조명 소스는 또한 10 내지 5,000 전자볼트 범위의 에너지를 갖는 SXR 방사선 빔으로 복수의 DOE(Design Of Experiments) 측정 타겟을 조명하도록 구성되고, 상기 x-선 검출기는 또한 상기 x-선 방사선의 입사 빔에 응답하여 상기 복수의 DOE 측정 타겟 각각으로부터 산란된 x-선 방사선량의 하나 이상의 비제로 회절 차수와 각각 관련된 복수의 강도를 검출하도록 구성되고, 상기 컴퓨팅 시스템은 또한 상기 DOE 측정 타겟 또는 대응하는 인-다이 타겟 각각과 관련된 오버레이 오차의 알려진 값 및 상기 검출된 복수의 강도에 기초하여 상기 머신러닝 기반 측정 모델을 트레이닝하도록 구성되는 것인, 계측 시스템.

#### 청구항 10

제9항에 있어서, 상기 오버레이 오차의 알려진 값은 기준 계측 시스템에 의한 상기 DOE 측정 타겟 또는 대응하는 인-다이 타겟의 측정으로부터 결정되는 것인, 계측 시스템.

#### 청구항 11

제1항에 있어서, 상기 대응하는 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차의 값을 결정하는 것은, 상기 하나 이상의 비제로 회절 차수의 각각 내에서의 상기 복수의 검출된 강도에 기초하는 상기 측정 타겟과 관련된 오버레이 오차의 상기 추정된 값과 정정 값의 합산을 포함하는 것인, 계측 시스템.

#### 청구항 12

제1항에 있어서, 상기 제1 층은 레지스트 층인 것인, 계측 시스템.

#### 청구항 13

제1항에 있어서, 상기 측정 타겟은 인-다이 능동 디바이스 구조체 또는 스크라이브 라인 내에 배치된 설계 규칙 타겟인 것인, 계측 시스템.

#### 청구항 14

제1항에 있어서, 상기 대응하는 인-다이 능동 디바이스 구조체는 주기적이지 않은 것인, 계측 시스템.

#### 청구항 15

방법에 있어서,

10 내지 5,000 전자볼트 범위의 에너지를 갖는 SXR(Soft X-Ray) 방사선 빔으로 기판 상에 배치된 설계 규칙 타겟의 제1 인스턴스를 조명하는 단계 - 여기서 상기 설계 규칙 타겟은 다중층 타겟임 -;

SXR 방사선의 입사 빔에 응답하여 상기 설계 규칙 타겟의 제1 인스턴스로부터 산란된 SXR 방사선량의  $+1/-1$  회절 차수와 관련된 제1 복수의 강도를 검출하는 단계;

상기  $+1/-1$  회절 차수 내에서 검출된 제1 복수의 강도에 기초하여 상기 설계 규칙 타겟의 제1 인스턴스와 관련된 오버레이 오차의 제1 값을 추정하는 단계;

주사 전자 현미경에 의한 제1 인-다이 능동 디바이스 구조체의 측정에 기초하여 상기 제1 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차의 값을 추정하는 단계 - 상기 설계 규칙 타겟의 제1 인스턴스 및 제1 인-다이 능동 디바이스 구조체는 동일한 제조 공정 규칙에 따라 제조됨 -; 및

상기 제1 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차의 값 및 상기 설계 규칙 타겟의 제1 인스턴스와 관련된 오버레이 오차의 제1 값에 기초하여 오버레이 교정 값을 결정하는 단계

를 포함하는 방법.

#### 청구항 16

제15항에 있어서,

10 내지 5,000 전자볼트 범위의 에너지를 갖는 SXR 방사선 빔으로 상기 설계 규칙 타겟의 제2 인스턴스를 조명하는 단계;

상기 SXR 방사선의 입사 빔에 응답하여 상기 설계 규칙 타겟의 제2 인스턴스로부터 산란된 SXR 방사선량의  $+1/-1$  회절 차수와 각각 관련된 제2 복수의 강도를 검출하는 단계;

상기  $+1/-1$  회절 차수 내에서 검출된 상기 복수의 강도에 기초하여 상기 설계 규칙 타겟의 제2 인스턴스와 관련된 오버레이 오차의 값을 추정하는 단계; 및

상기 설계 규칙 타겟의 제2 인스턴스와 관련된 오버레이 오차의 값 및 상기 오버레이 교정 값의 합산에 기초하여 제2 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차의 값을 추정하는 단계

를 더 포함하는 방법.

#### 청구항 17

제16항에 있어서,

x-선 방사선의 입사 빔에 응답하여 상기 설계 규칙 타겟의 제2 인스턴스로부터 산란된 x-선 방사선량의 제로 회절 차수와 관련된 강도를 검출하는 단계;

상기 제로 회절 차수 내에서 상기 검출된 강도,  $+1/-1$  회절 차수 내에서 검출된 복수의 강도, 또는 이들의 임의의 조합에 기초하여 상기 설계 규칙 타겟의 형상을 특성화하는 하나 이상의 파라미터의 값을 추정하는 단계; 및

상기 설계 규칙 타겟의 제2 인스턴스와 관련된 오버레이 오차의 값 및 상기 설계 규칙 타겟의 상기 제2 인스턴스의 형상을 특성화하는 상기 하나 이상의 파라미터의 값에 기초하여 상기 설계 규칙 타겟의 제2 인스턴스의 예지 배치 오차의 값을 추정하는 단계

를 더 포함하는 방법.

#### 청구항 18

제15항에 있어서, 상기 오버레이 교정 값은, 상기 제1 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차의 값과, 상기 설계 규칙 타겟의 제1 인스턴스와 관련된 오버레이 오차의 제1 값 사이의 차이인 것인, 방법.

#### 청구항 19

제15항에 있어서,

주사 전자 현미경에 의한 상기 설계 규칙 타겟의 제1 인스턴스의 측정에 기초하여 상기 설계 규칙 타겟의 제1 인스턴스와 관련된 오버레이 오차의 제2 값을 추정하는 단계를 더 포함하고,

상기 오버레이 교정 값을 결정하는 것은, 상기 설계 규칙 타겟의 제1 인스턴스와 관련된 오버레이 오차의 제1 값과 제2 값 사이의 차이, 및 상기 제1 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차의 값과 상기 설

계 규칙 타겟의 제1 인스턴스와 관련된 오버레이 오차의 상기 제2 값 사이의 차이에 기초하는 것인, 방법.

#### 청구항 20

제15항에 있어서, 상기 설계 규칙 타겟은 스크라이브 라인 내에 배치되거나 인-다이 능동 디바이스 구조체인 것인, 방법.

#### 청구항 21

제15항에 있어서, 상기 인-다이 능동 디바이스 구조체는 주기적이지 않은 것인, 방법.

#### 청구항 22

계측 시스템에 있어서,

10 내지 5,000 전자볼트 범위의 에너지를 갖는 SXR 방사선 빔으로 기관 상에 배치된 측정 타겟의 제1 인스턴스를 조명하도록 구성된 SXR 조명 소스로서, 상기 측정 타겟은 상기 기관 위의 제1 높이에서 제조된 제1 층에 배치된 제1 구조체와 상기 기관 위의 제2 높이에서 제조된 제2 층에 배치된 제2 구조체를 포함하는 것인, 상기 SXR 조명 소스;

x-선 방사선의 입사 빔에 응답하여 상기 측정 타겟으로부터 산란된 x-선 방사선량의 하나 이상의 비제로 회절 차수와 각각 관련된 복수의 강도를 검출하도록 구성된 x-선 검출기; 및

비일시적 컴퓨터 판독가능 매체

를 포함하고,

상기 비일시적 컴퓨터 판독가능 매체는,

하나 이상의 프로세서에 의해 실행되는 경우, 상기 하나 이상의 프로세서로 하여금,

상기 하나 이상의 비제로 회절 차수 각각 내에서 상기 복수의 검출된 강도에 기초하여 상기 측정 타겟 또는 대응하는 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차의 값을 추정하도록 하는 명령어를 저장하고 있는 것인, 계측 시스템.

### 발명의 설명

#### 기술 분야

[0001] 본 특허 출원은 2020년 1월 7일자로 출원된 "연질 x-선 산란계측을 이용하여 오버레이 및 에지 배치 오차를 측정하기 위한 시스템 및 방법"이라는 명칭의 미국 가특허 출원 번호 제62/958,089호로부터 35 U.S.C. § 119하의 우선권을 주장하며, 상기 출원은 그 전체가 참조로 본원에 함체된다.

[0002] 설명된 실시예는 계측(metrology) 시스템 및 방법, 특히 개선된 측정 정확도를 위한 방법 및 시스템에 관한 것이다.

#### 배경 기술

[0003] 로직 및 메모리 디바이스와 같은 반도체 디바이스는 전형적으로, 시편에 적용되는 일련의 처리 단계에 의해 제조된다. 이러한 처리 단계에 의해 반도체 디바이스의 다양한 피처 및 다수의 구조적 레벨이 형성된다. 예를 들어, 그 중에서도, 리소그래피는 반도체 웨이퍼 상에 패턴을 발생시키는 것을 포함하는 하나의 반도체 제조 공정이다. 반도체 제조 공정의 추가 예는 화학 기계적 폴리싱, 에칭, 적층(deposition) 및 이온 주입을 포함하지만 이에 제한되지는 않는다. 다수의 반도체 디바이스는 단일 반도체 웨이퍼에서 제조된 다음 개별 반도체 디바이스로 분리될 수 있다.

[0004] 계측 공정은 보다 높은 수율을 도모하기 위해 반도체 제조 공정의 다양한 단계에서 웨이퍼 상의 결함을 검출하는 데 이용된다. 산란계측(scatterometry) 및 반사계측(reflectometry) 구현 및 관련 분석 알고리즘을 포함하는 다수의 계측 기반 기법은 보통, 나노스케일 구조체의 임계 치수, 막 두께, 조성 및 기타 파라미터를 특성화하는 데 이용된다.

[0005] 디바이스(예컨대, 로직 및 메모리 디바이스)가 더 작은 나노미터 스케일의 치수로 이동함에 따라, 특성화

(characterization)는 더욱 어려워지고 있다. 복잡한 3차원 기하형상과 다양한 물리적 특성을 가진 재료를 통합하는 디바이스는 특성화의 어려움에 기여한다. 예를 들어, 최신 메모리 구조체는 종종 높은 종횡비의 3차원 구조체로 되어 있어 광 방사선(optical radiation)이 바닥층까지 침투(penetrates)하는 것을 어렵게 한다. 적외선 내지 가시광선을 활용하는 광학 계측 툴은 반투명 재료의 많은 층을 투과할 수 있지만, 침투 깊이가 양호한 더 긴 파장은 작은 이상(anomalies)에 대해 충분한 감도를 제공하지 않는다. 유사하게, 전자 기반 계측 툴은 샘플을 손상시키지 않으면서 부적절한 침투 깊이의 단점이 있다. 또한, 복잡한 구조체(예컨대, FinFET)를 특성화하는 데 필요한 파라미터 수의 증가는 파라미터 상관관계의 증가를 가져온다. 그 결과, 타겟을 특성화하는 파라미터들이 종종, 이용가능한 측정을 통해 확실하게 분리될 수 없다. 에지 배치 오차(edge placement error; EPE)와 같은 일부 구조적 파라미터의 경우, 현재 높은 처리량의 (예컨대, 광학적) 측정 솔루션이 없다.

[0006] 현재, 다양한 성공 레벨에서 오버레이 및 임계 치수(CD)를 측정하기 위해 여러 기술이 이용된다. 전형적으로 특수 계측 타겟에서 CD 및 오버레이 측정을 수행하기 위해 광학 및 전자빔 계측 기법이 이용된다.

[0007] 오버레이의 광학 측정은 주로 광학 이미징 또는 비-이미징 회절(산란계측)을 기반으로 한다. 그러나, 이러한 접근 방식은 많은 고도의(advanced) 타겟(예컨대, 복잡한 3D 구조체, 10nm보다 작은 구조체, 불투명 재료를 이용하는 구조체) 및 측정 응용분야(예컨대, 라인 에지 거칠기 및 라인 폭 거칠기 측정)의 측정과 관련된 근본적인 과제를 확실히 극복하지는 못했다.

[0008] 기존 방법을 이용하여, 오버레이 오차는 전형적으로, 리소그래피 툴에 의해 웨이퍼 상의 다양한 위치에 형성된 특수 타겟 구조체의 측정에 기초하여 평가된다. 일부 예에서, 이미징 기반 광학 오버레이 측정을 위해 공간적으로 분리된 격자(spatially separated gratings)가 이용된다. 일부 다른 예에서, 이미징 기반 광학 오버레이 측정을 위해 박스 인 박스 구조체가 이용된다. 이 형태에서는, 웨이퍼의 한 층 상에 박스가 생성되고, 다른 층 상에 더 작은 두 번째 박스가 생성된다. 두 박스의 중심 사이의 정렬을 비교함으로써 국소화된 오버레이 오차(localized overlay error)가 측정된다. 이러한 측정은 타겟 구조체가 이용가능한 웨이퍼 상의 위치에서 행해진다. 일부 예에서, 산란계측 기반(scatterometry-based) 광학 오버레이 측정 또는 전자빔 오버레이 측정을 위해 중첩 격자 또는 교호적 격자(interleaved gratings)가 이용된다.

[0009] 불행히도, 이러한 특수 타겟 구조체는 종종 전자 디바이스를 발생시키는 데 이용되는 특정 반도체 제조 공정의 설계 규칙을 따르지 않는다. 이는 적용 가능한 설계 규칙에 따라 제조된 실제 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차의 추정에서 오차를 가져온다.

[0010] 일 예에서, 이미지 기반 광학 오버레이 계측은 광 파장에서의 이미징의 해상도에 의해 심각하게 제한된다. 따라서, 설계 규칙보다 훨씬 큰 피처를 가진 타겟만 측정될 수 있다. 이미지 기반 광학 오버레이 계측은 종종 디자인 규칙 임계 치수를 훨씬 초과하는 임계 치수를 갖는 두꺼운 라인을 필요로 하는 광학 현미경으로 패턴을 분해하는 것을 필요로 한다.

[0011] 다른 예에서, 0차 회절(0th order diffraction)에 기초한 산란계측 기반 광학 오버레이 계측은 감도가 주기적 타겟의 피치에 따라 감소함에 따라 작은 오버레이 오차에 대해 매우 낮은 감도를 갖는다. 이것은 피치가 디바이스의 설계 규칙보다 훨씬 더 큰 치수가 되게 한다. 더욱이, 이 측정 접근 방식의 정확도는 오버레이가 측정되는 임의의 층에서 임의의 비대칭이 있는 경우 급격히 저하된다. 또한, 이 접근 방식은 단일 측정에서 양의(positive) 오버레이 오차와 음의(negative) 오버레이 오차를 구분할 수 없다.

[0012] 다른 예에서, 0보다 높은 회절 차수에 기초한 산란계측 기반 광학 오버레이 계측은 또한, 비제로 전파 회절 차수(nonzero propagating diffraction orders)에서 충분한 신호를 발생시키기 위해 비교적 큰 피치 타겟을 필요로 한다. 오버레이 비대칭 광학 신호는 전형적으로, 조명 광의 광 파장에 필적하는 패턴 피치를 갖는 주기적 타겟으로부터 발생된다. 일부 예에서, 500-800nm 범위의 피치 값이 이용될 수 있다. 한편, 로직 또는 메모리 애플리케이션을 위한 실제 디바이스 피치(설계 규칙 치수)는 100-400nm 범위 또는 심지어 100nm 미만과 같이 훨씬 더 작다. 또한, 이 접근 방식의 정확도는 오버레이가 측정되는 임의의 층에서 임의의 비대칭이 있는 경우 급격히 저하된다. 깊은 자외선 및 진공 자외선 범위 내로 조명의 광 파장을 줄이는 것은, 이러한 광자가 감소되고 오버레이 및 에지 배치 오차를 평가하는 데 필요한 하부 패턴에 도달하기 위해 다중 층 구조체를 충분히 관통하지 않기 때문에, 도움이 되지 않는다.

[0013] 주사 전자 현미경(SEM) 및 전자빔 계측과 같은 전자 기반 계측 기법은 나노미터 스케일의 피처를 분해할 수 있고 랜덤 로직과 같은 비주기적 구조체를 측정할 수 있다. 그러나, 전자 기반 계측 시스템은 실제 디바이스를 측정하기 위해 이용되는 경우 파괴적이다. 또한, 전자 기반 계측 시스템은 처리량(throughput)이 낮다. 측정

시간은 측정 사이트당 수 초 정도일 수 있다. 또한, 전자 기반 계측 시스템은 매우 제한된 3차원 측정 능력을 제공하는 하향식 이미징 시스템(top-down imaging systems)이다. 예를 들어, 중첩 격자 사이의 오버레이를 측정하기 위해 SEM이 이용되는 경우, 침투 깊이에 따라 점 확산 기능이 증가하기 때문에 CD 및 EPE를 측정할 수 없다. 추가 세부사항은 Gutman 등에게 허여되고 KLA-Tencor Corporation에 양도된 미국 특허 제10,473,460호에 기재되어 있으며, 그 내용은 전체가 참고로 본원에 함체된다. 일반적으로, SEM은 중간 분해능 수준을 달성하지만 샘플을 파괴하지 않으면서 구조체를 충분한 깊이까지 침투할 수 없다. 또한, 시편의 요구되는 대전(charging)은 이미징 성능에 악영향을 미친다.

[0014] 원자간력현미경(atomic force microscopes; AFM)과 주사터널링현미경(scanning-tunneling microscope; STM)은 원자 분해능을 달성할 수 있지만 시편의 표면만 탐사할 수 있다. 또한, AFM 및 STM 현미경은 긴 주사 시간을 필요로 한다.

[0015] 투과 전자 현미경(TEM)은 고해상도 수준을 달성하고 임의의 깊이를 탐사할 수 있지만, TEM은 시편의 파괴적인 섹셔닝(sectioning)을 필요로 한다.

[0016] 오버레이 및 EPE의 측정을 위한 광학 및 전자 기반 계측의 몇몇 한계를 극복하기 위해, 절대 정합 측정(absolute registration measurement) 기법이 이용될 수 있다. 임의의 두 패턴 사이의 공간적 분리와 동일한 범위를 갖는 정밀 병진 스테이지(accurate translation stage)를 이용하여 피쳐 간의 절대 거리를 측정한다. 이 결과는 오버레이, CD 및 EPE의 평가를 지원하는 데 이용된다. 불행히도, 절대 정합 측정 기법은 정밀 스테이지를 필요로 하고, 측정 톨에 복잡성을 추가하며, 처리량을 제한한다. 더욱이, 이 기법은 패턴 위 패턴(pattern-over-pattern) 타겟 또는 디바이스 구조체에 대해 잘 수행되지 않을 수 있다. 추가 세부 사항은 Shchegrov 등의 WIPO 공개 번호 2019/173171(KLA-Tencor Corporation에 양도)에 기재되어 있으며, 그 내용은 전체가 참조로 본원에 함체된다.

[0017] 요약하면, 로직 디바이스 및 고도 DRAM 및 수직 또는 평면 NAND 디바이스의 경우 20나노미터 미만의 디바이스 제조 노드에서 반도체 디바이스 수율은 막 두께, 패턴닝된 라인의 프로파일 파라미터, 오버레이 오차 및 에지 배치 오차(EPE)를 포함하는 많은 파라미터의 복합 함수이다. 이 중 EPE는 가장 까다로운 프로세스 윈도우를 가지고 있으며 CD 및 오버레이의 계측 및 제어를 필요로 한다. 현재, EPE 측정 및 많은 설계 규칙 오버레이 측정 응용을 위한 고처리량의 광학 계측 솔루션이 없다. 또한, 적절한 계측이 없기 때문에 디바이스 수율을 개선하기 위한 제어 체계를 형성하기가 어렵다.

[0018] 미래의 계측 응용은 점점 작아지는 분해능 요구 사항, 다중 파라미터 상관 관계, 점점 더 복잡해지는 기하학적 구조체 및 불투명 재료의 사용 증가로 인해 계측에 대한 과제를 제시한다. 따라서, 개선된 오버레이 및 형상 측정을 위한 방법 및 시스템이 요망된다.

## 발명의 내용

### 과제의 해결 수단

[0019] 본원에서 SXR(Soft X-Ray) 산란계측 측정 데이터에 기초한 오버레이 및 에지 배치 오차를 수행하기 위한 방법 및 시스템이 제시된다. 작은 조명 스폿 크기에 걸쳐 초점을 맞춘 단파장 SXR 방사선은 설계 규칙 타겟, 즉 근처의 인-다이 능동 디바이스 구조체 또는 인-다이 능동 디바이스 구조체 자체와 동일하거나 거의 동일한 피치를 갖는 타겟의 측정을 가능하게 한다. 오버레이 계측 능력을 제공하는 것 외에도, 본원에 설명된 방법 및 시스템은 측정된 구조체의 기하학적 파라미터를 강력하게 무상관화(de-correlate)으로써 형상 파라미터 측정의 정밀도와 정확도를 향상시킨다.

[0020] SXR 조명 방사선은 타겟의 불투명 영역과 아래층으로 침투할 수 있다. 일부 실시예에서, SXR 산란계측 측정(scatterometry measurement)은 10 내지 5,000 전자볼트 범위의 에너지를 갖는 SXR 방사선으로 수행된다. 전형적으로, 회절 한계 및 기타 광학 효과는 형상 및 오버레이 측정을 위해 최소 가능 타겟 크기를 제어한다. SXR 조명의 상대적으로 짧은 파장으로 인해, SXR 산란계측 측정은 타겟 영역이 상대적으로 작은 측정 타겟에 대해 수행될 수 있다.

[0021] 하층에 대한 SXR 침투는 오버레이, CD 및 EPE를 추정하는 데 필요한 신호에 상대적으로 높은 감도로 SXR 산란계측 측정을 가능하게 한다. 또한, 설계 규칙 타겟의 SXR 산란계측 오버레이 측정은 훨씬 더 큰 피치를 갖는 기존 오버레이 타겟과 비교하여 실제 디바이스 오버레이를 더 가깝게 나타낸다. SXR 산란계측은, 조명 파장이 측정된 설계 규칙 타겟의 주기보다 짧기 때문에, 설계 규칙 타겟에 대한 오버레이 측정을 가능하게 한다. 그 결

과, SXR 파장에서의 측정은 공정 설계 규칙에 따라 타겟 설계를 허용한다.

- [0022] 일부 예에서, 오버레이의 SXR 산란계측 측정은 SRAM과 같은 실제 디바이스 구조체의 직접 측정을 기반으로 한다.
- [0023] 일부 실시예에서, 설계 규칙 타겟은 각각 기본 주기성(underlying periodicity)을 갖는 다중 층을 포함한다. SXR 산란계측은 하층 패턴(underlayer patterns)에 대한 높은 감도로 다중 층 설계 규칙 타겟의 측정을 가능하게 한다. 이들 실시예 중 일부에서, 설계 규칙 타겟의 상단층은 포토레지스트 층이다. 이러한 방식으로, SXR 산란계측은 현상 후 검사(after-develop inspection; ADI) 공정 모니터링을 가능하게 한다.
- [0024] 일 양태에서, SXR 산란계측 시스템은 측정 중인 구조체로부터 산란된 비제로 회절 차수로부터 설계 규칙 계측 타겟 또는 인-다이 능동 디바이스 구조체(in-die active device structure)의 상이한 층 사이의 오버레이 오차를 추정하도록 구성된다. SXR 방사선의 상대적으로 짧은 파장으로 인해, 비제로 회절 차수, 특히  $\pm 1$  회절 차수는 오버레이 오차에 대해 상대적으로 높은 감도를 제공한다.
- [0025] 일부 실시예에서, 오버레이 및 형상 파라미터의 SXR 산란계측 측정은 동일한 계측 타겟으로부터 수집된 SXR 산란계측 측정결과로부터 동시에 수행된다. 이는 엔드 라인 단축, 선과 접촉 거리(line to contact distance) 등과 같은 EPE(Edge Placement Errors)의 측정을 가능하게 한다. 그 결과, SXR 산란계측은 오버레이 및 CD 측정이 상이한 타겟에서 수행되는 경우 발생할 수 있는 타겟 바이어스(target bias)로 인한 오차 없이 EPE 측정을 가능하게 한다. 또한, 동일한 계측 타겟으로부터 오버레이 및 CD 구조체 파라미터를 동시에 측정하면 측정 정확도와 처리량이 모두 향상된다.
- [0026] 일부 실시예에서, 각각 반대 방향으로 공칭 오프셋(nominal offset)을 갖는 계측 타겟의 2개의 셀로부터의 SXR 산란계측 측정 신호는 오버레이 오차를 분해하기 위해 이용된다.
- [0027] 일부 예에서, SXR 산란계측을 기반으로 하는 계측은 관심 파라미터, 예컨대 오버레이 오차, 형상 파라미터 등을 결정하는 것과, 측정된 SXR 산란계측 데이터를 이용하여 미리 결정된 측정 모델의 역해(inverse solution)에 의해 샘플을 특성화하는 것을 포함한다. 이러한 방식으로, 타겟 파라미터는, 측정된 산란된 x-선 강도와 모델링된 결과 사이의 오차를 최소화하는 파라미터화된 측정 모델의 값에 대한 해를 구하는 것에 의해 추정된다.
- [0028] 일부 실시예에서, 측정 타겟 또는 인-다이 타겟과 관련된 오버레이 오차의 값은 트레이닝된 머신 러닝 기반 측정 모델에 기초하여 하나 이상의 비제로 회절 차수 내에서 검출된 강도로부터 직접 결정된다. 이러한 실시예에서, 트레이닝된 머신 러닝 기반 모델은 SXR 측정 데이터로부터 오버레이 오차를 직접 추출한다.
- [0029] 일부 실시예에서, SXR 산란계측 기반 오버레이 측정은 SXR 방사선으로 샘플을 조명하는 것과, 상기 샘플에 대한 복수의 입사각, 복수의 파장 또는 둘 모두에 대한 결과 회절 차수의 강도를 검출하는 것을 포함한다. 더욱이, 측정 타겟과 관련된 오버레이 오차는 복수의 측정 인스턴스 각각에서 하나 이상의 비제로 회절 차수 각각 내의 복수의 강도의 변조에 기초하여 결정된다.
- [0030] 다른 양태에서, 실제 디바이스 타겟은 비주기적이다. 오버레이 측정을 기준 측정으로 교정함으로써, SXR 산란계측 기법을 적용하여 충분한 주기성을 가진 설계 규칙 타겟의 측정에 기초하여 비주기적 구조체의 오버레이를 추정할 수 있다. 이것은 측정 타겟이 주기적이거나 거의 주기적일 것을 필요로 하는 산란계측 측정의 한계를 효과적으로 극복한다.
- [0031] 일부 실시예에서, 다중 오버레이 계측 타겟은 하나의 층으로부터 발생하는 회절 차수가 다른 층의 상이한 회절 차수와 보강 간섭(constructively interfere)하도록 상이한 층에서 상이한 피치로 설계된다. 반대로, 오버레이에서 보강 간섭을 받지 않는 상이한 차수 쌍에서 검출된 강도 측정은 형상 파라미터에 의해 지배된다. 따라서, 일부 실시예에서, 계측 오버레이 타겟은, 특정 격자 차수 쌍에서 오버레이에 대한 감도를 증가시키고 또한 형상 파라미터 값의 추정에 유용한 강도 데이터를 제공하도록 특정 격자 구조로 설계된다.
- [0032] 일부 실시예에서, 다중 오버레이 계측 타겟은 하나의 층으로부터 발생하는 회절 차수가 다른 층의 상이한 회절 차수와 보강 간섭하도록 상이한 층에서 상이한 피치 배향으로 설계된다. 일반적으로, 상이한 주기성(예를 들어, 상이한 격자 피치), 상이한 피치 배향, 또는 이들의 임의의 조합을 갖는 층들의 세트는, 각각 상이한 층과 관련된 산란 벡터들의 세트를 일으킨다. 오버레이 계측 타겟은 산란 벡터들의 미리 결정된 서브세트가 정렬되도록 설계된다. 이러한 방식으로, 산란 벡터들의 미리 결정된 서브세트와 대응하는 층 간의 오버레이에 대한 감도가 향상된다.
- [0033] 상기 내용은 요약이므로 필요에 따라 세부 사항의 단순화, 일반화 및 생략을 포함한다. 따라서, 당업자는 상기

요약이 단지 예시적이며 어떤 식으로든지 제한하지 않는다는 것을 이해할 것이다. 본원에 기재된 디바이스 및/또는 공정의 다른 양태, 독창적인 특징, 및 이점은 본원에 기재된 비제한적인 상세한 설명에서 명백해질 것이다.

### 도면의 간단한 설명

[0034]

도 1은 마이크로전자 칩의 SRAM(Static Random Access Memory) 영역(10)에 제조된 라인 구조체(11)의 하드마스크 패턴을 도시하는 도면이다.

도 2는 도 1에 도시된 라인 구조체 패턴의 상단에 배치된 바닥 반사 방지 코팅(bottom anti-reflective coating; BARC) 층(12) 및 레지스트 층(13)을 도시하는 도면이다.

도 3은 본원에 제시된 예시적인 방법에 따라 시편의 특성을 측정하기 위한 SXR(Soft X-Ray) 계측 툴(100)의 실시예를 도시하는 도면이다.

도 4는 능동 필드(401-404), 게이트(405-408), 및 컨택트 (409-421)을 포함하는 디바이스 구조체(400)의 평면도를 도시하는 도면이다.

도 5a는 한 방향의 공칭 오프셋(+OFFSET)과 오버레이 오차(OVL)의 합과 동일한 거리만큼 서로 오프셋된 적층 격자 구조체를 갖는 셀을 도시한다.

도 5b는 도 5에 도시된 공칭 오프셋과 반대 방향의 공칭 오프셋(-OFFSET)과 오버레이 오차(OVL)의 합과 동일한 거리만큼 서로 오프셋된 적층 격자 구조체를 갖는 셀을 도시한다.

도 6은 본원에 기재된 바와 같은 모델 피팅 분석(model fitting analysis)에 기초하여 오버레이를 추정하도록 구성된 모델 구축 및 분석 엔진(180)을 도시하는 도면이다.

도 7은 입사각 및 방위각에서 x-선 방사선 빔에 의해 조명된 계측 타겟(120)을 포함하는 웨이퍼(101)를 도시하는 도면이다.

도 8은 상이한 층에 있는 라인(151, 152)의 2개의 주기적 어레이를 포함하는 층상 계측 타겟(layered metrology target)(150)을 도시한다.

도 9는 도 8에 도시된 계측 타겟에 대한 각도 범위에 대한 -2 및 +2 회절 차수의 대응하는 측정값 및 강도의 단순화된 모델의 피팅 시뮬레이션을 나타내는 플롯(170)을 도시한다.

도 10은 능동 디바이스 영역에 제조된 능동 디바이스 구조체 및 스크라이브 라인 영역에 제조된 설계 규칙 계측 타겟을 포함하는 반도체 다이를 도시하는 도면이다.

도 11은 본원에 기재된 바와 같이, 교정된 SXR 측정에 기초하여 오버레이를 추정하는 예시적인 방법(200)을 도시하는 흐름도이다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0035]

첨부 도면에 도시된 본 발명의 배경 예 및 일부 실시예를 상세히 참조한다.

[0036]

도 1은 마이크로전자 칩의 SRAM 영역(10)에 제조된 라인 구조체(11)의 하드마스크 패턴을 도시한다. 활성 영역의 복잡한 레이아웃은 컷 마스크와 여러 패터닝 기술을 조합하여 생성된다. 컷 마스크는 기판을 활성 영역으로 패터닝하는 데 이용되는 하드마스크 층의 일부를 선택적으로 제거한다. 도 2는 도 1에 도시된 라인 구조체 패턴의 상단에 배치된 바닥 반사 방지 코팅(BARC) 층(12) 및 레지스트 층(13)을 도시한다. 레지스트 층은 레지스트 층(13)의 개구부(14) 아래의 하드마스크 패턴의 일부를 선택적으로 제거하는 데 이용된다. 도 1에 도시된 바와 같이, 라인 구조체(11)의 하드마스크 패턴은 레지스트 층(13)의 개구부(14) 내에서도 BARC 층(12)에 의해 매립된다.

[0037]

컷 마스크 공정에 적절한 수율을 제공하기 위해서는, 형상 파라미터(예컨대, CD, HT, SWA, 프로파일 파라미터 등), 막 두께 및 오버레이에 대한 신뢰할 수 있는 측정이 필요하다. 오버레이를 계산하면 4중 패터닝 공정의 이전 단계로부터의 많은 구조적 파라미터의 함수임을 알 수 있다. 컷의 에지와 인접 라인 구조체 사이의 갭 분포 및 이에 따른 공정의 수율은 모든 공정 파라미터의 복잡한 상호 작용에 따라 달라진다.

[0038]

다른 예에서, 에지 배치 거리(EPD) 및 관련 에지 배치 오차(EPE)는 디바이스 전기 컨택트가 만들어진 후 모니터

링하고 제어하는 데 중요한 파라미터이다. 원하는 EPD와 실제 EPD의 차이를 EPE라고 한다. EPD 및 EPE는 오버레이 및 CD 오차의 함수이다.

- [0039] SXR(Soft X-Ray) 산란계측 측정 데이터에 기초하여 구조체 및 재료의 오버레이 및 에지 배치 오차를 수행하는 방법 및 시스템이 제공된다. 작은 조명 스폿 크기에 걸쳐 초점을 맞춘 단파장 SXR 방사선은 설계 규칙 타겟, 즉 근처의 인-다이 능동 디바이스 구조체 또는 인-다이 능동 디바이스 구조체 자체와 동일하거나 거의 동일한 피치를 갖는 타겟의 측정을 가능하게 한다. 본원에 제시된 방법 및 시스템은 기능 다이 내부 또는 외부에 위치한 2차원 및 3차원 설계 규칙 계측 타겟에 적용될 수 있다. 오버레이 계측 능력을 제공하는 것 외에도, 본원에 설명된 방법 및 시스템은 측정된 구조체의 기하학적 파라미터를 강력하게 무상관화(de-correlate)으로써 형상 파라미터 측정의 정밀도와 정확도를 향상시킨다.
- [0040] SXR 조명 방사선은 타겟의 불투명 영역과 아래층으로 침투할 수 있다. SXR 산란계측을 이용하여 측정 가능한 기하학적 파라미터의 예로는 기공 크기, 기공 밀도, 라인 에지 거칠기, 라인 폭 거칠기, 측벽 각도, 프로파일, 임계 치수, 오버레이, 에지 배치 오차 및 피치가 있다. 측정 가능한 재료 파라미터의 예로는 전자 밀도, 원소 ID(identification) 및 조성이 있다. 일부 예에서, SXR 산란계측은 10nm 미만의 피치뿐만 아니라 기하학적 파라미터 및 재료 파라미터의 측정이 요구되는 스핀-전달-토크 MRAM과 같은 고도 반도체 구조체의 측정을 가능하게 한다.
- [0041] 일부 실시예에서, SXR 산란계측 측정은 10 내지 5,000 전자볼트 범위의 에너지를 갖는 SXR 방사선으로 수행된다. 전형적으로, 회절 한계 및 기타 광학 효과는 형상 및 오버레이 측정을 위해 최소 가능 타겟 크기를 제어한다. SXR 조명의 상대적으로 짧은 파장으로 인해, SXR 산란계측 측정은 타겟 영역이 상대적으로 작은 측정 타겟에 대해 수행될 수 있다. 일부 실시예에서, SXR 산란계측 측정은 5 마이크로미터 미만의 최대 범위의 치수를 갖는 영역에 걸쳐 계측 타겟에 대해 수행된다. 일부 실시예에서, SXR 산란계측 측정은 2 마이크로미터 미만의 최대 범위의 치수를 갖는 영역에 걸쳐 계측 타겟에 대해 수행된다.
- [0042] 일부 실시예에서, 설계 규칙 타겟은 각각 기본 주기성(underlying periodicity)을 갖는 다중 층을 포함한다. SXR 산란계측은 하층 패턴(underlayer patterns)에 대한 높은 감도로 다중 층 설계 규칙 타겟의 측정을 가능하게 한다. 이들 실시예 중 일부에서, 설계 규칙 타겟의 상단층은 포토레지스트 층이다. 이러한 방식으로, SXR 산란계측은 현상 후 검사(after-develop inspection; ADI) 공정 모니터링을 가능하게 한다.
- [0043] 하층에 대한 SXR 침투는 오버레이, CD 및 EPE를 추정하는 데 필요한 신호에 상대적으로 높은 감도로 SXR 산란계측 측정을 가능하게 한다. 또한, 설계 규칙 타겟의 SXR 산란계측 오버레이 측정은 훨씬 더 큰 피치를 갖는 기존 오버레이 타겟과 비교하여 실제 디바이스 오버레이를 더 가깝게 나타낸다. 일부 예에서, 오버레이의 SXR 산란계측 측정은 SRAM과 같은 실제 디바이스 구조체의 직접 측정을 기반으로 한다.
- [0044] 일 양태에서, SXR 산란계측 시스템은 측정 중인 구조체로부터 산란된 비제로 회절 차수로부터 설계 규칙 계측 타겟 또는 인-다이 능동 디바이스 구조체(in-die active device structure)의 상이한 층 사이의 오버레이 오차를 추정하도록 구성된다.
- [0045] 도 3은 적어도 하나의 신규 양태에서 시편의 특성을 측정하기 위한 SXR 산란계측 툴(100)의 실시예를 도시한다. 도 3에 도시된 바와 같이, 시스템(100)은 입사 조명 빔 스폿에 의해 조명된 시편(101)의 측정 영역(102)에 걸쳐 SXR 산란계측 측정을 수행하는 데 이용될 수 있다.
- [0046] 도시된 실시예에서, 계측 툴(100)은 x-선 조명 소스(110), 집속 광학계(111), 빔 발산 제어 슬릿(112), 및 슬릿(113)을 포함한다. x-선 조명 소스(110)는 SXR 산란계측 측정에 적합한 SXR 방사선을 발생시키도록 구성된다. 일부 실시예에서, x-선 조명 소스(110)는 다색, 고휘도, 대형 에텐듀 소스(polychromatic, high-brightness, large etendue source)이다. 일부 실시예에서, x-선 조명 소스(110)는 10-5000 전자 볼트 사이의 범위에서 x-선 방사선을 발생시키도록 구성된다. 일반적으로, 고처리량의 인라인 계측을 가능하게 하기에 충분한 플럭스 레벨에서 고휘도 SXR을 발생시킬 수 있는 임의의 적절한 고휘도 x-선 조명 소스가 SXR 측정을 위한 x-선 조명을 공급하기 위해 고려될 수 있다.
- [0047] 일부 실시예에서, x-선 소스는 x-선 소스가 상이한 선택 가능한 파장들의 x-선 방사선을 전달할 수 있게 하는 튜닝가능한 모노크로메이터(tunable monochromator)를 포함한다. 일부 실시예에서, x-선 소스가 측정 중인 시편에 충분한 침투를 허용하는 파장의 광을 공급하는 것을 보장하기 위해 하나 이상의 x-선 소스가 이용된다.
- [0048] 일부 실시예에서, 조명 소스(110)는 고조파 발생(HHG) x-선 소스이다. 일부 다른 실시예에서, 조명 소스(110)는 위글러/언둘레이터 싱크로트론 방사선 소스(wiggler/undulator synchrotron radiation source)(SRS)이다.

예시적인 위글러/언플레이터 SRS가 미국 특허 제8,941,336호 및 제8,749,179호에 기재되어 있으며, 그 내용은 전체가 참고로 본원에 합체된다.

- [0049] 일부 다른 실시예에서, 조명 소스(110)는 레이저 생성 플라즈마(LPP) 광원이다. 이들 실시예 중 일부에서, LPP 광원은 크세논, 크립톤, 아르곤, 네온 및 질소 방출 재료 중 임의의 것을 포함한다. 일반적으로, 적절한 LPP 타겟 재료의 선택은 공진 SXR 영역의 밝기에 최적화된다. 예를 들어, 크립톤에 의해 방출되는 플라즈마는 Silicon K-edge에서 고휘도를 제공한다. 다른 예에서, 제논에 의해 방출되는 플라즈마는 (10-5000eV)의 전체 SXR 영역에 걸쳐 고휘도 처리량을 제공한다.
- [0050] LPP 타겟 재료 선택은 또한, 신뢰할 수 있고 수명이 긴 광원 동작을 위해 최적화될 수 있다. 크세논, 크립톤 및 아르곤과 같은 희가스 타겟 재료는 불활성이며, 오염 제거 처리를 최소화하거나 전혀 하지 않고 폐쇄 루프 작업에서 재사용될 수 있다. 예시적인 SXR 조명 소스는 Khodykin 등의 미국 특허 공개 번호 제2019/0215940호 (KLA-Tencor Corporation에 양도)에 기재되어 있으며, 그 내용은 전체가 참조로 본원에 합체된다.
- [0051] 일부 실시예에서, 조명 소스(예를 들어, 조명 소스(110))에 의해 방출된 파장은 선택가능하다. 일부 실시예에서, 조명 소스(110)는 하나 이상의 선택된 스펙트럼 영역에서 플릭스를 최대화하도록 컴퓨팅 시스템(130)에 의해 제어되는 LPP 광원이다. 타겟 재료의 레이저 피크 강도는 플라즈마 온도를 제어하고 따라서 방출되는 방사선의 스펙트럼 영역을 제어한다. 레이저 피크 강도는 펄스 에너지, 펄스 폭 또는 둘 다를 조정함으로써 변경된다. 일 예에서, 100피코초 펄스 폭이 SXR 방사선을 발생시키는 데 적합하다. 도 3에 도시된 바와 같이, 컴퓨팅 시스템(130)은 조명 소스(110)가 조명 소스(110)로부터 방출된 파장의 스펙트럼 범위를 조정하게 하는 명령 신호(136)를 조명 소스(110)에 전달한다. 일 예에서, 조명 소스(110)는 LPP 광원이고, LPP 광원은 LPP 광원으로부터 방출된 원하는 스펙트럼 범위의 파장을 실현하기 위해 펄스 지속시간, 펄스 주파수 및 타겟 재료 조성 중 임의의 것을 조정한다.
- [0052] 비제한적인 예로서, 입자 가속기 소스, 액체 애노드 소스, 회전 애노드 소스, 고정식 고체 애노드 소스, 마이크로포커스 소스, 마이크로포커스 회전 애노드 소스, 플라즈마 기반 소스 및 역 콤프톤(Compton) 소스 중 임의의 것이 x-선 조명 소스(110)로서 이용될 수 있다.
- [0053] 예시적인 x-선 소스는 x-선 방사선을 자극하기 위해 고체 또는 액체 타겟에 충격을 가하도록 구성된 전자 빔 소스를 포함한다. 고휘도, 액체 금속 x-선 조명을 발생시키기 위한 방법 및 시스템이 2011년 4월 19일자로 KLA-Tencor Corp.에 허여된 미국 특허 번호 제7,929,667호에 기재되어 있으며, 그 전문은 본원에 참조로 합체된다.
- [0054] x-선 조명 소스(110)는 유한 측면 치수(finite lateral dimensions) (즉, 빔 축에 직교하는 비제로 치수)를 갖는 소스 영역에 걸쳐 x-선 방출을 생성한다. 일 실시예에서, 조명 소스(110)의 소스 영역은 20 마이크로미터 미만의 측면 치수를 특징으로 한다. 일부 실시예에서, 소스 영역은 10 마이크로미터 이하의 측면 치수를 특징으로 한다. 소스 크기가 작으면 시편 상의 작은 타겟 영역을 고휘도로 조명할 수 있어, 측정 정밀도, 정확도 및 처리량이 향상된다.
- [0055] 일반적으로, x-선 광학계는 x-선 방사선을 성형하여 시편(101)으로 향하게 한다. 일부 예에서, x-선 광학계는 다층 x-선 광학계를 이용하여 1밀리라디안 미만의 발산으로 x-선 빔을 시편(101)의 측정 영역(102)에 시준하거나 집속한다. 일부 실시예에서, x-선 광학계는 하나 이상의 x-선 시준 미러(x-ray collimating mirrors), x-선 개구(x-ray apertures), x-선 빔 스톱(x-ray beam stops), 굴절 x-선 광학계(refractive x-ray optics), 존 플레이트(zone plates)와 같은 회절 광학계, 슈바르츠실트 광학계(Schwarzschild optics), 커크패트릭-바에즈 광학계(Kirkpatrick-Baez optics), 몬텔 광학계(Montel optics), 월터 광학계(Wolter optics), 타원 미러(ellipsoidal mirrors)와 같은 정반사 x-선 광학계(specular x-ray optics), 중공 모세관 x-선 도파관(hollow capillary x-ray waveguides)과 같은 다중 모세관 광학계(polycapillary optics), 다층 광학계 또는 시스템, 또는 이들의 임의의 조합을 포함한다. 추가 세부 사항은 미국 특허 공개 번호 제2015/0110249호에 기재되어 있으며, 그 내용은 그 전체가 참조로 본원에 합체된다.
- [0056] 도 3에 도시된 바와 같이, 집속 광학계(111)는 시편(101) 상에 위치한 계측 타겟 위로 소스 방사선을 집속한다. 유한 측면 소스 치수는 소스의 예지로부터 오는 광선(116)에 의해 정해지는 타겟 상의 유한 스폿 크기(102) 및 빔 슬릿(112 및 113)에 의해 제공되는 임의의 빔 성형을 초래한다.
- [0057] 일부 실시예에서, 집속 광학계(111)는 타원형으로 형성된 집속 광학 요소를 포함한다. 도 3에 도시한 실시예에서, 타원의 중심에서 집속 광학계(111)의 배율은 대략 1이다. 그 결과, 시편(101)의 표면에 투영된 조명 스폿 크기는 공칭 입사각(G)으로 인한 빔 확산에 맞게 조정된 조명 소스와 거의 같은 크기이다.

- [0058] 추가 양태에서, 집속 광학계(111)는 소스 방출을 수집하고 하나 이상의 개별 파장 또는 스펙트럼 대역을 선택하고, 선택된 광을 원하는 공칭 입사각으로 시편(101) 위로 집속시킨다.
- [0059] 공칭 입사각은 계측 타겟 경계 내에 남아 있으면서 신호 정보 내용을 최대화하기 위해 계측 타겟의 원하는 침투를 달성하도록 선택된다. 경질 x-선의 입계각은 매우 작지만, 연질 x-선의 입계각은 훨씬 더 크다. 이러한 추가적인 측정 유연성의 결과로서, SXR 측정은 공칭 입사각의 정확한 값에 대한 감도를 낮추면서 구조체 내를 더 깊이 탐사한다.
- [0060] 일부 실시예에서, 집속 광학계(111)는, 시편(101) 위로의 투영을 위해 원하는 파장 또는 파장 범위를 선택하는 단계적 다층(graded multi-layers)을 포함한다. 일부 예에서, 집속 광학계(111)는, 하나의 파장을 선택하고 그 선택된 파장을 공칭 입사각에 대한 입사각 범위에 걸쳐 시편(101) 위로 투영하는 단계적 다층 구조체(예를 들어, 층 또는 코팅)를 포함한다. 일부 예에서, 집속 광학계(111)는, 파장의 범위를 선택하고 그 선택된 파장을 하나의 입사각에 걸쳐 시편(101) 위로 투영하는 단계적 다층 구조체를 포함한다. 일부 예에서, 집속 광학계(111)는, 파장의 범위를 선택하고 그 선택된 파장을 입사각 범위에 걸쳐 시편(101) 위로 투영하는 단계적 다층 구조체를 포함한다.
- [0061] 다층 격자 구조체가 너무 깊을 때 발생하는 빛의 손실을 최소화하기 위해 단계적 다층 광학계(graded multi-layered optics)가 선호된다. 일반적으로, 다층 광학계는 반사된 파장을 선택한다. 선택된 파장의 스펙트럼 대역폭은 시편(101)에 제공되는 플럭스, 측정된 회절 차수의 정보 내용을 최적화하고, 검출기에서 각도 분산 및 회절 피크 중첩을 통한 신호 저하를 방지한다. 또한, 발산을 제어하기 위해 단계적 다층 광학계가 이용된다. 각 파장에서의 각도 발산이 검출기에서 플럭스와 최소 공간 중첩에 최적화된다.
- [0062] 일부 예에서, 단계적 다층 광학계는 특정 재료 인터페이스 또는 구조적 치수로부터, 회절 신호의 대비 및 정보 내용을 향상시키는 파장을 선택한다. 예를 들어, 선택된 파장은 요소 고유의 공진 영역(예컨대, 실리콘 K-에지, 질소, 산소 K-에지 등)에 걸쳐 있도록 선택될 수 있다. 또한, 이러한 예들에서, 조명 소스는 또한 선택된 스펙트럼 영역에서 플럭스를 최대화하도록 튜닝될 수 있다(예를 들어, HHG 스펙트럼 튜닝, LPP 레이저 튜닝 등).
- [0063] 일부 실시예에서, 집속 광학계(111)는 각각이 타원형 표면 형상을 갖는 복수의 반사 광학 요소를 포함한다. 각 반사 광학 요소는 기관파, 상이한 파장 또는 파장 범위를 반사하도록 튜닝된 다층 코팅을 포함한다. 일부 실시예에서, 각각 상이한 파장 또는 파장 범위를 반사하는 복수의 반사 광학 요소(예를 들어, 1-5)가 각각의 입사각에 배열된다. 추가 실시예에서, 각각 상이한 파장 또는 파장 범위를 반사하는 반사 광학 요소의 다중 세트(예를 들어, 2-5개)가 상이한 공칭 입사각에 배열된다. 일부 실시예에서, 반사 광학 요소의 다중 세트는 측정 동안 시편(101) 위로 조명 광을 동시에 투사한다. 일부 다른 실시예에서, 반사 광학 요소의 다중 세트는 측정 동안 시편(101) 위로 조명 광을 순차적으로 투사한다. 이러한 실시예에서, 능동 셔터(active shutters) 또는 개구(apertures)가 시편(101) 위로 투사되는 조명 광을 제어하기 위해 이용된다.
- [0064] 일부 실시예에서, 동일 계측 영역에 투영된 파장, AOI, 방위각, 또는 이들의 임의의 조합의 범위는 집속 광학계의 하나 이상의 미리 요소를 능동적으로 위치 결정함으로써 조정된다. 도 3에 도시된 바와 같이, 컴퓨팅 시스템(130)은, 시편(101) 위로 투영되는 원하는 범위의 파장, AOI, 방위각 또는 이들의 조합을 달성하기 위해 액추에이터 시스템(115)이 집속 광학계(111)의 하나 이상의 광학 요소의 위치, 정렬 또는 둘 모두를 조정하게 하는 명령 신호를 액추에이터 시스템(115)에 전달한다.
- [0065] 일반적으로, 입사각은 측정 중인 계측 타겟에 의한 조명 광의 침투 및 흡수를 최적화하기 위해 각 파장에 대해 선택된다. 많은 예에서, 원하는 관심 층과 관련된 신호 정보를 최대화하기 위해 다중 층 구조체가 측정되고 입사각이 선택된다. 오버레이 계측의 예에서, 파장(들)과 입사각(들)은 이전 층과 현재 층의 산란 사이의 간섭으로 인한 신호 정보를 최대화하도록 선택된다. 또한, 신호 정보 내용을 최적화하기 위해 방위각도 선택된다. 또한, 방위각은 검출기에서 회절 피크의 각도 분리를 보장하기 위해 선택된다.
- [0066] 일부 실시예에서, SXR 산란계측 시스템(예를 들어, 계측 툴(100))은, 시편(101)에 입사하는 조명 빔(114)을 성형하고 측정 중인 계측 타겟을 조명할 조명 광의 일부를 선택적으로 차단하기 위해 하나 이상의 빔 슬릿 또는 개구를 포함한다. 하나 이상의 빔 슬릿은, x-선 조명 스폿이 측정 중인 계측 타겟의 영역 내에 맞도록 빔 크기와 형상을 정한다. 또한, 하나 이상의 빔 슬릿은 검출기에서 회절 차수의 중첩을 최소화하도록 조명 빔 발산을 정한다.
- [0067] 일부 실시예에서, SXR 산란계측 시스템(예를 들면, 계측 툴(100))은, 측정 중인 계측 타겟을 동시에 조명하는

조명 파장의 세트를 선택하기 위해 하나 이상의 빔 슬릿 또는 개구를 포함한다. 이들 실시예에서, 하나 이상의 슬릿은 다중 조명 파장을 포함하는 조명을 통과시키도록 구성된다. 일반적으로, 신호 정보와 처리량을 증가시키기 위해서는 측정 중인 계측 타겟을 동시에 조명하는 것이 바람직하다. 그러나, 실제로, 검출기에서 회절 차수의 중첩은 조명 파장의 범위를 제한한다. 일부 실시예에서, 하나 이상의 슬릿은 상이한 조명 파장을 순차적으로 통과시키도록 구성된다. 일부 예에서, 빔 발산이 더 클 때 동시 조명에 비해 순차 조명에 대한 신호 대 잡음비가 더 높을 수 있기 때문에 더 큰 각도 발산에서의 순차 조명은 더 큰 처리량을 제공한다. 측정이 순차적으로 수행될 때 회절 차수의 중첩 문제는 문제가 되지 않는다. 이는 측정 유연성을 높이고 신호 대 잡음비를 향상시킨다.

[0068] 도 3은 집속 광학계(111)와 빔 성형 슬릿(113) 사이의 빔 경로에 위치한 빔 발산 제어 슬릿(112)을 도시한다. 빔 발산 제어 슬릿(112)은 측정 중인 시편에 제공되는 조명의 발산을 제한한다. 빔 성형 슬릿(113)은 빔 발산 제어 슬릿(112)과 시편(101) 사이의 빔 경로에 위치한다. 빔 성형 슬릿(113)은 추가로 입사 빔(114)을 성형하고 입사 빔(114)의 조명 파장(들)을 선택한다. 빔 성형 슬릿(113)은 시편(101) 직전의 빔 경로에 위치한다. 일부 실시예에서, 빔 성형 슬릿(113)의 슬릿은 유한 소스 크기에 의해 정해지는 빔 발산으로 인한 입사 빔 스폿 크기의 확대를 최소화하기 위해 시편(101)에 매우 근접하여 위치된다. 도 3에 도시된 바와 같이, 컴퓨팅 시스템(130)은, 원하는 빔 발산을 달성하기 위해 빔 발산 제어 슬릿(112)의 능동 요소가 빔 발산 제어 슬릿(112)의 하나 이상의 광학 요소의 위치, 정렬 또는 둘 다를 조정하게 하는 명령 신호(138)를 빔 발산 제어 슬릿(112)에 전달한다. 유사하게, 도 3에 도시된 바와 같이, 컴퓨팅 시스템(130)은, 시편(101) 위로 투영된 원하는 빔 형상을 달성하기 위해 빔 성형 슬릿(113)의 능동 요소가 빔 성형 슬릿(113)의 하나 이상의 광학 요소의 위치, 정렬 또는 둘 다를 조정하게 하는 명령 신호를 빔 성형 슬릿(113)에 전달한다.

[0069] 일부 실시예에서, 빔 성형 슬릿(113)은 다수의 독립적으로 작동되는 빔 성형 슬릿을 포함한다. 일 실시예에서, 빔 성형 슬릿(113)은 4개의 독립적으로 작동되는 빔 성형 슬릿을 포함한다. 이들 4개의 빔 성형 슬릿은 입사 빔의 일부를 효과적으로 차단하고, 박스 형태의 조명 단면을 갖는 조명 빔(114)을 발생시킨다.

[0070] 빔 성형 슬릿(113)의 슬릿은 산란을 최소화하고 입사 방사선을 효과적으로 차단하는 재료로 구성된다. 예시적인 재료는 게르마늄, 갈륨 비소, 인듐 인화물 등과 같은 단결정 재료를 포함한다. 전형적으로, 슬릿 재료는 구조적 경계를 가로지르는 산란을 최소화하기 위해 절단되기보다는 결정학적 방향을 따라 쪼개진다(cleaved). 또한, 슬릿은 들어오는 방사선과 슬릿 재료의 내부 구조 사이의 상호 작용이 최소량의 산란을 생성하도록 들어오는 빔에 대해 배향된다. 고밀도 재료(예컨대, 텅스텐)로 만들어진 각 슬릿 홀더에 크리스탈이 부착되어 슬릿의 한쪽 면에서 x-선 빔을 완전히 차단한다.

[0071] 일부 실시예에서, SXR 산란계측 시스템의 집속 광학계는 적어도 5의 축소(demagnification)(즉, 0.2 이하의 확대 계수)로 측정 중인 시편 위로 조명 소스의 이미지를 투영한다. 일부 실시예에서, 본원에서 설명한 SXR 산란계측 시스템은 20 마이크로미터 이하(즉, 소스 크기가 20 마이크로미터 이하)의 측면 치수를 특징으로 하는 소스 영역을 갖는 SXR 조명 소스를 이용한다. 일부 실시예에서, 4 마이크로미터 이하의 입사 조명 스폿 크기로 시편 위에 조명을 투사하기 위해 적어도 5의 축소 계수(즉, 소스 크기보다 5배 더 작은 웨이퍼 위에 소스의 이미지를 투영)를 갖는 집속 광학계가 이용된다.

[0072] 일부 실시예에서, 조명 소스(110)는 10 마이크로미터 이하의 소스 크기를 갖는 LPP 광원이고, 집속 광학계(111)는 대략 10의 축소 계수를 갖는다. 이것은 SXR 산란계측 톨이 1-2 마이크로미터의 치수를 갖는 계측 타겟에 조명 광을 집속할 수 있도록 한다. 1-2 마이크로미터 크기의 타겟을 측정하는 능력은 특수 계측 타겟에 맡겨진 웨이퍼 영역을 줄인다. 또한, 1-2 마이크로미터 크기의 타겟을 측정하는 능력은 특수 계측 타겟이 아닌 디바이스 구조체의 직접 측정을 가능하게 한다. 측정 디바이스 구조체는 타겟 대 디바이스 바이어스(target-to-device bias)를 직접 제거한다. 이는 측정 품질을 크게 향상시킨다. 또한, 인-다이 타겟의 측정은 인-다이 내의 파라미터 변동의 특성화를 가능하게 한다. 관심 파라미터의 예로는 임계 치수, 오버레이 및 에지 배치 오차가 있다.

[0073] x-선 검출기(119)는 시편(101)로부터 산란된 x-선 방사선(118)을 수집하고, SXR 산란계측 측정 양식에 따라 입사 x-선 방사선에 민감한 시편(101)의 성질을 나타내는 출력 신호(135)를 발생시킨다. 일부 실시예에서, 산란된 x-선(118)은 x-선 검출기(119)에 의해 수집되는 한편, 시편 위치설정 시스템(140)은 시편(101)을 위치시키고 배향시켜 각도 분해 산란 x-선(angularly resolved scattered x-rays)을 생성한다.

[0074] 일부 실시예에서, SXR 산란계측 시스템은 높은 동적 범위(예를 들어,  $10^5$  초과)를 갖는 하나 이상의 광자 계수

검출기를 포함한다. 일부 실시예에서, 단일 광자 계수 검출기는 검출된 광자의 위치 및 수를 검출한다.

- [0075] 일부 실시예에서, x-선 검출기는 하나 이상의 x-선 광자 에너지를 분해하고, 시편의 성질을 나타내는 각각의 x-선 에너지 성분에 대한 신호를 생성한다. 일부 실시예에서, x-선 검출기(119)는 CCD 어레이, 마이크로채널 플레이트, 포토다이오드 어레이, 마이크로스트립 비례 계수기(microstrip proportional counter), 가스 충전 비례 계수기(gas filled proportional counter), 신틸레이터(scintillator), 또는 형광 재료 중 임의의 것을 포함한다.
- [0076] 이러한 방식으로, 검출기 내의 x-선 광자 상호작용은 픽셀 위치 및 카운트 개수(number of counts) 외에도 에너지에 의해 구별된다. 일부 실시예에서, x-선 광자 상호작용은 x-선 광자 상호작용의 에너지를 미리 결정된 상한 임계값 및 미리 결정된 하한 임계값과 비교함으로써 구별된다. 일 실시예에서, 이 정보는 추가 처리 및 저장을 위해 출력 신호(135)를 통해 컴퓨팅 시스템(130)에 전달된다.
- [0077] 다중 조명 파장을 갖는 주기적 타겟의 동시 조명의 결과 생기는 회절 패턴은 회절의 각도 분산(angular dispersion)으로 인해 검출기 평면에서 분리된다. 이들 실시예에서, 적산 검출기(integrating detectors)가 이용된다. 회절 패턴은 영역 검출기, 예를 들어 진공 호환 후면 CCD(vacuum-compatible backside CCD) 또는 하이브리드 픽셀 어레이 검출기를 이용하여 측정된다. 각도 샘플링은 브래그 피크 통합에 최적화된다. 픽셀 레벨 모델 피팅이 이용되면, 신호 정보 내용에 대해 각도 샘플링이 최적화된다. 샘플링 속도는 0차 신호의 포화를 방지하기 위해 선택된다.
- [0078] 일부 예에서, 측정된 파라미터 값의 정밀도와 정확도를 높이기 위해 더 넓은 범위의 파장, 입사각 및 방위각에서 측정을 수행하는 것이 바람직하다. 이 접근 방식은 분석에 이용가능한 데이터 세트의 수와 다양성을 확장하여 파라미터 간의 상관 관계를 줄인다.
- [0079] 웨이퍼 표면 법선에 대한 x-선 입사각 및 조명 파장의 함수로서 회절된 방사선의 강도 측정값이 수집된다. 다중 회절 차수에 포함된 정보는 전형적으로, 고려 중인 각 모델 파라미터 사이에서 고유하다. 따라서, x-선 산란은 작은 오차와 감소된 파라미터 상관관계를 가진 관심 파라미터 값에 대한 추정 결과를 산출한다.
- [0080] 일부 실시예에서, 계측 툴(100)은, 웨이퍼(101)를 고정적으로 지지하고 시편 위치설정 시스템(140)에 커플링되는 웨이퍼 척(103)을 포함한다. 시편 위치 설정 시스템(140)은 조명 빔(114)에 대해 6 자유도로 시편(101)을 능동적으로 위치 설정하도록 구성된다. 일 예에서, 컴퓨팅 시스템(130)은 시편(101)의 원하는 위치를 나타내는 명령 신호(미도시)를 시편 위치설정 시스템(140)에 전달한다. 이에 응답하여, 시편 위치설정 시스템(140)은 시편(101)의 원하는 위치설정을 달성하기 위해 시편 위치설정 시스템(140)의 다양한 액추에이터에 대해 명령 신호를 발생시킨다.
- [0081] 추가 양태에서, 산란광의 하나 이상의 회절 차수에 기초하여 시편의 성질(예를 들어, 구조적 파라미터 값)을 결정하기 위해 SXR 산란계측 시스템이 이용된다. 도 3에 도시된 바와 같이, 계측 툴(100)은 검출기(119)에 의해 발생된 신호(135)를 취득하고 취득된 신호에 적어도 부분적으로 기초하여 시편의 성질을 결정하기 위해 이용되는 컴퓨팅 시스템(130)을 포함한다.
- [0082] SXR 산란계측은 조명 파장이 측정된 구조체의 주기보다 짧기 때문에 설계 규칙 타겟에 대한 오버레이 측정을 가능하게 한다. 이는 오버레이가 설계 규칙 타겟보다 크게 측정되는 기존 기술에 비해 상당한 이점을 제공한다. SXR 파장을 이용하면 공정 설계 규칙에서 타겟 설계, 즉, "비제로 오프셋"이 없는 것을 허용한다. 비제로 오프셋의 감소는 감소된 패턴 배치 오차 및 디바이스 피치에서 패턴닝에 최적화된 공정의 결과이다. 패턴 배치 오차는 패턴 피치에 의해 구동되는 제조 공정에 따라 다르다. 패턴 피치가 감소함에 따라 패턴 배치 오차도 감소한다. 또한, 제조 공정이 디바이스 피치에 최적화됨에 따라, 디바이스 특성 패턴(예컨대, 디바이스 유사 패턴)의 국부 비대칭 변형이 감소된다.
- [0083] SXR 측정을 위한 오버레이 계측 타겟은 1차원의 주기적 어레이 또는 2차원의 주기적 어레이를 포함할 수 있다. 1차원 타겟은 입사면을 따라 큰 각도 발산을 나타내어 플럭스와 처리량을 증가시킨다. 2차원 타겟의 경우, 회절의 각도 분산은 2개의 평면 내 축에 대해 동일하지 않다. 따라서, 입사면에 평행한 샘플 방향에 대해, 추가 초주기(additional, super-period)가 부과될 수 있다. 이러한 예에서, 웨이퍼를 회전시키고 동일한 타겟에 대한 단일 서브시스템에 의해 순차적인 직교 측정을 수행하는 것이 유리할 수 있다.
- [0084] 일 양태에서, SXR 산란계측 신호는 비제로 회절 차수에 기초한 오버레이 오차를 해결하기 위해 이용된다. SXR 방사선의 상대적으로 짧은 파장으로 인해, 비제로 회절 차수, 특히  $\pm 1$  회절 차수는 오버레이 오차에 대해 상

대적으로 높은 감도를 제공한다.

- [0085] 일반적으로, 타겟 설계 및 관련 측정 알고리즘은 0차 또는 1차 산란계측이 이용되는지 여부에 따라 다르다. 0차 산란계측의 경우, 계측 타겟의 각 측정 영역, 즉 셀은 파장, 입사각 및 방위각의 함수로서 단일 0차 신호를 산출한다. 그러나, 1차 산란계측의 경우, 계측 타겟의 각 측정 영역, 즉 셀은 파장, 입사각 및 방위각의 함수로서 2개의 신호, 즉 +1 회절 차수 신호 및 -1 회절 차수 신호를 산출한다. 따라서, 일부 예에서, 1차 산란계측을 기반으로 하여 관심 파라미터, 예를 들어 오버레이 또는 형상 파라미터를 분해하기 위해 충분한 신호 정보를 추출하는 데 더 적은 수의 셀이 요구된다. 이러한 예에서, 더 작은 계측 타겟이 이용될 수 있다. 효과적으로, 1차 산란계측은 비교적 높은 동공 균일성(pupil uniformity)을 필요로 한다. 동공 불균일성의 영향을 줄이기 위한 교정 방법론은 Mieher 등의 미국 특허 공개 번호 제2004/0169861호(KLA-Tencor Corporation에 양도)에서 제공되며, 그 내용은 전체가 참조로 본원에 함체된다.
- [0086] 추가 양태에서, 0차, 비제로 차수, 또는 이들의 임의의 조합의 SXR 산란계측 신호는 측정 중인 구조체를 특성화하는 형상 파라미터, 예를 들어 CD, H, SWA, 프로파일 파라미터 등의 값을 분해하기 위해 이용된다. 일부 실시예에서, 오버레이 및 형상 파라미터의 SXR 산란계측 측정은 동일한 계측 타겟으로부터 수집된 SXR 산란계측 측정결과로부터 동시에 수행된다. 이는 엔드 라인 단축, 선과 접촉 거리(line to contact distance) 등과 같은 EPE(Edge Placement Errors)의 측정을 가능하게 한다. 그 결과, SXR 산란계측은 오버레이 및 CD 측정이 상이한 타겟에서 수행되는 경우 발생할 수 있는 타겟 바이어스(target bias)로 인한 오차 없이 EPE 측정을 가능하게 한다. 또한, 동일한 계측 타겟으로부터 오버레이 및 CD 구조체 파라미터를 동시에 측정하면 측정 정확도와 처리량이 모두 향상된다.
- [0087] 일 예에서, 층들 사이의 에지 배치 오차는 본원에 기재된 바와 같은 오버레이의 측정에 기초하여, 그리고 다수의 상이한 입사각 및 다수의 상이한 방위각에서 측정된 각각의 x-선 회절 차수 내의 강도 측정에 기초한 형상 파라미터의 측정에 기초하여 추정된다. 에지 배치 오차(EPE)는 오버레이 및 형상 파라미터(예컨대, CD) 오차를 결합한다. 일 예에서, EPE는 CD 값(예를 들어, 도 8에 도시된 폭(W)) 및 오버레이 값(예를 들어, 도 8에 도시한 오버레이(D)) 사이의 차이이다. 따라서, EPE의 측정은 본원에서 설명한 계산적으로 효율적인 오버레이 측정을 이용하고 CD 파라미터 값을 추정하기 위해 동일한 강도 측정 데이터를 이용함으로써 간소화된다.
- [0088] 도 4는 능동 필드(401-404), 게이트(405-408), 및 컨택트(409-420)를 포함하는 디바이스 구조체(400)의 평면도를 도시한다. 도 4는 에지 게이트(407)와 컨택트(418) 사이의 에지 배치 거리(EPD<sub>1</sub>)를 도시한다. 도 4는 또한 게이트(408)와 컨택트(418) 사이의 에지 배치 거리(EPD<sub>2</sub>), 게이트(406)와 컨택트(414) 사이의 에지 배치 거리(EPD<sub>3</sub>)를 도시한다. 높은 디바이스 수율을 보장하려면 에지 배치 거리는 신중하게 제어되어야 한다. 이러한 에지 배치 거리와 관련된 에지 배치 오차가 너무 크면, 디바이스는 고장날 것이다. 도 4에 도시된 바와 같이, 오버레이 오차와 CD 오차 모두 EPE에 기여한다. 예를 들어, 컨택트와 관련된 층이 게이트와 관련된 층과 정렬되지 않으면 EPE가 발생한다. 유사하게, 컨택트 구조체와 관련된 CD가 공칭 치수에서 벗어나면 EPE가 발생한다. 예를 들어, 컨택트(413 및 416)는 너무 크다. 그 결과는 각 컨택트와 해당 게이트 구조 사이의 중첩 및 디바이스 고장이다. 또한, 측정된 각 구조체의 3차원 형상이 역할을 한다. 일부 예에서, 측벽 각도를 무시할 수 없다. 이러한 예 중 일부에서, 구조체는 단일 CD 치수가 아니라 상단 CD 치수 및 바닥 CD 치수를 특징으로 한다.
- [0089] EPE 측정에 관한 추가 세부사항은 Shchegrov 등의 미국 특허 공개 번호 제2016/0003609호에 기재되어 있으며, 이는 전체가 참고로 본원에 함체된다.
- [0090] 일부 실시예에서, 각각 반대 방향으로 공칭 오프셋(nominal offset)을 갖는 계측 타겟의 2개의 셀로부터의 SXR 산란계측 측정 신호는 오버레이 오차를 분해하기 위해 이용된다.
- [0091] 도 5a는 다른 격자 구조체(162A) 위에 적층된 격자 구조체(161A)를 갖는 셀(160A)을 도시한다. 격자 구조체(161A, 162A)는 동일한 피치를 갖지만, 격자 구조체(161A)는 한 방향의 공칭 오프셋(+OFFSET)과 오버레이 오차(OVL)의 합과 동일한 거리만큼 격자 구조체(162A)로부터 오프셋된다.
- [0092] 도 5b는 다른 격자 구조체(162B) 위에 적층된 격자 구조체(161B)를 갖는 셀(160B)을 도시한다. 격자 구조체(161B 및 162B)는 동일한 피치를 갖지만, 격자 구조체(161A)는 계측 타겟(160A)과 비교하여 반대 방향의 공칭 오프셋(-OFFSET)과 오버레이 오차(OVL)의 합과 동일한 거리만큼 격자 구조체(162A)로부터 오프셋된다. 명목상, 계측 타겟(160A, 160B)은, 바닥 격자 구조체에 대한 상단 격자 구조체의 오프셋 방향이 반대라는 점을 제외하고

는, 동일하다.

[0093] 측정 타겟과 관련된 오버레이 오차(OVL)의 값은 셀(160A)과 관련된 +1 회절 차수 및 -1 회절 차수 내에서 검출된 강도 간의 차이와 셀(160B)과 관련된 +1 회절 차수 및 -1 회절 차수 내에서 검출된 강도 간의 차이를 기반으로 한다. 일 예에서, 컴퓨팅 시스템(130)은 식 (1)에 의해 나타낸 바와 같이 차이 신호( $D_1$  및  $D_2$ )를 결정하는데,  $I_A^{+1}$ 은 셀(160A)에서 측정된 +1 차수의 강도이고,  $I_A^{-1}$ 은 셀(160A)에서 측정된 -1 차수의 강도이고,  $I_B^{+1}$ 은 셀(160B)에서 측정된 +1 차수의 강도이고,  $I_B^{-1}$ 은 셀(160B)에서 측정된 -1 차수의 강도이다.

[0094] 
$$D_1 = I_A^{+1} - I_A^{-1}$$

[0095] 
$$D_2 = I_B^{+1} - I_B^{-1} \quad (1)$$

[0096] 차등 신호 값과 실제 오프셋 사이의 선형 관계를 가정하면, 오버레이 오차는 식 (2)에 의해 나타낸 바와 같이 차등 신호로부터 직접 결정되며, 여기서 OFFSET은 상기한 바와 같은 공정 오프셋 거리의 크기이다.

[0097] 
$$\text{OverlayError} = \text{OFFSET} \left( \frac{D_1 + D_2}{D_1 - D_2} \right) \quad (2)$$

[0098] 일부 예에서, SXR 산란계측을 기반으로 하는 계측은 관심 있는 파라미터, 예컨대 오버레이 오차, 형상 파라미터 등을 결정하는 것과, 측정된 SXR 산란계측 데이터를 이용하여 미리 결정된 측정 모델의 역해에 의해 샘플을 특성화하는 것을 포함한다. 역해법(method of inverse solve)은 모델 기반 회귀, 단층 촬영(tomography), 머신러닝 또는 이들의 조합을 포함하지만 이에 제한되지 않는다. 이러한 방식으로, 타겟 파라미터는, 측정된 산란된 x-선 강도와 모델링된 결과 사이의 오차를 최소화하는 파라미터화된 측정 모델의 값에 대한 해를 구하는 것에 의해 추정된다.

[0099] 일부 실시예에서, 컴퓨팅 시스템(130)은 시편의 측정된 구조체의 구조적 모델(예를 들어, 기하학적 모델, 재료 모델, 또는 조합된 기하학적 및 재료 모델)을 발생시키고, 적어도 하나의 기하학적 파라미터를 포함하는 SXR 응답 모델을 상기 구조적 모델로부터 발생시키고, SXR 응답 모델로 SXR 측정 데이터의 피팅 분석을 수행함으로써 적어도 하나의 시편 파라미터 값을 분해하도록 구성된다. 분석 엔진은 시뮬레이션된 SXR 신호를 측정된 데이터와 비교하는데 이용되어 샘플의 전자 밀도와 같은 재료 성질뿐만 아니라 기하학적 성질을 결정할 수 있다. 도 3에 도시한 실시예에서, 컴퓨팅 시스템(130)은 본원에 기재된 바와 같은 모델 구축 및 분석 기능을 구현하도록 구성된 모델 구축 및 분석 엔진으로서 구성된다.

[0100] 도 6은 컴퓨팅 시스템(130)에 의해 구현되는 예시적인 모델 구축 및 분석 엔진(180)을 도시하는 도면이다. 도 6에 도시된 바와 같이, 모델 구축 및 분석 엔진(180)은 시편의 측정된 구조체의 구조적 모델(182)을 발생시키는 구조적 모델 구축 모듈(181)을 포함한다. 구조적 모델(182)은 SXR 응답 함수 구축 모듈(183)에 대한 입력으로서 수신된다. SXR 응답 함수 구축 모듈(183)은 구조적 모델(182)에 적어도 부분적으로 기초하여 SXR 응답 함수 모델(184)을 발생시킨다. 일부 예에서, SXR 응답 함수 모델(184)은 구조적 인자로도 알려진 x-선 폼 팩터에 기초하며,

[0101] 
$$F(\vec{q}) = \int \rho(\vec{r}) e^{-i\vec{q} \cdot \vec{r}} d\vec{r} \quad (3)$$

[0102] 여기서 F는 폼 팩터이고, q는 산란 벡터이며,  $\rho(r)$ 은 구면 좌표(spherical coordinates)에서 시편의 전자 밀도이다. x-선 산란 강도는 식 (4)에 의해 주어진다.

[0103] 
$$I(\vec{q}) = F^* F \quad (4)$$

[0104] SXR 응답 함수 모델(184)은 피팅 분석 모듈(185)에 대한 입력으로서 수신된다. 피팅 분석 모듈(185)은 모델링된 SXR 응답을 대응하는 측정 데이터(135)와 비교하여 시편의 기하학적 성질 및 재료 성질을 결정한다.

[0105] 일부 예에서, 실험 데이터에 대한 모델링된 데이터의 피팅은 카이-제곱 값(chi-squared value)을 최소화함으로써 달성된다. 예를 들어, SXR 측정의 경우, 카이-제곱 값은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\chi_{SXR}^2 = \frac{1}{N_{SXR}} \sum_j^{N_{SXR}} \frac{(S_j^{SXR \text{ model}}(v_1, \dots, v_L) - S_j^{SXR \text{ experiment}})^2}{\sigma_{SXR,j}^2} \quad (5)$$

여기에서,  $S_j^{SXR \text{ experiment}}$  는 "채널" j에서의 측정된 SXR 신호(135)이며, 여기서 인덱스 j는 회절 차수, 에너지, 각도 좌표 등과 같은 시스템 파라미터들의 세트를 나타낸다.  $S_j^{SXR \text{ model}}(v_1, \dots, v_L)$

는 구조체(타겟) 파라미터들의 세트  $v_1, \dots, v_L$ 에 대해 평가된, "채널" j에 대한 모델링된 SXR 신호  $S_j$ 이며, 여기서 이러한 파라미터는 기하학적 성질(CD, 측벽 각도, 오버레이 등) 및 재료 성질(전자 밀도 등)을 설명한다.  $\sigma_{SXR,j}$  는 j번째 채널과 관련된 불확실성이다.  $N_{SXR}$  는 x-선 계측에서의 채널들의 총수이다. L은 계측 타겟을 특성화하는 파라미터들의 개수이다.

식 (5)는 서로 다른 채널과 관련된 불확실성들이 상관되지 않는다고 가정한다. 상이한 채널과 관련된 불확실성이 상관되는 예에서, 불확실성 사이의 공분산(covariance)이 계산될 수 있다. 이 예에서, SXR 측정에 대한 카이-제곱 값은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\chi_{SXR}^2 = \frac{1}{N_{SXR}} \left( \vec{S}_j^{SXR \text{ model}}(v_1, \dots, v_M) - \vec{S}_j^{SXR \text{ experiment}} \right)^T V_{SXR}^{-1} \left( \vec{S}_j^{SXR \text{ model}}(v_1, \dots, v_M) - \vec{S}_j^{SXR \text{ experiment}} \right)$$

(6)

여기서,  $V_{SXR}$  는 SXR 채널 불확실성의 공분산 행렬이고, T는 전치행렬(transpose)을 나타낸다.

일부 예에서, 피팅 분석 모듈(185)은 SXR 응답 모델(184)을 이용하여 SXR 측정 데이터(135)에 대한 피팅 분석을 수행함으로써 적어도 하나의 시편 파라미터 값을 분해한다. 일부 예에서,  $\chi_{SXR}^2$  는 최적화되어 있다.

상기한 바와 같이, SXR 데이터의 피팅은 카이-제곱 값을 최소화함으로써 달성된다. 그러나, 일반적으로, SXR 데이터의 피팅은 다른 함수에 의해 달성될 수 있다.

SXR 계측 데이터의 피팅은 관심 있는 기하학적 및/또는 재료 파라미터에 대한 감도를 제공하는 임의 유형의 SXR 기술에 유리하다. 시편 파라미터는, 시편과의 SXR 빔 상호 작용을 설명하는 적절한 모델이 이용되는 한, 결정적(예컨대, CD, SWA 등) 또는 통계적(예컨대, 측벽 거칠기의 rms 높이, 거칠기 상관 길이(roughness correlation length) 등)일 수 있다.

일반적으로, 컴퓨팅 시스템(130)은 RTCD(Real Time Critical Dimensioning)를 이용하여 실시간으로 모델 파라미터에 액세스하도록 구성되거나, 시편(101)과 관련된 적어도 하나의 시편 파라미터 값을 결정하기 위해 미리 계산된 모델의 라이브러리에 액세스할 수 있다. 일반적으로, 시편의 할당된 CD 파라미터와 측정된 시편과 관련된 CD 파라미터 사이의 차이를 평가하기 위해 어떤 형태의 CD-엔진이 이용될 수 있다. 시편 파라미터 값을 계산하기 위한 예시적인 방법 및 시스템이 2010년 11월 2일자 KLA-Tencor Corp.에 등록된 미국 특허 번호 제 7,826,071호에 기재되어 있으며, 그 전체 내용은 본원에 참조로 함체된다.

일부 예에서, 모델 구축 및 분석 엔진(180)은 피드 사이드웨이 분석(feed sideways analysis), 피드 포워드 분석(feed forward analysis) 및 병렬 분석(parallel analysis)의 임의의 조합에 의해 측정된 파라미터의 정확도를 개선한다. 피드 사이드웨이 분석은 동일한 시편의 서로 다른 영역 상에서 여러 데이터 세트를 취하고 제1

데이터 세트로부터 결정되는 공통 파라미터를 분석을 위해 제2 데이터 세트 상으로 전달하는 것을 말한다. 피드 포워드 분석은 상이한 시편 상에서 데이터 세트를 취하고 공통 파라미터를 단계적 복사의 정확한 파라미터 피드 포워드 접근 방식(stepwise copy exact parameter feed forward approach)을 이용하여 후속 분석들에 피드 전달하는 것을 말한다. 병렬 분석은 피팅 중에 적어도 하나의 공통 파라미터가 커풀링되는, 복수의 데이터 세트에 비선형 피팅 방법론을 병렬 또는 동시 적용하는 것을 말한다.

[0117] 다중 툴 및 구조체 분석은 회귀(regression), 록업 테이블(즉, "라이브러리" 매칭) 또는 다수의 데이터 세트의 다른 피팅 절차에 기초한 피드 포워드, 피드 사이드웨이 또는 병렬 분석을 말한다. 다중 툴 및 구조체 분석을 위한 예시적인 방법 및 시스템은 2009년 1월 13일자로 KLA-Tencor Corp.에 등록된 미국 특허 번호 제7,478,019호에 기재되어 있으며, 그 전체 내용은 본원에 참조로 합체된다.

[0118] 또 다른 추가 양태에서, 하나 이상의 관심 파라미터의 값의 초기 추정치는 측정 타겟에 대한 입사 x-선 빔의 단일 배향에서 수행된 SXR 측정에 기초하여 결정된다. 초기 추정치는 여러 배향에서의 SXR 측정으로부터 수집된 측정 데이터를 이용하여 측정 모델의 회귀에 대한 관심 파라미터의 시작 값으로서 구현된다. 이러한 방식으로, 관심 파라미터에 대한 근접 추정치는 비교적 적은 양의 계산 노력으로 결정되며, 이 근접 추정치를 훨씬 더 큰 데이터 세트에 대한 회귀의 시작점으로서 구현함으로써, 관심 파라미터의 정제된 추정치가 더 적은 전체 계산 노력으로 얻어진다.

[0119] 일부 실시예에서, 측정 타겟 또는 인-다이 타겟과 관련된 오버레이 오차의 값은 트레이닝된 머신 러닝 기반 측정 모델에 기초하여 하나 이상의 비제로 회절 차수 내에서 검출된 강도로부터 직접 결정된다. 이러한 실시예에서, 트레이닝된 머신 러닝 기반 모델은 SXR 측정 데이터로부터 오버레이 오차를 직접 추출한다.

[0120] 일부 실시예에서, SXR 계측 시스템에 의해 측정된 타겟은 주기적이지 않지만, 트레이닝된 머신 러닝 기반 측정 모델은 SXR 측정으로부터 오버레이 오차를 추출할 수 있다.

[0121] 일부 실시예에서, 머신 러닝 기반 측정 모델은 오버레이 오차의 알려진 값을 갖는 실험 설계(Design Of Experiments; DOE) 타겟으로부터 수집된 SXR 측정 데이터에 기초하여 트레이닝된다. 일부 실시예에서, 타겟과 관련된 오버레이 오차는 e-빔 기반 계측 시스템, 주사 전자 현미경 등과 같이 신뢰할 수 있는 기준 계측 시스템에 의해 측정된다. 일부 실시예에서, DOE 타겟은 설계 규칙 계측 타겟이다. 일부 실시예에서, DOE 타겟은 인-다이 능동 디바이스 구조체이다.

[0122] 일부 예에서, 머신 러닝 기반 측정 모델은 신경망 모델, 지원 벡터 머신 모델 등이다. 추가 세부사항은 Shchegrov 등에게 허여되고 KLA-Tencor Corporation에 양도된 미국 특허 번호 제10,352,876호에 기재되어 있으며, 그 내용은 그 전체가 참조로 본원에 합체된다.

[0123] 일부 다른 실시예에서, 머신 러닝 기반 측정 모델은 DOE 타겟, 예를 들어 주기적 타겟으로부터 수집된 SXR 측정 데이터, 및 측정된 DOE 타겟에 근접한 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차의 알려진 값에 기초하여 트레이닝된다. 이러한 실시예에서, 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차는 e-빔 기반 계측 시스템, 주사 전자 현미경 등과 같이 신뢰할 수 있는 기준 계측 시스템에 의해 측정된다. 이러한 방식으로, 학습된 머신 러닝 기반 측정 모델은 근처의 설계 규칙 측정 타겟으로부터 수집된 SXR 산란계측 측정 데이터에 기초하여, 인-다이 능동 디바이스 구조체의 오버레이 오차를 추정한다.

[0124] 도 10은 능동 디바이스 영역(191) 및 능동 디바이스 영역을 둘러싸는 스크라이브 라인 영역(192)을 포함하는 반도체 다이(190)를 도시한다. 설계 규칙 타겟(193)과 같은 다수의 설계 규칙 계측 타겟이 스크라이브 라인 영역(192) 내에서 제조된다. 유사하게, 능동 디바이스 구조체(194)와 같은 다수의 능동 디바이스 구조체가 능동 디바이스 영역(191) 내에서 제조된다. 일부 실시예에서, 트레이닝된 머신 러닝 기반 측정 모델은 설계 규칙 타겟(193)의 SXR 산란계측 측정에 기초하여 능동 디바이스 구조체(194)와 관련된 오버레이 오차를 추정한다.

[0125] 머신 러닝 기반 측정 모델에 관한 추가 세부 사항은 Shchegrov 등의 미국 특허 공개 번호 제2016/0003609호에 기재되어 있으며, 이는 그 전체가 참조로 본원에 합체된다.

[0126] 일부 다른 실시예에서, 머신 러닝 기반 측정 모델은 실험 설계(DOE) 타겟으로부터 수집된 SXR 측정 데이터 및 SXR 측정 데이터에 기초하여 결정된 형상 파라미터의 값에 기초하여 트레이닝된다. 일부 예에서, SXR 측정 데이터는 전술한 바와 같이 형상 파라미터(예를 들어, CD, H, SWA, 프로파일 파라미터 등)의 값을 추정하기 위해 이용된다. SXR 측정 데이터와 함께 이러한 형상 파라미터 값 및 측정된 DOE 타겟에 매우 근접한 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차의 알려진 값이 머신 러닝 기반 측정 모델을 트레이닝하는 데

이용된다. 추가의 구조적 정보는 트레이닝된 모델의 정확도를 향상시킨다.

- [0127] 일부 실시예에서, SXR 산란계측 기반 오버레이 측정은 SXR 방사선으로 샘플을 조명하는 것과, 상기 샘플에 대한 복수의 입사각, 복수의 파장 또는 둘 모두에 대한 결과 회절 차수의 강도를 검출하는 것을 포함한다. 더욱이, 측정 타겟과 관련된 오버레이 오차는 복수의 측정 인스턴스 각각에서 하나 이상의 비제로 회절 차수 각각 내의 복수의 강도의 변조에 기초하여 결정된다.
- [0128] 이들 실시예에서, 계측 타겟의 SXR 산란계측 측정은 다수의 상이한 입사각 및 방위각에서 수행된다. 도 7은 계측 타겟(120)을 포함하는 웨이퍼(101)를 도시한다. x-선 조명 소스는 입사각(AOI) 및 방위각(Az)에서 x-선 방사선(114)의 빔으로 계측 타겟(120)을 조명한다. 입사 x-선 방사선 빔의 입사각 및 방위각은 시편(101)에 고정된 좌표 프레임  $\{^B X, ^B Y, ^B Z\}$ 에 대하여 정의된다. 도 7에 도시된 바와 같이, 계측 타겟(120)은  $^B Y$  방향으로 연장하고  $^B X$  방향으로 주기적인 격자 구조체를 포함한다. 입사각은  $^B Z$  축에 대하여  $^B X$ - $^B Z$  평면 위로의 입사 빔의 투사 각도로서 정의된다. 이러한 의미에서, 입사각의 변화는 웨이퍼(101)와 동일 평면 내의  $^B Y$  축을 중심으로 한 웨이퍼(101)의 회전으로 볼 수 있다. 유사하게, 방위각은  $^B X$  축에 대하여  $^B X$ - $^B Y$  평면 위로의 입사 빔의 투사 각도로서 정의된다. 이러한 의미에서, 방위각의 변화는 웨이퍼(101)에 수직인  $^B Z$  축을 중심으로 한 웨이퍼(101)의 회전으로 볼 수 있다.
- [0129] 도 3에 도시된 바와 같이, 계측 툴(100)은, SXR 산란계(scatterometer)에 대해 시편(101)을 정렬하고 넓은 범위의 면외 각도 배향(out of plane angular orientations)에 걸쳐 시편(101)을 배향하도록 구성된 시편 위치설정 시스템(140)을 포함한다. 다시 말해서, 시편 위치설정 시스템(140)은 시편(101)의 표면에 수직이고 면내에 정렬된 하나 이상의 회전 축을 중심으로 큰 각도 범위에 걸쳐 시편(101)을 회전시키도록 구성된다. 이러한 방식으로, 시편(101) 표면의 모든 위치는 시편(101)에 고정된 좌표 프레임  $\{^B X, ^B Y, ^B Z\}$ 의 축을 중심으로 한 회전 범위에 걸친 측정에 이용가능하다.
- [0130] 도 3에 도시한 실시예에서, 입사 x-선 방사선의 단일 빔이 도시되어 있다. 웨이퍼에 대한 단일 빔의 배향은 단일 공칭 입사각과 방위각에 의해 정의된다. 단일 조명 빔을 이용하는 실시예의 경우, 다수의 상이한 입사각 및 방위각과 관련된 x-선 회절 측정이 순차적으로 수행된다. 그러나, 일반적으로, 다수의 상이한 입사각 및 방위각과 관련된 x-선 회절 측정이 동시에 수행될 수도 있다. 일부 실시예에서, 입사각 및 방위각에서 이산적이거나 연속적인 복수 방향으로부터 계측 타겟이 동시에 조명되도록 하나 이상의 x-선 소스 및 하나 이상의 x-선 광학계 세트가 이용될 수 있다.
- [0131] 계측 타겟의 상이한 층에 있는 두 개 이상의 구조체를 수직으로 쌓으면 복수의 상이한 입사각과 복수의 상이한 방위각에서 측정이 이루어질 때 강력하고 독특한 방식으로 x-선 회절 신호에 영향을 준다. 따라서, 오버레이 및 형상 파라미터의 값은 측정된 강도에 기초하여 추정될 수 있다.
- [0132] 이들 실시예에서, 오버레이의 추정은 저주파수 형상 변조(frequency shape modulation)가 기저 함수의 세트 또는 비율에 의해 기술되고 고주파수 오버레이 변조가 오버레이를 나타내는 파라미터를 포함하는 아핀 순환 함수(affine-circular function)에 의해 기술되도록 공통 차수의 강도 변조의 파라미터화(parameterization)를 포함한다.
- [0133] 일 예에서, 파라미터화는 표준 오버레이 문제(canonical overlay problem)의 분석으로부터 유도된다. 도 8은 각각 주기성(P)을 갖는 라인(151 및 152)의 2개의 주기적 어레이를 포함하는 계층화된 계측 타겟(150)을 도시한다. 라인 어레이는 거리(S)만큼 수직으로 분리되고, 라인 어레이는 오버레이 거리(D)만큼 오프셋된다. 각 라인 어레이의 높이와 폭은 파라미터(H 및 W)로 각각 주어진다.
- [0134] 또한, 상단 라인의 전자 밀도는 파라미터  $\delta 0$ 으로 주어지며, 바닥 라인의 전자밀도는  $\delta 1$ 로 주어진다. 계측 타겟(150)은 파장  $\lambda$ 을 갖는 x-선 방사선 빔에 의해 조명된다. 입사 x-선 방사선 빔은 입사각  $\theta$  및 방위각  $\phi$ 으로 계측 타겟에 충돌하고, 여기서 광선의 투사가 격자의 주기성에 수직일 때  $\phi=0$ 이다. 이러한 격자의 경우, 파장 수를  $k_0=2\pi/\lambda$ 로 정의하고, 1D 주기적 방향에서의 격자 수는  $k_x=2\pi/P$ 로 정의하며, 여기서 m은 차수이다. 입사각은 웨이퍼에 수직인 축으로부터 측정된다.

[0135] 회절 강도를 분석하면 식 (7)에 나타난 바와 같이 각 차수의 강도의 근사치가 제공된다.

$$I = \left( \frac{k_0 WH}{P \cos \theta} \right)^2 \sin^2 \left( \frac{mk_x W}{2} \right) \sin^2 \left( \frac{mk_x H \tan \theta \cos \varphi}{2} \right) \left( \delta_0^2 + \delta_1^2 + 2\delta_0 \delta_1 \cos(mk_x (D + S \tan \theta \cos \varphi)) \right)$$

[0136]

[0137] (7)

[0138] 식 (7)은 입사각  $\theta$ 을 변경함으로써 또한 방위각  $\varphi$ 을 변경함으로써 차수 강도의 변조가 있다는 것을 보여준다. 달리 말하면, 입사각을 변경함으로써,  $^B X$ 와 정렬된 격자 주기 차수의  $^B Z$ 와 정렬된 방향으로의 투영으로부터 회절 차수의 변조를 기대할 수 있다. 또한, 방위각을 변경함으로써,  $^B X$ 와 정렬된 격자 주기 차수의  $^B Y$ 와 정렬된 방향으로의 투영으로부터 회절 차수의 변조를 기대할 수 있다. 또한, 입사각과 방위각의 변화를 조정하여 오버레이 신호를 강조할 수 있다. 예를 들어 방위각을 변경하면 스케일링 계수  $\cos(\varphi)$ 에 의한 입사각의 변화로 인해 형상 및 오버레이 변조를 늦출 수 있다. 마지막으로, 식 (7)은 또한, 형상 파라미터( $W$  및  $H$ )로 인한 차수 강도의 변조가 전형적으로 식 (7)의 마지막 항에 의해 설명된 오버레이 변조에 비해 낮은 공간 주파수의 것임을 나타낸다.

[0139] 형상으로 인한 상대적으로 낮은 공간 주파수 변조로 인해, 이 변조는 일차 또는 이차 함수와 같은 저차 다항식에 의해 모델링될 수 있다. 이격 거리( $S$ )와 오버레이( $D$ )로 인한 변조는 식 (7)에 나타난 코사인 항에 의해 나타낼 수 있다. 따라서, 각 차수에 대한 강도의 단순화된 모델은 각각 식 (8a) 및 (8b)에 의해 나타낸 것과 같은 덧셈 또는 곱셈 형식을 취한다.

$$I = \sum_{j=0}^N a_j \theta^j + b \cos(mk_x (D + S \tan \theta \cos \varphi))$$

[0140] (8a)

$$I = \left( \sum_{j=0}^N a_j \theta^j \right) (b \cos(mk_x (D + S \tan \theta \cos \varphi)))$$

[0141] (8b)

[0142] 식 (8a)의 첫 번째 항과 식 (8b)의 첫 번째 인자에 의해 정의된 형상 함수는, 형상에 대한 명시적 지식 없이 파라미터  $a_j$ 에 의해 가중치가 부여된 기저 함수  $\theta^j$ 의 선형 조합으로서 형상 변조를 모델링한다. 식 (8a) 및 (8b)에 나타난 바와 같이, 형상 변화를 설명하기 위해 단항식 기저(monomial basis)가 이용된다. 그러나, 일반적으로, 임의의 종류의 다항식, 유리수 또는 기저 세트가 이용될 수 있다.

[0143] 파라미터( $b$ )는 변조 깊이를 정의한다. 파라미터( $D$  및  $S$ )는 오버레이를 정의한다. 입사각, 방위각 또는 둘 다를 변경함으로써, 임의의 차수에 대한 결과 데이터가 임의의 적절한 곡선 피팅 루틴을 이용하여 파라미터( $a_j$ ,  $b$ ,  $D$  및  $S$ )에 피팅될 수 있다. 오버레이는 파라미터( $D$ )에 대한 피팅에 의해 주어진다.

[0144] 상기한 오버레이 측정을 위한 단순화된 모델은 입사각 및 방위각의 변화에 기초한 회절 차수의 강도 변동을 모델링하는 현상학적 접근을 나타낸다. 일반적으로, 모델은 다른 파형 및 비-다항식 기저 함수를 기반으로 할 수 있다.

[0145] 측정된 강도 신호를 현상학적인 단함수에 피팅함으로써, 다중 층과 관련된 오버레이 오프셋이 계산 효율적인 방식으로 추정될 수 있다. 그 결과, 상대적으로 낮은 계산 비용으로 그리고 외부 기준 계측 없이 측정이 수행되고, 따라서 SEM, 광학 계측 또는 기타 제안된 x-선 계측 기술을 기반으로 하는 현재 방법의 한계를 극복할 수 있다.

[0146] 도 9는 도 8에 도시된 계측 타겟(150)에 대한 피팅 결과의 시뮬레이션을 나타내는 플롯(170)을 도시한다. 플롯라인(171)은 각도 범위에 대한 -2 회절 차수의 정규화된 강도의 시뮬레이션을 나타낸다. 플롯라인(172)은 동일한 각도 범위에 대한 +2 회절 차수의 정규화된 강도의 시뮬레이션을 나타낸다. 플롯라인(173)은 식 (8)을 참

조하여 설명한 유형의 모델에 의한 시뮬레이션된 회절 강도의 피팅 결과를 나타낸다. 도 9에 도시된 바와 같이, 식 (8)을 참조하여 설명한 단순화된 모델은 시뮬레이션된 강도 값에 가까운 피팅을 제공한다.

- [0147] 식 (8)에 의해 나타낸 바와 같이, 오버레이 변조는 회절 차수의 우 함수(even function)이다. 따라서, 양의 차수 및 음의 차수로부터의 데이터는 평균화될 수 있고 또는 함께 피팅될 수 있다. 또한, 여러 차수가 함께 피팅될 수 있다. 일부 예에서, 각도 공간의 상이한 범위가 각각의 상이한 회절 차수에 대해 이용될 수 있다. 추가 세부사항은 Hench 등의 WIPO 공개 번호 W02016176502A1(KLA-Tencor Corporation에 양도)에 기재되어 있고, 그 내용은 그 전체가 참조로 본원에 합체된다.
- [0148] 일부 실시예에서, 실제 디바이스 타겟은 비주기적이다. 오버레이 측정을 기준 측정으로 교정함으로써, SXR 산란계측 기법을 적용하여 충분한 주기성을 가진 설계 규칙 타겟의 측정에 기초하여 비주기적 구조체의 오버레이를 추정할 수 있다. 이것은 측정 타겟이 주기적이거나 거의 주기적인 것을 필요로 하는 산란계측 측정의 한계를 효과적으로 극복한다.
- [0149] 일부 실시예에서, 교정된 SXR 측정은 현상 후 검사(ADI) 공정 모니터링의 일부로서 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차를 추정하기 위해 이용된다. 일부 실시예에서, 인-다이 능동 디바이스 구조체는 비주기적 로직 디바이스이다.
- [0150] 일부 실시예에서, 단일 오버레이 오차 교정 값(calibration value)이 SXR 산란계측 기반 오버레이 측정을 교정하는 데 이용된다. SEM과 같은 기준 계측 시스템이 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차를 측정하는 데 이용된다. 또한, SXR 산란계측 시스템, 예를 들어 SXR 산란계측 툴(100)은 근처의 설계 규칙 계측 타겟을 측정하는 데 이용된다. SXR 산란계측 시스템에 의해 측정된 오버레이 오차와 기준 계측 시스템에 의해 측정된 오버레이 오차의 차이가 오버레이 오차 교정 값이다. 설계 규칙 계측 타겟의 후속 오버레이 측정은 근처의 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차를 추정하기 위해 오버레이 오차 교정 값에 의해 조정된다. 보다 구체적으로, 오버레이 오차 교정 값은 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차를 추정하기 위해, SXR 산란계에 의해 측정된 오버레이 오차에 추가된다. 이 접근 방식의 한계는, 기준 측정이 SXR 측정과 다른 타겟에서 수행된다는 사실로 인해 유발된 타겟 오차를 보상하지 않는다는 것이다.
- [0151] 일 예에서, 이 제한은 SEM 교정치를 인-다이 능동 디바이스 구조체의 SXR 측정치에 역방향으로 공급함으로써 극복된다. 이 접근 방식은 SXR 측정이 측정된 타겟에 물리적 변화를 가하지 않는 경우에 가능하다.
- [0152] 다른 예에서, SXR 산란계측 기반 오버레이 측정을 교정하기 위해 두 개의 오버레이 오차 교정 값이 이용된다. 이들 실시예에서, 기준 계측 시스템, 예를 들어, SEM은 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차를 측정하고 근처의 설계 규칙 계측 타겟과 관련된 오버레이 오차를 측정하기 위해 이용된다. 또한, SXR 산란계측 시스템, 예를 들어 SXR 산란계측 툴(100)은 근처의 설계 규칙 계측 타겟과 관련된 오버레이 오차를 측정하기 위해 이용된다. 기준 계측 시스템에 의해 측정된 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차와 부근의 설계 규칙 계측 타겟과 관련된 오버레이 오차 사이의 차이는 제1 오버레이 오차 교정 값이다. 기준 계측 시스템에 의해 측정된 설계 규칙 타겟과 관련된 오버레이 오차와 SXR 산란계측 시스템에 의해 측정된 설계 규칙 타겟과 관련된 오버레이 오차 사이의 차이는 제2 오버레이 오차 교정 값이다. 설계 규칙 계측 타겟의 후속 오버레이 측정은, 부근의 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차를 추정하기 위해 제1 및 제2 오버레이 오차 교정 값 모두에 의해 조정된다. 보다 구체적으로, 제1 및 제2 오버레이 오차 교정 값은, 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차를 추정하기 위해 SXR 산란계에 의해 측정된 오버레이 오차에 추가된다.
- [0153] e-빔 툴에 의해 수행되는 기준 측정은 하나 이상의 하부 층을 이미지화하기 위해 고전압, 예를 들어 10kV 이상에서 수행될 수 있다. 일반적으로, e-빔 툴의 착지 에너지(landing energy)는 이미징 성능을 최대화하도록 조정될 수 있다.
- [0154] 본원에 설명한 SXR 산란계측 툴은 반도체 제조에 관한 다양한 유형의 측정을 수행할 수 있다. 예를 들어, SXR 산란계측 툴은 임계 치수, 오버레이, 측벽 각도, 막 두께, 공정 관련 파라미터(예컨대, 초점 및/또는 선량) 등과 같은 하나 이상의 타겟의 특성을 측정하는 데 이용될 수 있다. 측정 타겟은 메모리 다이 내의 격자와 같이 주기적인 관심 영역을 포함할 수 있다. 측정 타겟은 다중 층을 포함할 수 있으며, 하나 이상의 층의 두께는 SXR 산란계측 툴에 의해 측정될 수 있다. 측정 타겟은 스크라이브 라인 내에 위치하거나 다이 자체 내에 위치할 수 있다. 일부 실시예에서, 복수의 타겟은 미국 특허 번호 제7,478,019호에 기술된 바와 같은 하나 이상의 계측 툴에 의해 동시에 또는 순차적으로 측정되며, 상기 특허 내용은 그 전체가 참조로 본원에 합체된다. 이러한 측

정보로부터의 데이터는 결합되어 반도체 제조 공정에서, 예를 들어 공정(예컨대, 리소그래피, 에칭)에 대한 피드-포워드, 피드-백워드 및 피드-사이드웨이 보정에 이용될 수 있다.

- [0155] 관심 파라미터의 측정에는 일반적으로 여러 알고리즘이 포함된다. 일부 실시예에서, 입사 빔과 샘플의 상호 작용은 전자기 솔버(electro-magnetic solver)를 이용하여 모델링되고, RCWA, FEM, 모멘트 방법, 표면 적분 방법, 체적 적분 방법, FDTD, 본 근사(Born approximation; BA), 왜곡파(distorted-wave) BA(DWBA) 및 기타와 같은 알고리즘을 이용한다. 모델 기반 측정의 경우, 관심 타겟은 일반적으로 기하학적 엔진 또는 경우에 따라 공정 모델링 엔진 또는 이 둘의 조합을 이용하여 모델링된다. 기하학적 엔진은 예를 들어 KLA Corporation(Milpitas, California)로부터 입수할 수 있는 AcuShape 소프트웨어에서 구현된다.
- [0156] 수집된 데이터는 라이브러리, Fast-reduced-order model; 회귀; 신경망, 지원 벡터 머신(SVM)과 같은 머신 러닝 알고리즘; 예를 들어, PCA(주성분 분석), ICA(독립 성분 분석), LLE(로컬 선형 임베딩)와 같은 차원 감소 알고리즘; 푸리에 또는 웨이블릿(wavelet) 변환과 같은 희소 표현(sparse representation); 칼만 필터; 동일 또는 상이한 틀 유형으로부터의 매칭을 촉진하는 알고리즘, 및 기타를 포함하는 수 많은 데이터 피팅 및 최적화 기법 및 기술에 의해 분석될 수 있다. 수집된 데이터는 구조체에 대한 치수 및 재료 정보를 추출하기 위한 모델링, 최적화 및/또는 피팅을 포함하지 않는 알고리즘에 의해 분석될 수도 있다.
- [0157] 일부 실시예에서, 다중 층 오버레이 계측 타겟은, 2개의 층의 각 조합 사이의 분리 파라미터 세트가 구별되고 모든 층 조합 사이의 최소 분리 거리가 계측 타겟의 전체 높이에 대한 제약 조건에 따라 최대화되도록 설계된다.
- [0158] 일부 실시예에서, 다중 오버레이 계측 타겟은 하나의 층으로부터 발생하는 회절 차수가 다른 층의 상이한 회절 차수와 보강 간섭하도록 상이한 층에서 상이한 피치로 설계된다. 일 실시예에서, 제1 층에 위치한 주기적 격자 구조체는 2A와 동일한 피치를 가지며, 여기서 A는 임의의 양의 값 상수이다. 다른 층에 위치한 또 다른 주기적 구조체는 3A와 동일한 피치를 갖는다. 이 예에서, 제1 층의 제2 회절 차수는 제2 층의 제3 회절 차수와 보강 간섭한다. 따라서, 이러한 차수 쌍에서 검출된 강도 측정은 두 층 사이의 오버레이에 의해 지배된다. 반대로, 오버레이에서 보강 간섭을 받지 않는 상이한 차수 쌍에서 검출된 강도 측정은 형상 파라미터에 의해 지배된다. 따라서, 일부 실시예에서, 계측 오버레이 타겟은, 특정 격자 차수 쌍에서 오버레이에 대한 감도를 증가시키고 또한 형상 파라미터 값의 추정에 유용한 강도 데이터를 제공하도록 특정 격자 구조로 설계된다.
- [0159] 유사하게, 다중 오버레이 계측 타겟은 한 층에서 발생하는 회절 차수가 다른 층의 상이한 회절 차수와 보강 간섭하도록 상이한 층에서 상이한 피치 배향으로 설계된다. 일반적으로, 상이한 주기성(예를 들어, 상이한 격자 피치), 상이한 피치 배향, 또는 이들의 임의의 조합을 갖는 층들의 세트는, 각각 상이한 층과 관련된 산란 벡터들의 세트를 발생시킨다. 오버레이 계측 타겟은 산란 벡터들의 미리 결정된 서브세트가 정렬되도록 설계된다. 이러한 방식으로, 산란 벡터들의 미리 결정된 서브세트와 대응하는 층 간의 오버레이에 대한 감도가 향상된다.
- [0160] 일반적으로, 오버레이 계측 타겟은 한 방향에서는 주기성이고 다른 방향에서는 일정한 1D-주기적인 구조체, 및 두 방향으로 주기적인 2D 주기적 구조체, 또는 이들의 임의의 조합을 포함할 수 있다. 2D-주기적 타겟의 경우, 주기성의 두 방향은 서로 수직일 수도 있고 아닐 수도 있다. 또한, 각 구성 구조체의 피치는 동일하거나 상이할 수 있다.
- [0161] 본 개시 전체에 걸쳐 설명한 다양한 단계들은 단일 컴퓨터 시스템(130) 또는 대안적으로 다중 컴퓨터 시스템(130)에 의해 수행될 수 있음을 인식해야 한다. 더욱이, 시편 위치설정 시스템(140)과 같은 시스템(100)의 상이한 서브시스템은 본원에 설명한 단계의 적어도 일부를 수행하기에 적합한 컴퓨터 시스템을 포함할 수 있다. 따라서, 전술한 설명은 본 발명을 제한하는 것으로 해석되어서는 안되며 예시에 불과하다. 또한, 하나 이상의 컴퓨팅 시스템(130)은 본원에 설명된 방법 실시예 중 임의의 것의 임의의 다른 단계(들)를 수행하도록 구성될 수 있다.
- [0162] 또한, 컴퓨터 시스템(130)은 당업계에 공지된 임의의 방식으로 검출기(119) 및 조명 광학계(115)에 통신 가능하게 커플링될 수 있다. 예를 들어, 하나 이상의 컴퓨팅 시스템(130)은 각각 검출기(119) 및 조명 광학계(115)와 관련된 컴퓨팅 시스템에 커플링될 수 있다. 다른 예에서, 검출기(119) 및 조명 광학계(115) 중 임의의 것은 컴퓨터 시스템(130)에 커플링된 단일 컴퓨터 시스템에 의해 직접 제어될 수 있다.
- [0163] 컴퓨터 시스템(130)은 유선 및/또는 무선 부분을 포함할 수 있는 전송 매체에 의해 시스템의 서브시스템(예를 들어, 검출기(119) 및 조명 광학계(115) 등)으로부터 데이터 또는 정보를 수신 및/또는 취득하도록 구성될 수 있다. 이러한 방식으로, 전송 매체는 컴퓨터 시스템(130)과 시스템(100)의 다른 서브시스템 사이의 데이터 링

크의 역할을 할 수 있다.

- [0164] 계측 시스템(100)의 컴퓨터 시스템(130)은 유선 및/또는 무선 부분을 포함할 수 있는 전송 매체에 의해 다른 시스템으로부터 데이터 또는 정보(예를 들어, 측정 결과, 모델링 입력, 모델링 결과 등)를 수신 및/또는 취득하도록 구성될 수 있다. 이러한 방식으로, 전송 매체는 컴퓨터 시스템(130)과 다른 시스템(예를 들어, 메모리 온보드 계측 시스템(100), 외부 메모리, 또는 외부 시스템) 사이의 데이터 링크의 역할을 할 수 있다. 예를 들어, 컴퓨팅 시스템(130)은 데이터 링크를 통해 저장 매체(즉, 메모리(132 또는 190))로부터 측정 데이터(예를 들어, 신호(135))를 수신하도록 구성될 수 있다. 예를 들어, 검출기(119)에 의해 수집된 산란계측 데이터는 영구적 또는 반영구적 메모리 디바이스(예컨대, 메모리(132 또는 190))에 저장될 수 있다. 이와 관련하여, 측정 결과는 온보드 메모리 또는 외부 메모리 시스템으로부터 가져올 수 있다. 또한, 컴퓨터 시스템(130)은 전송 매체를 통해 다른 시스템에 데이터를 전송할 수 있다. 예를 들어, 컴퓨터 시스템(130)에 의해 결정된 오버레이 값(186)은 영구적 또는 반영구적 메모리 디바이스(예를 들어, 메모리(190))에 저장될 수 있다. 이와 관련하여, 측정 결과는 다른 시스템에 내보낼 수 있다.
- [0165] 컴퓨팅 시스템(130)은 개인용 컴퓨터 시스템, 메인프레임 컴퓨터 시스템, 워크스테이션, 이미지 컴퓨터, 병렬 프로세서, 또는 당업계에 공지된 임의의 다른 디바이스를 포함할 수 있지만 이에 제한되지 않는다. 일반적으로, "컴퓨팅 시스템"이라는 용어는 메모리 매체로부터 명령을 실행하는 하나 이상의 프로세서를 구비한 임의의 디바이스를 포괄하도록 광범위하게 정의될 수 있다.
- [0166] 본원에 설명된 것과 같은 방법을 구현하는 프로그램 명령(134)은 유선, 케이블 또는 무선 전송 링크와 같은 전송 매체를 통해 전송될 수 있다. 예컨대, 도 3에 도시된 바와 같이, 메모리(132)에 저장된 프로그램 명령은 버스(133)를 통해 프로세서(131)에 전송된다. 프로그램 명령(134)은 컴퓨터 판독가능 매체(예를 들어, 메모리(132))에 저장된다. 예시적인 컴퓨터 판독가능 매체는 판독 전용 메모리, 랜덤 액세스 메모리, 자기 또는 광 디스크, 또는 자기 테이프를 포함한다.
- [0167] 일부 실시예에서, 본원에 설명된 산란계측 분석은 제조 공정 툴의 일부로서 구현된다. 제조 공정 툴의 예는 리소그래피 노광 툴, 필름 적층 툴, 임플란트 툴 및 에칭 툴을 포함하지만 이에 국한되지 않는다. 이러한 방식으로, SXR 산란계측 분석 결과는 제조 공정을 제어하는 데 이용된다. 일 예에서, 하나 이상의 타겟으로부터 수집된 SXR 산란계측 측정 데이터는 제작 프로세스 툴에 전송된다. SXR 산란계측 측정 데이터는 본원에 설명한 것과 같이 분석되고, 그 결과는 제작 프로세스 툴의 동작을 조정하는 데 이용된다.
- [0168] 본원에 설명한 산란계측 측정은 다양한 반도체 구조체의 특성을 결정하는 데 이용될 수 있다. 예시적인 구조체는 FinFET, 나노와이어 또는 그래핀과 같은 저차원 구조체(low-dimensional structure), 10nm 이하 구조체(sub 10 nm structures), 리소그래피 구조체, 기판 관통 비아(through substrate vias; TSVs), DRAM, DRAM 4F2, FLASH, MRAM과 같은 메모리 구조체 및 고 종횡비 메모리 구조체를 포함하지만, 이에 제한되지 않는다. 예시적인 구조적 특성은 라인 에지 거칠기, 라인 폭 거칠기, 기공 크기, 기공 밀도, 측벽 각도, 프로파일, 임계 치수, 피치와 같은 기하학적 파라미터 및 전자 밀도, 조성, 결정립 구조(grain structure), 모폴로지(morphology), 응력, 변형 및 원소 Id(identification)와 같은 재료 파라미터를 포함하지만, 이에 제한되지 않는다.
- [0169] 도 11은 본 발명의 계측 시스템(100)에 의한 구현에 적합한 방법(200)을 예시한다. 일 양태에서, 방법(200)의 데이터 처리 블록은 컴퓨팅 시스템(130)의 하나 이상의 프로세서에 의해 실행되는 사전 프로그래밍된 알고리즘을 통해 수행될 수 있다는 것이 인식된다. 다음의 설명은 계측 시스템(100)의 맥락에서 제시되지만, 계측 시스템(100)의 특정 구조적 양태가 제한을 나타내지 않으며 단지 예시적인 것으로 해석되어야 한다는 것이 본원에서 인식된다.
- [0170] 블록(201)에서, 기판 상에 배치된 설계 규칙 타겟의 제1 인스턴스가 10 내지 5,000 전자볼트 범위의 에너지를 갖는 SXR(Soft X-Ray) 방사선 빔으로 조명된다. 설계 규칙 타겟은 다중 층 타겟이다.
- [0171] 블록(202)에서, 설계 규칙 타겟의 제1 인스턴스로부터 산란된 SXR 방사선 양의 +1/-1 회절 차수와 관련된 제1 복수의 강도가 SXR 방사선의 입사 빔에 응답하여 검출된다.
- [0172] 블록(203)에서, 설계 규칙 타겟의 제1 인스턴스와 관련된 오버레이 오차의 제1 값이 +1/-1 회절 차수 내에서 검출된 제1 복수의 강도에 기초하여 추정된다.
- [0173] 블록(204)에서, 제1 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차의 값이 주사 전자 현미경에 의한 제1 인-다이 능동 디바이스 구조체의 측정에 기초하여 추정된다. 설계 규칙 타겟의 제1 인스턴스 및 제1 인-다이

능동 디바이스 구조체는 동일한 제조 프로세스 규칙에 따라 제조된다.

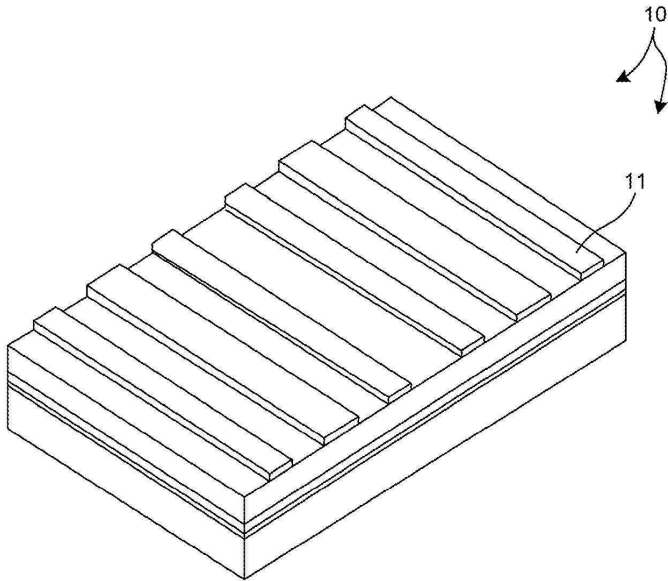
- [0174] 블록(205)에서, 오버레이 교정 값이 제1 인-다이 능동 디바이스 구조체와 관련된 오버레이 오차의 값 및 설계 규칙 타겟의 제1 인스턴스와 관련된 오버레이 오차의 제1 값에 기초하여 결정된다.
- [0175] 본 명세서에 기재된 바와 같이, 용어 "임계 치수"는 구조의 임의의 임계 치수(예를 들어, 하부 임계 치수, 중간 임계 치수, 상부 임계 치수, 측벽 각도, 격자 높이 등), 임의의 둘 이상의 구조체 사이의 임계 치수(예컨대, 두 구조체 사이의 거리) 및 둘 이상의 구조체 사이의 변위(예컨대, 오버레이하는 격자 구조체 사이의 오버레이 변위 등)를 포함한다. 구조체는 3차원 구조체, 패터닝된 구조체, 오버레이 구조체 등을 포함할 수 있다.
- [0176] 본 명세서에 기술된 바와 같이, 용어 "임계 치수 응용(critical dimension application)" 또는 "임계 치수 측정 응용"은 임의의 임계 치수 측정을 포함한다.
- [0177] 본원에 설명된 바와 같이, 용어 "측정 시스템"은 임계 치수 응용 및 오버레이 계층 응용을 포함하여 임의의 양태에서 시편을 특성화하기 위해 적어도 부분적으로 이용되는 임의의 시스템을 포함한다. 그러나 이러한 기술 용어는 본원에 설명된 용어 "측정 시스템"의 범위를 제한하지 않는다. 또한, 본원에 설명된 계층 시스템은 패터닝된 웨이퍼 및/또는 패터닝되지 않은 웨이퍼의 측정을 위해 구성될 수 있다. 계층 시스템은 LED 검사 툴, 에지 검사 툴, 후면 검사 툴, 매크로 검사 툴 또는 다중 모드 검사 툴(하나 이상의 플랫폼으로부터의 데이터를 동시에 포함), 및 측정 중의 구조체 또는 이미징으로부터 이득을 보는 임의의 다른 계층 또는 검사 툴로서 구성될 수 있다.
- [0178] 시편을 처리하는 데 이용될 수 있는 반도체 처리 시스템(예를 들어, 계층 시스템 또는 리소그래피 시스템)에 대한 다양한 실시예가 본원에서 설명된다. 용어 "시편"은 당업계에 공지된 수단에 의해 처리될 수 있는(예를 들어, 인쇄되거나 결함에 대해 검사될 수 있는) 웨이퍼, 레티클, 또는 임의의 다른 샘플을 지칭하기 위해 본원에서 이용된다.
- [0179] 본원에서 사용된 바와 같이, 용어 "웨이퍼"는 일반적으로 반도체 또는 비-반도체 재료로 형성된 기판을 지칭한다. 예로서 단결정 실리콘, 갈륨 비소 및 인듐 인화물이 포함되지만 이에 제한되지 않는다. 이러한 기판은 반도체 제조 설비에서 흔히 발견 및/또는 처리될 수 있다. 일부 경우에, 웨이퍼는 기판만(즉, 베어 웨이퍼)을 포함할 수 있다. 대안적으로, 웨이퍼는 기판 상에 형성된 상이한 재료들의 하나 이상의 층을 포함할 수 있다. 웨이퍼 상에 형성된 하나 이상의 층은 "패터닝되거나" 또는 "패터닝되지 않을" 수 있다. 예를 들어, 웨이퍼는 반복 가능한 패턴 피처를 갖는 복수의 다이를 포함할 수 있다.
- [0180] "레티클"은 레티클 제조 공정의 임의의 스테이지에서의 레티클, 또는 반도체 제조 설비에서 사용하기 위해 출시될 수 있거나 출시되지 않을 수 있는 완성된 레티클일 수 있다. 레티클 또는 "마스크"는 일반적으로, 실질적으로 불투명한 영역이 상부에 형성되어 어떤 패턴으로 구성되는, 실질적으로 투명한 기판으로서 정의된다. 기판은 예를 들어 비정질  $\text{SiO}_2$ 와 같은 유리 재료를 포함할 수 있다. 레티클은, 레티클 상의 패턴이 레지스트에 전사될 수 있도록 리소그래피 공정의 노광 단계 동안 레지스트로 덮인 웨이퍼 위에 배치될 수 있다.
- [0181] 웨이퍼 상에 형성된 하나 이상의 층은 패터닝되거나 패터닝되지 않을 수 있다. 예를 들어, 웨이퍼는 각각이 반복 가능한 패턴 피처를 갖는 복수의 다이를 포함할 수 있다. 이러한 재료 층의 형성 및 처리는 궁극적으로 완성된 디바이스를 초래할 수 있다. 많은 상이한 유형의 디바이스가 웨이퍼 상에 형성될 수 있고, 본원에서 사용되는 바와 같은 용어 웨이퍼는 당업계에 공지된 임의의 유형의 디바이스가 상부에 제조되는 웨이퍼를 포괄하도록 의도된다.
- [0182] 하나 이상의 예시적인 실시예에서, 설명한 기능은 하드웨어, 소프트웨어, 펌웨어, 또는 이들의 임의의 조합으로 구현될 수 있다. 소프트웨어로 구현되는 경우, 기능은 하나 이상의 명령어 또는 코드로서 컴퓨터 판독가능 매체 상에 저장되거나 컴퓨터 판독가능 매체를 통해 전송될 수 있다. 컴퓨터 판독가능 매체는 컴퓨터 프로그램을 한 장소에서 다른 장소로 전송하는 것을 용이하게 하는 임의의 매체를 포함하는 통신 매체 및 컴퓨터 저장 매체를 모두 포함한다. 저장 매체는 범용 또는 특수 목적 컴퓨터에 의해 액세스될 수 있는 임의의 이용가능한 매체일 수 있다. 제한이 아닌 예로서, 그러한 컴퓨터 판독가능 매체는 RAM, ROM, EEPROM, CD-ROM 또는 기타 광 디스크 스토리지, 자기 디스크 스토리지 또는 기타 자기 스토리지, 또는 원하는 프로그램 코드 수단을 명령어 또는 데이터 구조의 형태로 운반하거나 저장하는 데 이용될 수 있고 범용 또는 특수 목적 컴퓨터, 또는 범용 또는 특수 목적 프로세서에 의해 액세스될 수 있는 임의의 다른 매체를 포함할 수 있다. 또한, 임의의 접속이 컴퓨터 판독가능 매체라고 적절히 지칭된다. 예를 들어, 동축 케이블, 광섬유 케이블, 연선(twisted pair), DSL(digital subscriber line) 또는 적외선, 라디오 및 마이크로파와 같은 무선 기술을 이용하여 웹 사이트, 서

버 또는 기타 원격 소스로부터 소프트웨어가 전송되는 경우, 동축 케이블, 광섬유 케이블, 연선, DSL 또는 적외선, 라디오 및 마이크로파와 같은 무선 기술이 매체의 정의에 포함된다. 본원에서 사용되는 바와 같은, 디스크(disk) 및 디스크(disc)는 CD(compact disc), 레이저 디스크(laser disc), XRF 디스크(disc), DVD(digital versatile disc), 플로피 디스크(floppy disk) 및 블루레이 디스크(blue-ray disc)를 포함하고, 여기서 디스크(disk)가 보통 데이터를 자기적으로 재생하는 반면 디스크(disc)는 레이저를 이용하여 광학적으로 데이터를 재생한다. 위의 조합도 컴퓨터 판독가능 매체의 범위에 포함되어야 한다.

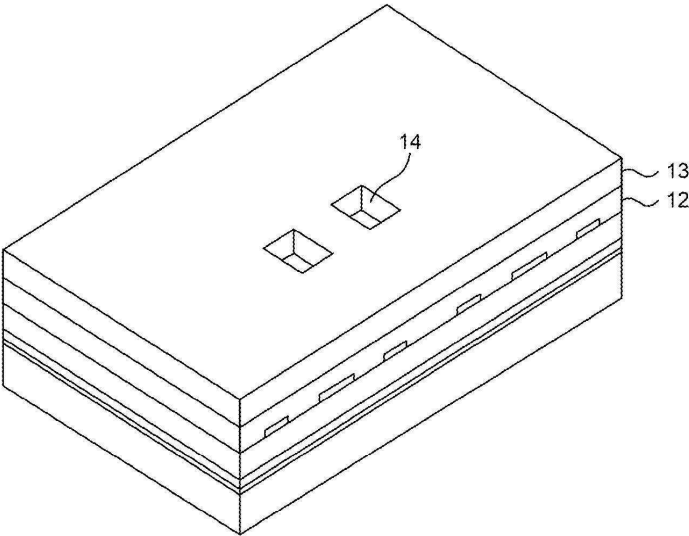
어떤 특정 실시예가 교육 목적으로 설명되었지만, 본 특허 문서의 교시는 일반적인 적용 가능성을 가지며 위에서 설명된 특정 실시예로 제한되지 않는다. 따라서, 설명된 실시예의 다양한 피처의 다양한 수정, 개조 및 조합이 청구범위에 기재된 본 발명의 범위를 벗어나지 않으면서 실시될 수 있다.

도면

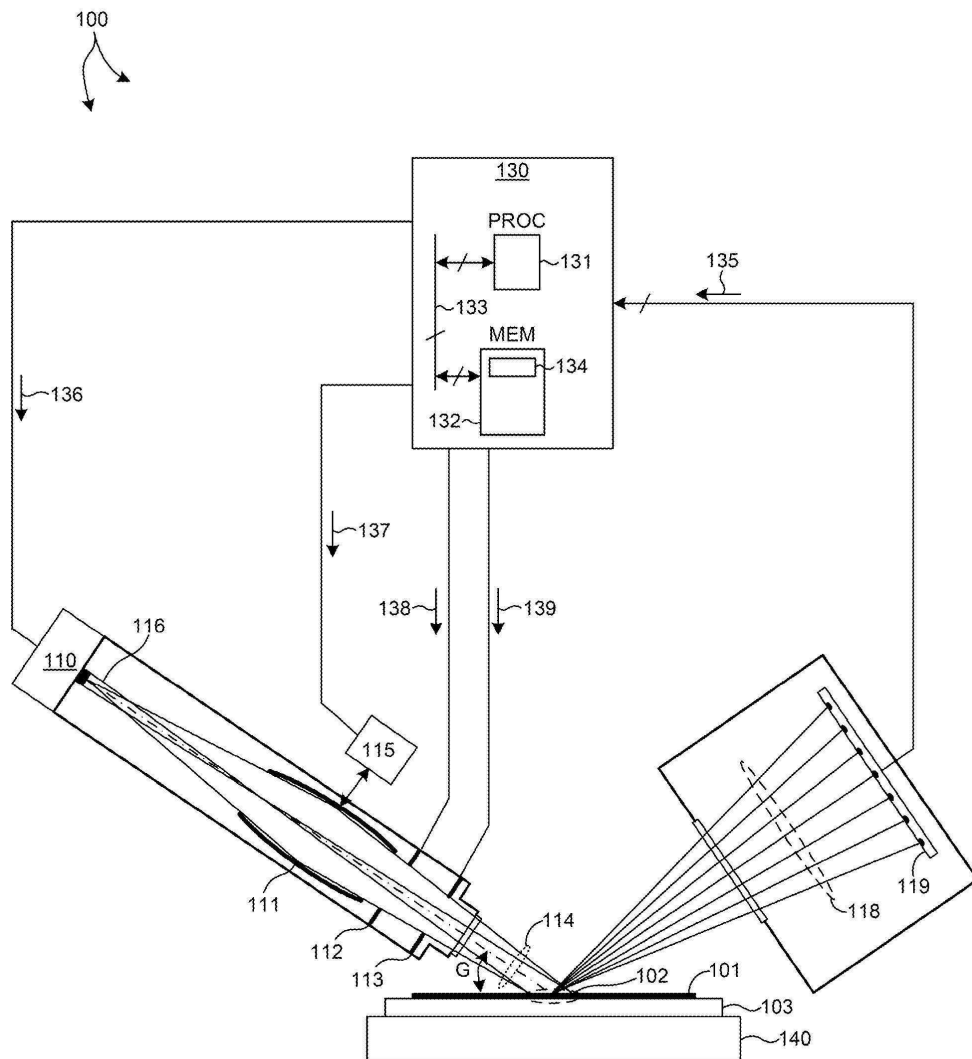
도면1



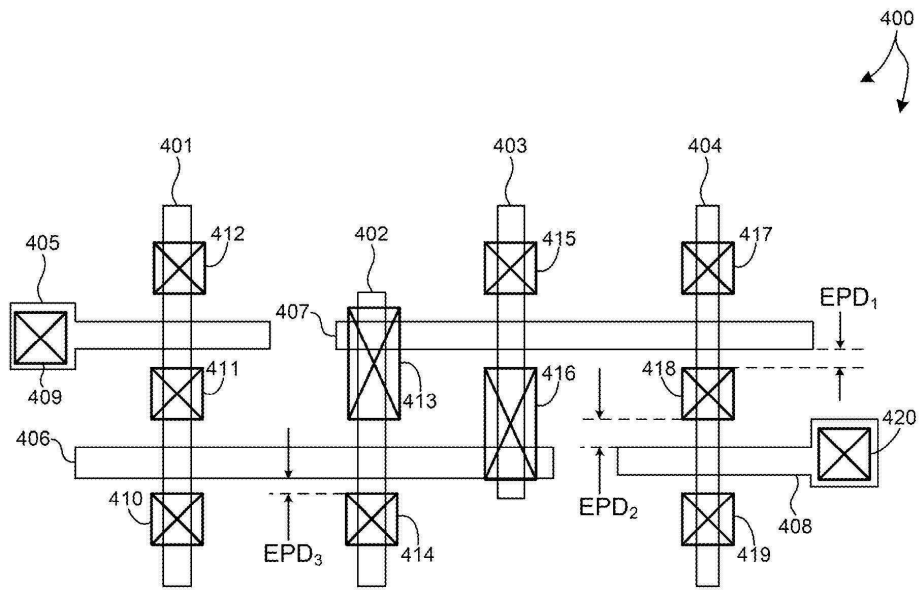
도면2



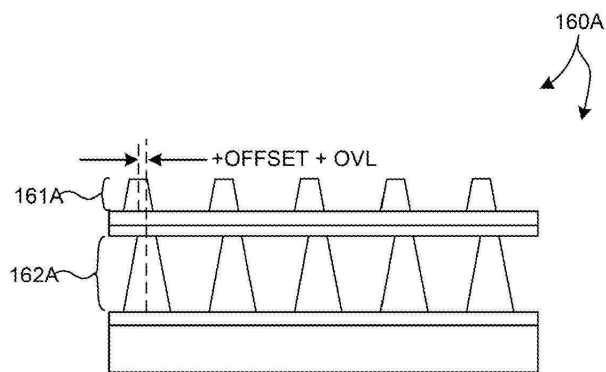
도면3



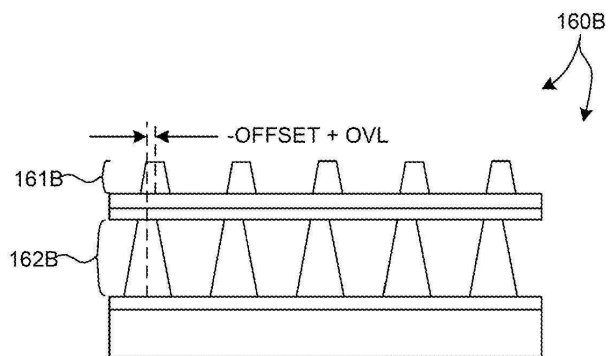
도면4



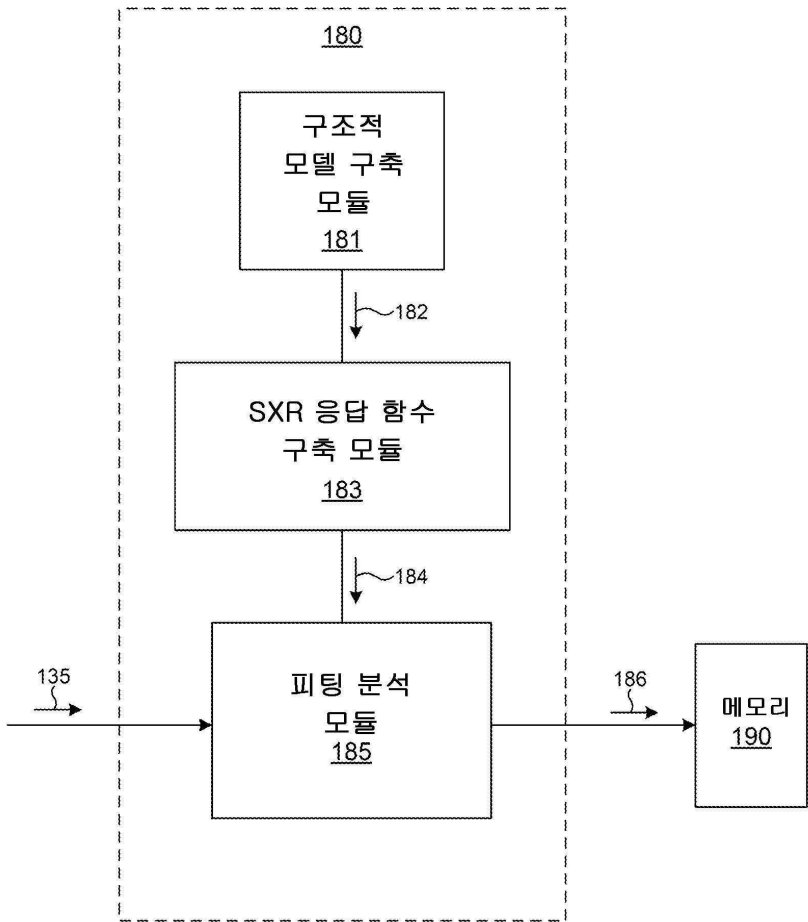
도면5a



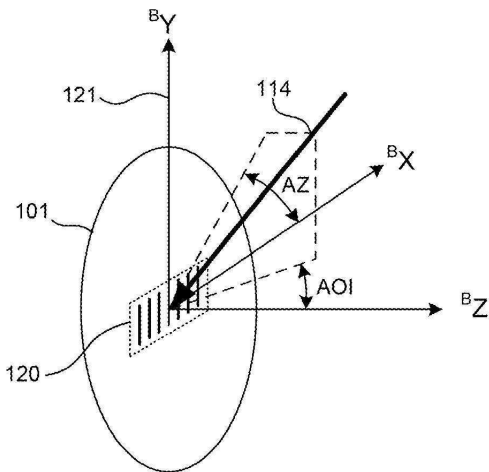
도면5b



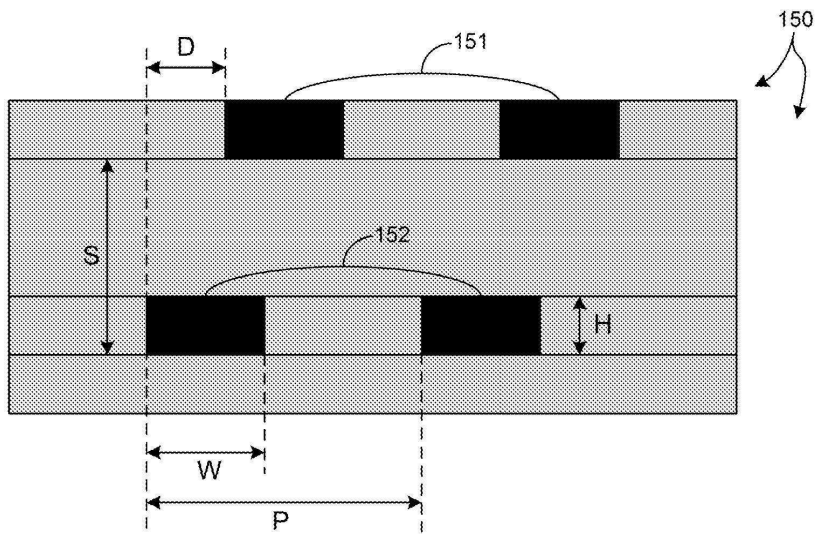
도면6



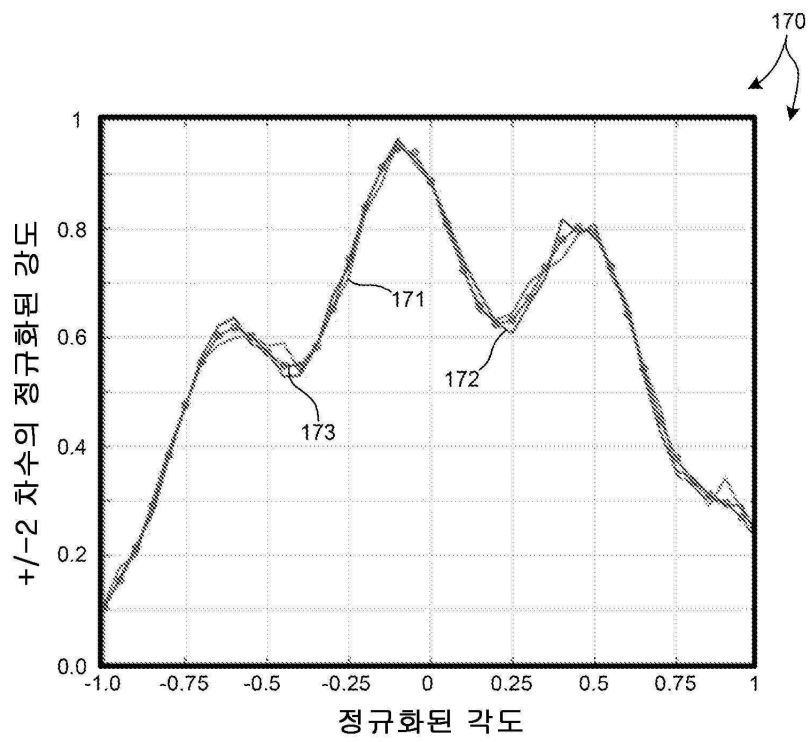
도면7



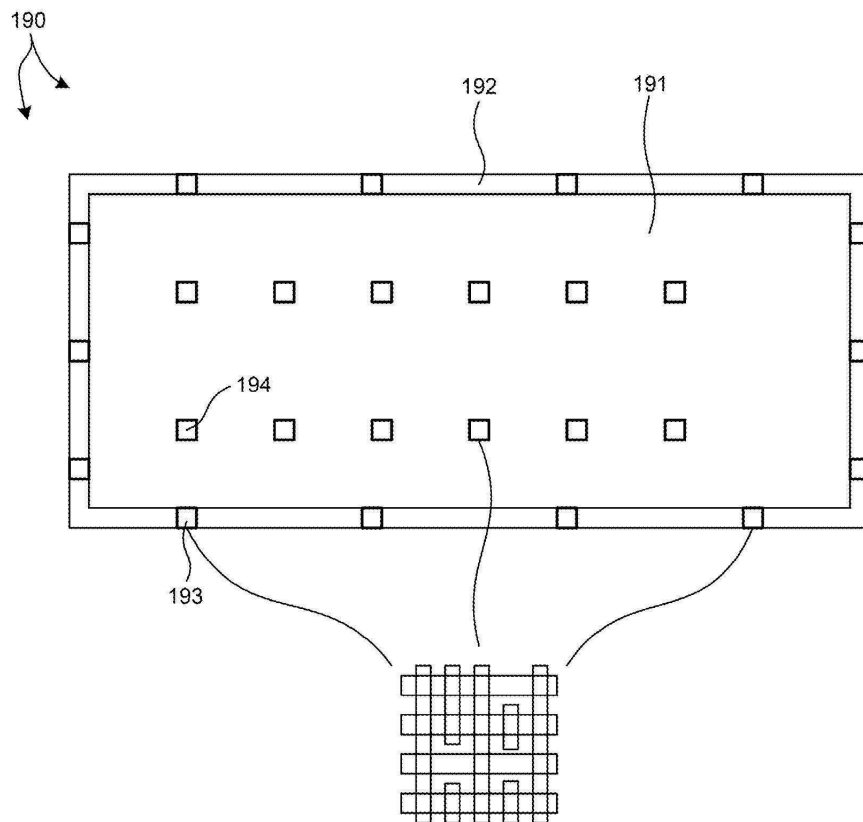
도면8



도면9



도면10



도면11

