

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
B23K 26/354 (2014.01) *B23K 26/00* (2014.01)
B23K 26/03 (2014.01) *G02B 21/00* (2022.01)
G06T 7/00 (2017.01) *H01L 21/268* (2006.01)
H01L 21/67 (2006.01) *B23K 101/40* (2006.01)

(52) CPC특허분류
B23K 26/354 (2018.08)
B23K 26/0006 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2024-7038472

(22) 출원일자(국제) 2023년03월23일
심사청구일자 없음

(85) 번역문제출일자 2024년11월19일

(86) 국제출원번호 PCT/US2023/016071

(87) 국제공개번호 WO 2023/215046
국제공개일자 2023년11월09일

(30) 우선권주장
63/337,714 2022년05월03일 미국(US)

(71) 출원인
비코 인스트루먼트 인코포레이티드
미국 11803 뉴욕주 플레인뷰 터미널 드라이브 1

(72) 발명자
리드, 매튜 얼 윌러스
미국 11803 뉴욕 플레인뷰 터미널 드라이브 1
웬, 자오후아
미국 11803 뉴욕 플레인뷰 터미널 드라이브 1

(74) 대리인
특허법인 무한

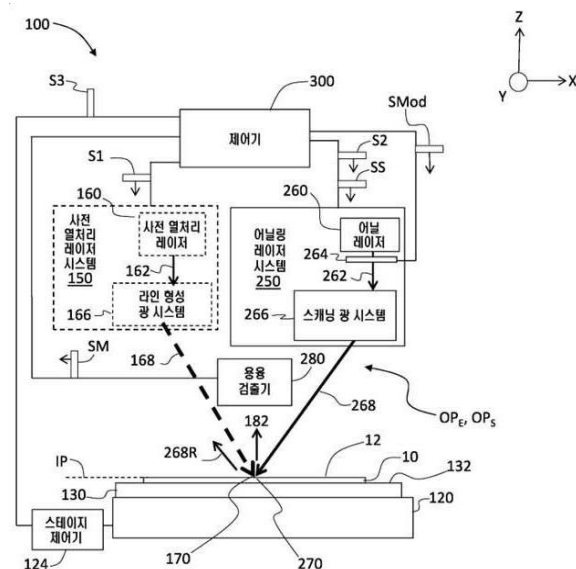
전체 청구항 수 : 총 25 항

(54) 발명의 명칭 스캐터 용융 검출 시스템들 및 이를 이용하는 방법들

(57) 요약

초단 드웰 시간들 및 스폿 크기를 가진 레이저 어닐링 시스템들에 의해 처리되는 웨이퍼에서 용융 개시를 검출하도록 구성된 고대역폭의 시간 및 공간 분해된 스캐터 상전이이 마이크로스코피 시스템들

대표도



(52) CPC특허분류

B23K 26/032 (2013.01)
G02B 21/0028 (2013.01)
G02B 21/0052 (2013.01)
G02B 21/008 (2013.01)
G06T 7/0004 (2013.01)
G06T 7/001 (2013.01)
H01L 21/268 (2013.01)
H01L 21/67253 (2013.01)
G06T 2207/10056 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

레이저 어닐링 공정 동안에 반도체 물질의 고체에서 액체로의 물질 상전이(phase transition)의 발생을 결정하는 방법으로서,

어닐링 레이저로부터의 어닐링 레이저 빔으로 상기 반도체 물질의 표면 상에 어닐링 영상을 형성하는 단계,

상기 어닐링 영상을 포함하는 상기 반도체 표면의 영역의 스캐터 영상을 형성하는 단계, 및

상기 스캐터 영상에서 수집된 광의 강도에 따라 상기 반도체 물질의 고체에서 액체로의 물질 상전이를 식별하는 단계를 포함하는 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 식별하는 단계는, 임계값을 만족시키거나 초과하는 상기 스캐터 영상에서의 강도의 검출을 포함하고,

상기 임계값은 상기 반도체 물질의 상기 고체에서 액체로의 상전이의 개시(onset)에 대응하는, 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 식별하는 단계는, 상기 어닐링 영상 내에 있고 상기 어닐링 영상의 영역 보다 더 작은 상기 스캐터 영상의 영역에서 상기 스캐터 영상에서의 강도의 검출을 포함하는, 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 식별하는 단계는, 아래 용융(below-melt) 기준 영상에 비한 상기 스캐터 영상에서 수집된 상기 광의 강도에 있어서의 불연속성을 식별하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 식별하는 단계는 상기 광의 강도 및 공정 파라미터 간의 비선형 스케일링 관계를 식별하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 공정 파라미터는 상기 어닐링 레이저의 전력 레벨 또는 상기 어닐링 레이저의 국부 전력 밀도인, 방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 레이저 어닐링 공정은, 상기 반도체 표면을 가로질러 상기 어닐링 영상의 순차적 스위프들(sweeps)을 수행하는 단계를 포함하고,

각각의 스위프는 어닐링 조명 라인을 형성하고,

스캐터 영상을 형성하는 단계는 적어도 하나의 어닐링 조명 라인의 영상을 형성하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 식별하는 단계는, 상기 어닐링 조명 라인을 따른 상기 반도체 물질의 물질 상전이의 정도를 결정하기 위해 상기 어닐링 조명 라인을 따라 광의 강도를 분석하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 9

제7항에 있어서,

상기 식별하는 단계는, 상기 고체에서 액체로의 상전이의 개시가 일어난 상기 어닐링 조명 라인의 부분 (proportion)을 결정하기 위해 상기 어닐링 조명 라인을 따라 광의 강도를 분석하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 10

제7항에 있어서,

상기 식별하는 단계는, 상기 어닐링 레이저의 용융 임계 전력 레벨 또는 통계적 전력 변동의 적어도 하나를 결정하기 위해 상기 어닐링 영상의 복수의 순차적 스위프에서 상기 어닐링 조명 라인을 따른 첫번째 위치에서 광의 강도를 분석하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 11

제1항에 있어서,

상기 레이저 어닐링 공정은 스위프 주파수(f_{sweep})에서 상기 반도체 표면을 가로질러 순차적 스위프들을 수행하는 단계를 포함하고,

상기 방법은, 프로브 광 소스로 펄스 주파수(f_{Probe})에서의 방사 펄스들로 상기 반도체 표면을 조사하는 단계를 더 포함하고,

$f_{\text{Probe}} < f_{\text{sweep}}$ 인, 방법.

청구항 12

제1항에 있어서,

상기 식별하는 단계는, 피팅 알고리즘들, 에지 검출 알고리즘들, 고유기저 분해들, 피드포워드 분류기들 또는 임계값을 초과하는 캡처된 영상 프레임에서의 임의의 강도의 검출의 하나 이상의 적용을 포함하는, 방법.

청구항 13

제1항에 있어서,

상기 식별하는 단계는, 하나 이상의 어닐링 공정 제어 파라미터들의 함수로서의 영상 강도의 통계적, 시계열 또는 기하학적 비선형 변동의 식별을 포함하는, 방법.

청구항 14

제13항에 있어서,

상기 하나 이상의 어닐링 공정 제어 파라미터들은 레이저 전력 또는 광 전력 밀도를 포함하는, 방법.

청구항 15

제1항에 있어서,

상기 식별하는 단계는,

상기 스캐터 영상을 대응하는 아래 용융(below-melt) 기준 영상과 비교하는 용융 검출 영상을 생성하는 단계를

포함하는, 방법.

청구항 16

제15항에 있어서,

용융이 상기 용융 검출 영상의 하나 이상의 영역들에서 일어났는지를 결정하기 위해 상기 용융 검출 영상의 값들을 임계값과 비교하는 단계를 더 포함하는 방법.

청구항 17

제15항에 있어서,

상기 공정 레이저 빔의 폭 보다 적은 폭을 가지는 스테이지 스캔 방향에서의 좁은 피크들을 식별하기 위해 상기 용융 검출 영상의 1차원 프로파일 분석을 적용하는 단계를 더 포함하는 방법.

청구항 18

제15항에 있어서,

상기 아래 용융 기준 영상은,

아래 용융 웨이퍼(wafer below melt)를 어닐링하는 단계,

스캐터 용융 검출기로 영상 프레임들을 캡처하는 단계,

어닐링 레이저 전력 레벨을 기록하는 단계,

상기 캡처된 영상 프레임들로부터 아래 용융 기준 영상을 생성하는 단계,

복수의 아래 용융 1차원 스테이지 스캔 방향 강도 프로파일들을 생성하기 위해 상기 아래 용융 기준 영상을 처리하는 단계,

상기 아래 용융 기준 영상의 관심영역(ROI_{ref})을 식별하는 단계, 및

평균 1차원 스테이지 스캔 방향 강도 프로파일을 생성하는 단계를 포함하는 단계들을 수행함으로써 획득된, 방법.

청구항 19

제1항에 있어서,

상기 식별하는 단계는,

상기 영상 프레임들의 관심영역(ROI_{ref}) 내의 픽셀 값들의 통계적 변동을 계산하는 단계 - ROI_{ref} 는 어닐링 레이저 영상이 상기 웨이퍼 상에서 형성된 영상의 영역임 -, 및

상기 용융의 개시를 식별하기 위해 상기 계산된 통계적 변동을 비교하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 20

스캐터 용융 검출 시스템으로서,

반도체 웨이퍼를 지지하도록 구성된 스테이지,

상기 반도체 웨이퍼를 어닐링하도록 구성된 어닐링 레이저, 및

스캐터 용융 검출기를 포함하고,

상기 스캐터 용융 검출기는,

초점 평면 어레이(FPA)를 포함하는 영상 캡처 장치, 및

상기 어닐링 레이저에 의해 형성된 빔의 정반사를 차단하거나 피하고 상기 FPA 상에 상기 반도체 웨이퍼의 표면의 스캐터 영상을 형성하도록 구성된 스캐터 광학 배열을 포함하는, 시스템.

청구항 21

제20항에 있어서,

프로세서 및

제1항 내지 제19항 중 어느 한 항에 따른 동작들을 수행하기 위해 상기 프로세서에 의해 실행되기 위한 프로그램 명령어들을 포함하는 머신 판독가능한 저장 매체를 더 포함하는 시스템.

청구항 22

레이저 어닐링 시스템으로서,

어닐링 레이저,

미리 결정된 어닐링 공정 조건들의 세트 하에서 반도체 물질의 국부 영역의 온도를 용융 임계값으로 상승시키기 위해 상기 어닐링 레이저의 동작 파라미터를 명시하는 적어도 하나의 어닐링 레이저 용융 임계값 교정 설정치를 포함하는 저장 장치 - 상기 교정 설정치는 상기 반도체 물질의 레이저 어닐링 공정 동안에 취득한 상기 반도체 물질의 스캐터 영상들로부터 나온 것임 -, 및

상기 어닐링 레이저 용융 임계값 교정 설정치에 따라 상기 어닐링 레이저를 제어하도록 구성된 제어기를 포함하는 시스템.

청구항 23

제22항에 있어서,

상기 교정 설정치는 제1항 내지 제19항 중 어느 한 항의 단계들을 포함하는 공정에 의해 결정된, 시스템.

청구항 24

비일시적 머신 판독가능한 저장 매체로서,

미리 결정된 어닐링 공정 조건들의 세트 하에서 반도체 물질의 국부 영역의 온도를 용융 임계값으로 상승시키기 위해 상기 어닐링 레이저의 동작 파라미터를 명시하는 적어도 하나의 어닐링 레이저 용융 임계값 교정 설정치 - 상기 교정 설정치는 상기 반도체 물질의 레이저 어닐링 공정 동안에 취득한 상기 반도체 물질의 스캐터 영상들로부터 나온 것임 - 를 포함하는 저장 매체.

청구항 25

제24항에 있어서,

상기 교정 설정치는 제1항 내지 제19항 중 어느 한 항의 단계들을 포함하는 공정에 의해 결정된, 저장 매체.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 출원은 여기에 참조로 전적으로 병합되는, 2022년 5월 3일자로 출원되고 발명의 명칭이 '스캐터 용융 검출 시스템들 및 이를 이용하는 방법들'인 미국예비특허출원 제63/337,714호의 우선권의 이익을 청구한다.

[0002] 본 개시는 일반적으로 온도측정에 관한 것으로 더욱 구체적으로는 상전이 마이크로스코피에 관한 것이다.

배경 기술

[0003] 펄스 레이저 용융 어닐링 시스템들은 칩들의 급속한 열처리를 위해 고도화된 집적회로(IC) 칩 제조에서 사용된다. 그러한 레이저 시스템들에 의해 제공되는 열처리는 도펀트 활성화, 접합들의 정의 및 그 외에 칩의 물질 및 전기적 특성들을 변화시키는 것과 같은 다양한 효과들을 위해 사용될 수 있다. 펄스 레이저 시스템에 의해 어닐링 동안에 웨이퍼 온도의 정확한 측정 및 제어가 그러나 중요하고, 레이저가 웨이퍼 온도를 용융 온도로 올리는 시간 기간 및 레이저가 작용하는 웨이퍼의 표면 영역이 감소함에 따라 문제가 될 수 있다. 웨이퍼 온도의

정확한 측정 및 제어가 어닐링 시스템 교정을 위해 또한 중요하다.

발명의 내용

- [0004] 하나의 실시예에서 본 개시는 레이저 어닐링 공정 동안에 반도체 물질의 고체에서 액체로의 물질 상전이의 발생을 결정하는 방법에 관한 것이다. 본 방법은 어닐링 레이저로부터의 어닐링 레이저 빔으로 상기 반도체 물질의 표면 상에 어닐링 영상을 형성하는 단계, 상기 어닐링 영상을 포함하는 상기 반도체 표면의 영역의 스캐터 영상을 형성하는 단계, 및 상기 스캐터 영상에서 수집된 광의 강도에 따라 상기 반도체 물질의 고체에서 액체로의 물질 상전이를 식별하는 단계를 포함한다.
- [0005] 다른 실시예에서 본 개시는 스캐터 영상 데이터를 분석하는 방법에 관한 것인데, 이 방법은 상기 반도체의 레이저 어닐링 공정 동안 캡처된 반도체 표면의 영역의 스캐터 영상을 수신하는 단계, 및 상기 영상으로부터 상기 반도체 물질의 고체에서 액체로의 물질 상전이를 식별하는 단계를 포함하는데, 여기서 상기 식별하는 단계는 하나 이상의 어닐링 공정 제어 파라미터들의 함수로서의 영상 강도의 통계적, 시계열 또는 기하학적 비선형 변동의 식별을 포함한다.
- [0006] 또 다른 실시예에서 본 개시는 반도체 물질을 취한 레이저 어닐링 공정을 위한 용융 교정을 수행하는 방법에 관한 것이다. 본 방법은 어닐링 레이저로부터의 어닐링 레이저 빔으로 상기 반도체 물질의 영역을 어닐링하는 단계 - 상기 어닐링하는 단계는 상기 반도체 물질의 고체에서 액체로의 상전이가 일어나는 용융 임계값 전력 레벨 아래로 그리고 위로 상기 어닐링 레이저의 전력 레벨을 증분적으로 변화시키는 단계를 포함함 -, 상기 어닐링 동안에 상기 반도체 물질의 상기 영역의 스캐터 영상들을 캡처하는 단계, 및 상기 캡처된 스캐터 영상들로부터 상기 어닐링 레이저를 위한 적어도 하나의 용융 임계값 설정치 전력 레벨을 결정하는 단계를 포함한다.
- [0007] 또 다른 실시예에서 본 개시는 스캐터 용융 검출 시스템에 관한 것인데, 이는 반도체 웨이퍼를 지지하도록 구성된 스테이지, 상기 반도체 웨이퍼를 어닐링하도록 구성된 어닐링 레이저, 및 스캐터 용융 검출기를 포함하고, 이 스캐터 용융 검출기는 초점 평면 어레이(FPA)를 포함하는 영상 캡처 장치 및 상기 어닐링 레이저에 의해 형성된 빔의 정반사를 차단하거나 피하고 상기 FPA 상에 상기 반도체 웨이퍼의 표면의 스캐터 영상을 형성하도록 구성된 스캐터 광학 배열을 포함한다.
- [0008] 또 다른 실시예에서 본 개시는 레이저 어닐링 시스템에 관한 것인데, 이는 어닐링 레이저, 미리 결정된 어닐링 공정 조건들의 세트 하에서 반도체 물질의 국부 영역의 온도를 용융 임계값으로 상승시키기 위해 상기 어닐링 레이저의 동작 파라미터를 명시하는 적어도 하나의 어닐링 레이저 용융 임계값 교정 설정치를 포함하는 저장 장치 - 상기 교정 설정치는 상기 반도체 물질의 레이저 어닐링 공정 동안에 취득한 상기 반도체 물질의 스캐터 영상들로부터 나온 것임 -, 및 상기 어닐링 레이저 용융 임계값 교정 설정치에 따라 상기 어닐링 레이저를 제어하도록 구성된 제어기를 포함한다.
- [0009] 또 다른 실시예에서 본 개시는 비일시적 머신 판독가능한 저장 매체에 관한 것인데, 이는 미리 결정된 어닐링 공정 조건들의 세트 하에서 반도체 물질의 국부 영역의 온도를 용융 임계값으로 상승시키기 위해 상기 어닐링 레이저의 동작 파라미터를 명시하는 적어도 하나의 어닐링 레이저 용융 임계값 교정 설정치 - 상기 교정은 상기 반도체 물질의 레이저 어닐링 공정 동안에 취득한 상기 반도체 물질의 스캐터 영상들로부터 나온 것임 - 를 포함한다.
- [0010] 또 다른 실시예에서 본 개시는 용융 검출 알고리즘과 함께 사용하기 위한 아래 용융(below-melt) 기준 영상들 및 파라미터들을 형성하는 방법에 관한 것이다. 본 방법은 아래 용융 웨이퍼(wafer below melt)를 어닐링하는 단계, 스캐터 용융 검출기로 영상 프레임들을 캡처하는 단계, 어닐링 레이저 전력 레벨을 기록하는 단계, 상기 캡처된 영상 프레임들로부터 아래 용융 기준 영상을 생성하는 단계, 복수의 아래 용융 1차원 스테이지 스캔 방향 강도 프로파일들을 생성하기 위해 상기 아래 용융 기준 영상을 처리하는 단계, 상기 아래 용융 기준 영상의 관심영역(ROI_{ref})을 식별하는 단계, 및 평균 1차원 스테이지 스캔 방향 강도 프로파일을 생성하는 단계를 포함한다.
- [0011] 또 다른 실시예에서, 본 개시는 웨이퍼 물질이 어닐링 공정 동안에 용융되었는지를 검출하는 방법에 관한 것이다. 본 방법은 용융 임계값 아래에서, 용융 임계값에서 또는 용융 임계값 위에서 웨이퍼를 어닐링하는 단계, 어닐링 동안에 스캐터 용융 검출기로 영상 프레임들을 캡처하는 단계, 및 레이저 전력 레벨들을 기록하는 단계, 상기 캡처된 영상 프레임들로부터 평균된 영상을 생성하는 단계, 및 상기 평균된 영상을 상기 동일한 웨이퍼 타입에 대한 대응하는 아래 용융 기준 영상과 비교하는 용융 검출 영상을 생성하는 단계를 포함한다.

[0012] 또 다른 실시예에서 본 개시는 웨이퍼 물질이 어닐링 공정 동안에 용융되었는지를 검출하는 방법에 관한 것이다. 본 방법은 용융 임계값 아래에서, 용융 임계값에서 또는 용융 임계값 위에서 웨이퍼를 어닐링하는 단계, 어닐링 동안에 스캐터 용융 검출기로 영상 프레임들을 캡처하는 단계, 및 상기 영상 프레임들의 관심영역 (ROI_{ref}) 내에서 픽셀 값들의 통계적 변동을 계산하는 단계 - ROI_{ref} 는 어닐링 레이저 영상이 웨이퍼 상에서 형성된 영상의 영역임 -, 및 용융의 개시를 식별하기 위해 상기 계산된 통계적 변동을 비교하는 단계를 포함한다.

도면의 간단한 설명

[0013] 본 개시를 예시할 목적으로 본 도면들은 본 개시의 하나 이상의 측면들을 도시한다. 그러나 본 개시가 도면들에 도시된 정확한 배열들 및 수잔들에 제한되는 것이 아님을 이해하여야 한다.

도 1은 본 개시에 따른 스캐터 용융 검출기를 가지는 예시적인 레이저 어닐링 시스템의 개략도이다.

도 2는 사전 열처리 라인 영상(pre-heat line image) 및 어닐링 영상으로 웨이퍼 표면을 스캐닝하는 예시적인 방법을 나타내는 반도체 웨이퍼의 탑다운 도면이다.

도 3a는 2개의 영상들의 상대적인 치수들 및 스캔 방향들을 나타내는 웨이퍼 표면 및 용융 어닐링 공정의 드웰 시간을 정의하는 스캐닝 중첩 영역 상에 형성된 어닐링 영상 및 사전 열처리 라인 영상의 탑다운 클로즈업 도면이다.

도 3b는 웨이퍼 표면 상에 형성된 어닐링 영상 및 영상의 스위프 방향 및 스테이지 스캔 방향을 보여주는, 사전 열처리 레이저를 포함하지 않는 대안적인 예의 탑다운 클로즈업 도면이다.

도 3c는 어닐링 영상의 스위프와 함께 용융 풀이라 불리는, 액상 반도체 물질의 증가하는 볼륨들 및 어닐링 영상의 스위프의 탑다운 클로즈업 도면이다.

도 4a는 레이저 공정 빔이 광 소스 프로브로서 이용되는 예시적인 스캐터 용융 검출 시스템의 개략적인 도면이다.

도 4b는 레이저 공정 빔과는 별도의 광 소스 프로브를 포함하는 예시적인 스캐터 용융 검출 시스템의 개략도이다.

도 5a는 본 개시의 스캐터 이미징 시스템의 광 배열의 개략도이다.

도 5b는 본 개시의 스캐터 이미징 시스템의 광 배열의 다른 예의 개략도이다.

도 6a는 웨이퍼 표면이 용융 아래일 때 어닐링 영상의 스위프 동안에 스캐터 용융 검출기의 영상 캡처 장치에 의해 영상 프레임에서 캡처된 데이터를 개념적으로 그리고 그래픽하게 예시한다.

도 6b는 웨이퍼 표면이 용융 위일 때 어닐링 영상의 스위프 동안에 스캐터 용융 검출기의 영상 캡처 장치에 의해 영상 프레임에서 캡처된 데이터 및 어닐링 영상의 스위프를 따라 형성된 액상 물질의 풀들(pools)을 개념적으로 그리고 그래픽하게 예시한다.

도 6c는 용융 아래에 그리고 위에 있는 스위프의 부분들을 낚는 적절히 교정되지 않은 어닐링 레이저에 의한 어닐링 영상의 스위프의 영상 프레임으로부터의 데이터를 예시한다.

도 7a 내지 도 7c는 레이저 전력이 증분적으로 증가되고 용융의 증가하는 정도가 테스트 데이터에서 검출된 용융 임계값 교정으로부터의 테스트 데이터를 예시한다.

도 8은 용융 임계값 전력 레벨 아래에서 그리고 위에서 증가하는 전력 레벨들에서의 일련의 어닐링 공정들에 대한 FPA 누적 강도 데이터를 예시한다.

도 9a 및 도 9b는 용융 임계값 전력 레벨에서 동작하는 어닐링 레이저로 반도체 표면을 따른 복수의 순차적 어닐링 영상에 대한 스캐터 영상 데이터를 예시한다.

도 10은 예시적인 컴퓨팅 장치의 기능 블록도이다.

도 11은 어닐링 공정 동안에 스캐터 용융 검출기의 ICD에 의해 캡처된 예시적인 영상 프레임의 부분을 개념적으로 예시한다.

도 12는 용융 아래의 기준 영상들 및 하나 이상의 용융 검출 알고리즘들에 의해 사용되기 위한 연관된 파라미터들을 생성하는 예시적인 방법을 예시한다.

도 13은 용융이 영상 프레임에서의 진폭들의 비선형성으로부터 검출되는, 용융 검출 알고리즘의 예시적인 방법을 나타낸다.

도 14는 용융이 용융 영상에서의 통계적 변동들로부터 검출되는, 용융 검출 알고리즘의 하나의 예시적인 방법을 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0014] 본 개시의 측면들은 초단의 드웰 시간들을 가진 스캐닝 CW 또는 QCD(펄스 시간 << 드웰 시간) 레이저 어닐링 시스템들에 의해 처리되는 반도체 웨이퍼에서 용융의 개시를 검출하도록 구성된 높은 대역폭 시간 및 공간 분해된 상전이 마이크로스코프 시스템들 및 어닐링 공정들을 위한 그러한 시스템들의 교정을 포함한다. 몇몇 실시예들에서 본 개시의 용융 검출 시스템들은 10ns 내지 500ns 또는 25ns 내지 250ns의 범위에 있는 초단의 드웰 시간들 및 $10\mu\text{m} - 150\mu\text{m} \times 10\mu\text{m} - 150\mu\text{m}$ 의 범위에 있는 스폿 크기들을 가지는 레이저들을 위한 용융 개시를 정확하고 신뢰성있게 검출하도록 구성된다.
- [0015] 용융 어닐링은 입사 레이저 빔으로 웨이퍼 표면 또는 부표면의 온도를 그것이 용융될 때 까지 국부적으로 상승시키는 것을 포함한다. 낮은 용융 온도를 가진 물질의 층(예를 들어 게르마늄 또는 게르마늄-실리콘) 위에 있는 실리콘의 박층에 의해 구성되는 예에서, 웨이퍼 표면은 부표면 물질이 용융되는 동안 고체 상태로 남아있다. 여기에 기술된 용융 검출 시스템들은 표면 용융 공정에서의 용융을 검출하도록 구성될 수 있고 - 여기서 용융은 웨이퍼 표면 상에서 일어난 - 부표면 용융 공정에서의 용융을 검출하도록 구성될 수 있다 - 웨이퍼 표면은 고체 상태로 남아 있고 웨이퍼 표면 아래의 물질의 볼륨은 용융됨 -.
- [0016] 도 1은 본 개시의 용융 검출 시스템들을 포함할 수 있는 예시적인 QCW(quasi continuous wave) 레이저 어닐링 시스템('시스템')(100)의 개략도이다. 인식되는 바와 같이 시스템(100)은 예로서 기술되고 예시되며 본 개시의 용융 검출 시스템들은 다양한 다른 레이저 어닐링 시스템들의 임의의 것 상에서 사용될 수 있다. 시스템(100)의 예시적 실시예들의 특정 측면들은 발명의 명칭이 "Laser Annealing Systems And Methods With Ultra-Short Dwell Times"이고 2018년 9월 25일자로 등록된 미국특허 제10,083,843호에 기술되는데 이의 내용들은 여기에 참조로 전적으로 병합된다. 미국특허들 제8,309,474호, 제8,546,805호, 제8,865,603호 및 이제 미국특허 제9,343,307호로 등록된 미국특허출원 제14/497,006호를 비롯한, 미국특허 제10,083,843호에 병합된 참조문헌들도 여기에 전적으로 참조로 병합된다.
- [0017] 시스템(100)은 상부 표면(132)을 가지는 척(130)을 연동 지지하는 웨이퍼 스테이지(120)을 포함한다. 웨이퍼 스테이지(120)는 스테이지 제어기(124)에 연동되어 연결되고 스테이지 제어기의 동작을 통해 X-Y 평면에서 그리고 선택적으로 Z 방향으로 움직이도록 구성된다. 척의 상부 표면(132)은 표면(12)을 가지는 웨이퍼(10)을 연동 지지하도록 구성된다. 몇몇 실시예들에서 웨이퍼(10)는 처리될 수 있고 집적 회로 칩들을 제조하는 다양한 스테이지들과 전형적으로 연관된 반도체 구조들, 많은 경우에 선택적으로 깊은 고도로 패턴화된 다층의 구조들에 의해 정의되는 패턴을 포함할 수 있다. 다른 예들에서 웨이퍼(10)는 제조된 구조들 없이 처리되지 않을 수 있고 표면(12)은 극히 부드러운 미러와 같은 표면일 수 있다. 이하에서 더욱 설명되는 바와 같이 처리되지 않은 웨이퍼(10)는 레이저 어닐링 도구의 성능을 교정하고 트래킹하기 위해 여기에 개시된 메트롤로지 시스템들과 유용할 수 있다. 여기에 개시된 메트롤로지 시스템들은 예를 들어 독특한 물질들 및 표면들을 위한 용융 임계값 설정값 전력 레벨들을 결정하기 위해 웨이퍼에 특정한 어닐링 레이저 전력 교정들을 수행하기 위해 교정된 어닐링 시스템과 또한 사용될 수 있다. 예에서, 척(130)은 웨이퍼(10)를 균일한 상온 이상의 온도로 가열하는 가열기를 포함한다. 웨이퍼 스테이지(12)는 스테이지 제어기(124)에 연동하여 연결된다.
- [0018] 시스템(100)은 웨이퍼 표면(12) 상에서 어닐링 영상(270)(도 2)을 형성하는 스캐닝 레이저 빔(268)을 생성하도록 구성된 어닐링 레이저 시스템(250)을 포함한다. 어닐링 레이저 시스템(250)은 초기 레이저 빔(262)을 방사하는 어닐링 레이저(260), 변조기 구동기에 연동하여 연결된 변조기(264) 및 초기 레이저 빔을 수신하여 스캐닝 레이저 빔(268)을 생성하는 스캐닝 광 시스템(266)을 포함한다. 예에서 어닐링 에너지(260)는 예를 들어 532nm의 파장을 가지는 스캐닝 레이저 빔(268)을 방사하는 QCW 파이버 레이저일 수 있다. 전술한 것은 예로서 제공되고 이제 알려진 또는 후에 개발된 다른 어닐링 레이저 시스템들이 여기에 개시된 메트롤로지 시스템들과 사용될 수 있다. 예에서 변조기(264)는 웨이퍼 표면을 가로지르는 어닐링 영상의 스위프 움직임을 낳는 어닐링 영상(270)의 스캐닝을 제어하기 위해 초기 레이저 빔(262)을 선택적으로 그리고 교대로 차단하고 통과시키도록 스

캐닝 광 시스템(266)과 협력하여 사용되는 AOM(acousto-optical modulator)이다.

- [0019] 몇몇 실시예들에서 시스템(100)은 어닐링 레이저 시스템(250)과 결부하여 동작하는 사전 열처리 레이저 시스템(150)을 선택적으로 또한 포함할 수 있고 사전 열처리 레이저 빔(168)을 생성하도록 구성된다. 사전 열처리 레이저 빔(168)은 웨이퍼 표면이나 (또는 웨이퍼 부표면)의 온도 T_s 를 용융 온도 T_M 미만의 사전 어닐 온도 T_{PA} 로 상승시킴으로써 웨이퍼 표면(12)을 사전 가열하기 위해 사용된다.
- [0020] 사전 열처리 레이저 시스템(150)은 사전 열처리 레이저(160) 및 라인 형성 광 시스템(166)을 포함할 수 있다. 사전 열처리 레이저(160)는 다이오드 레이저, 파이버 레이저 또는 CW(continuous-wave) p-편광된 10.6 마이크로 CO_2 레이저와 같은 CO_2 레이저를 포함할 수 있다. 예에서, 라인 형성 광 시스템(166)은 사전 열처리 레이저 빔(168)이 거의 수직인 입사각에서 또는 크게 비스듬한 입사각에서 웨이퍼 표면(12)에 입사하도록 구성된다. 예시적인 실시예에서 사전 열처리 레이저 빔(168)의 입사각은 웨이퍼 표면(12)에 대한 브리스터 각도와 실질적으로 동일하여, 비균일한 광 흡수로부터의 좋지 못한 패턴 밀도 효과가 감소되고 최소화된다.
- [0021] 라인 형성 광 시스템(166)은 사전 열처리 레이저(160)로부터 초기 레이저 빔(162)을 수신하고 그로부터 웨이퍼 표면(12) 상에 사전 열처리 라인 영상(170)(도 2 및 도 3)을 형성하도록 구성된다. 라인 형성 광 시스템(166) 및 스캐닝 광 시스템(266)의 각각은 렌즈들, 미러들, 개구들, 필터들, 능동 광 소자들(예를 들어 가변 감쇠기들 등) 및 그 조합들을 포함할 수 있다. 예에서 라인 형성 광 시스템(166) 및 스캐닝 광 시스템(266)의 하나 또는 모두는 빔 조절을 수행하고 예를 들어 그 제각기의 레이저 빔들(162, 262)을 균일화하고 및/또는 레이저 빔들에 선택 단면 모양을 제공하도록 구성될 수 있다. 그러한 빔 조절을 수행하기 위해 적합한 비제한적인 광 시스템들은 미국특허들 제7,514,305호, 제7,494,942호, 제7,399,945호 및 제6,366,308호에 개시되는데 그 내용들은 여기에 참조로 전적으로 병합된다. 예에서 어닐 레이저(26)로부터의 초기 레이저 빔(262)은 높은 품질을 가지고(예를 들어 실질적으로 가우시언임) 실질적인 빔 조절 없이(몇몇 경우들에서는 전혀 빔 조절 없이) 사용된다.
- [0022] 시스템(100)은 또한 용융의 개시를 검출하기 위해 스캐터링된 광을 시간적으로 그리고 공간적으로 분해하기 위해 웨이퍼 표면(12)의 관심영역으로부터의 스캐터링된 광을 검출하기 위한 스캐터 광 배열로 구성된다. 본 개시의 스캐터 광 배열들은 프로브 빔의 원거리 정반사 회절 한계 없이 평탄한 웨이퍼 표면으로부터 정반사를 검출하지 않는 공간적으로 분해된 센서 또는 센서 어레이에 기초한 시스템들을 포함한다. 스캐터 광 배열의 하나의 예시적인 형태는 다크필드 이미징이다. 포로브 제어(편광 및 파장과 같은) 및 (편광 필터들, 복굴절 크리스탈 등과 같은) 광 측정 후 선택이 또한 동일 또는 유사한 스캐터 정보를 캡처하기 위해 사용될 수 있다.
- [0023] 예시적인 레이저 어닐링 시스템(100)은 제어기(300)를 더 포함한다. 예에서 제어기(300)는 개인 컴퓨터 또는 워크스테이션과 같은 컴퓨터이거나 그를 포함한다. 제어기(300)는, 다수의 상업적으로 이용가능한 마이크로프로세서들, 하드 디스크 드라이브와 같은 메모리 장치에 프로세서를 연결시키는 적절한 버스 아키텍처 및 적절한 입력 및 출력 장치들(예를 들어 각각 키보드 및 디스플레이)을 바람직하게 포함한다. 제어기(300)는 제어기가 웨이퍼(10)의 어닐링을 하기 위해 시스템(100)의 다양한 기능들을 수행하도록 하는 비밀시적 컴퓨터 관독가능 매체(예를 들어 메모리, 프로세서 또는 둘 다)에 구현된 명령어들(소프트웨어)을 통해 프로그램될 수 있다.
- [0024] 제어기(300)는 사전 열처리 레이저 시스템(150) 및 스캐닝 레이저 시스템(250)에 연동 연결되고 이러한 시스템들의 동작을 제어한다. 제어기(300)는 변조기(264)에 전기적으로 연결되고 제어 신호(SMod)로 변조기의 동작을 제어한다. 예에서 제어기(300)는 사전 열처리 및 스캐닝 레이저 시스템들(150, 250)에서의 스캐닝 기능들을 제어하기 위한 디지털 신호 처리기들(DSPs)(도시되지 않음)을 포함한다. 몇몇 실시예들에서 제어기(300)는 또한 스캐터 용융 검출기(280) 및 스캐닝 광 시스템(266)에 연동 연결될 수 있고 원하는 공정 조건들을 성취하기 위해 스캐닝 레이저 빔(268)의 전력 레벨을 조정하는 것과 같이 어닐링 레이저 시스템(250) 또는 사전 열처리 레이저 시스템(150)을 제어하는데 사용되기 위한 레이저 어닐링 공정 동안에 스캐터 용융 검출기에 의해 생성된 용융 신호(SM)를 수신하고 처리하도록 구성된다. 다른 예들에서 제어기(300)는 컴퓨터 관독가능 저장 장치(1016)(도 10)에 저장된 이전에 획득된 어닐링 레이저 용융 교정 설정값들(1024)에 따라 어닐링 레이저 시스템(250)의 전력 레벨을 제어할 수 있다. 제어기(300) 또는 별도의 컴퓨팅 장치는 용융 검출기의 영상 캡처 장치(ICD)를 제어하는 것과 같이 스캐터 용융 검출기(280)의 소자들을 제어하도록 또한 구성될 수 있다.
- [0025] 시스템(100)의 동작의 예에서 시스템 제어기(300)는 제1 제어 신호 S1를 사전 열처리 레이저(160)에 보내고 이는 그 응답으로 초기 레이저 빔(162)을 생성한다. 이 초기 레이저 빔(162)은 광 시스템(166)에 의해 수신되는데 이는 그로부터 사전 열처리 레이저 빔(168)을 형성하고 이 빔은 웨이퍼 표면(12)에서 사전 열처리 라인 영상(170)을 형성한다. 또한 시스템 제어기(300)는 어닐 레이저(260)로 제2 제어 신호들(S2)로서 전송하고, 이는

그에 응답하여 초기 레이저 빔(262)을 생성한다. 이 초기 레이저 빔(262)은 스캐닝 광 시스템(266)에 의해 수신되는데 이는 스캐닝 레이저 빔(268)을 형성하기 위해 제어 신호(SS)에 의해 제어되고, 이는 다시 웨이퍼 표면(12)에서 어닐링 영상(270)을 형성한다. 시스템 제어기(300)는 또한 스테이지(120)의 제어된 움직임이 사전 열처리 라인 영상(170) 및 어닐링 영상(270)에 비해 상대적으로 웨이퍼(10)를 이동시키도록 (스캔하도록) 하기 위해 스테이지 제어기(124)에 제3 제어 신호들(S3)을 전송한다. 척(130)이 웨이퍼 사전 열처리를 제공하는 예에서, 시스템 제어기(300)는 또한 웨이퍼 사전 열처리를 개시하거나 제어하기 위해 척 제어기에 다른 제어 신호(도시되지 않음)를 전송할 수 있다. 전형적인 척 사전 열처리 범위들은 상온(25°C)에서 400°C까지이다.

[0026] 도 2는 어닐링 영상(270)으로 그리고 사전 열처리 레이저 시스템(150)이 사용되는 예들에서는 사전 열처리 라인 영상(170)으로 웨이퍼 표면을 스캐닝하는 예시적인 방법을 예시하는 웨이퍼(10)의 탑다운 도면이다. 웨이퍼 표면(12)에 대해 상대적인 사전 열처리 라인 영상(170)의 움직임은 여기서 사전 열처리 스캔 방향 또는 스테이지 스캔 방향이라고도 불리는, 화살표 AR1에 의해 표시된, 제1 방향, 예를 들어 y 방향으로 스테이지(120)를 병진 시킴으로써 성취될 수 있다. 사전 열처리 라인 영상(170)과 연관된 웨이퍼 표면(12)의 부분은 웨이퍼 표면 온도 T_s 가 사전 어닐 온도 T_{PA} 로 상승되는 웨이퍼 표면의 국부적으로 사전 열처리된 부분을 나타낸다. 레이저 빔(268)을 스캐닝함으로써 형성되는 어닐링 영상(270)은 여기서 어닐링 스캔 방향 또는 스위프 방향으로도 불리는, 화살표 AR2에 의해 나타낸, 제1 방향, 예를 들어 x 방향에 직교하는 제2 방향으로 웨이퍼 표면(12)에 대해 상대적으로 움직인다.

[0027] 스캐닝 광 시스템(266)은 사전 열처리 라인 영상의 길이를 가로질러 사전 열처리 라인 영상(170) 위에서 x 방향으로 어닐링 영상(270)을 스캔하거나 스위프하도록 구성된다. 하나의 예에서 어닐링 영상(270)의 스캐닝 속도는, 사전 열처리 라인 영상이 어닐링 영상의 스캐닝 동안에 본질적으로 정적인, 사전 열처리 라인 영상(170)의 움직임에 비해 충분히 빠르다.

[0028] 어닐링 영상(270)이 사전 열처리 라인 영상(170)의 단부에 도달하면 스캐닝 레이저 빔(268) 및 대응하는 어닐링 영상(270)은 변조기(264)(도 1)를 활성화시킴으로써 턴오프되어 그것이 초기 레이저 빔(262)의 투과를 차단한다. 스캐닝 레이저 빔(268)이 오프되어 있는 동안 사전 열처리 라인 영상(170)은 y 방향으로 움직여서 웨이퍼 표면(12)의 다음 부분이 스캔될 수 있다. 예에서 사전 열처리 라인 영상(170)의 움직임은 예를 들어 스테이지(120)를 y 방향으로 연속적으로 움직임으로써 연속적일 수 있다. 사전 열처리 라인 영상(170)이 자리를 잡으면 스캐닝 레이저 빔(268)은, 스캐닝 광 시스템(266)이 스캐닝 레이저 빔(268) 및 대응하는 어닐링 영상(270)을 새롭게 위치된 사전 열처리 라인 영상(170)의 제1 단부에서의 시작 위치로 이동시킬 수 있을 때 변조기(264)를 투과 모드로 둬으로써 다시 턴온된다. 그러면 새롭게 위치된 사전 열처리 라인 영상(170) 위에서의 어닐링 영상(270)의 스캐닝이 수행된다. 도 2는 위에서 기술된 스캐닝 방법을 반복함으로써 실질적으로 전체 웨이퍼 표면(12)(예를 들어 적어도 패턴화된 부분들)을 스캐닝하는 예시적인 방법을 예시한다. 어닐링 시스템이 사전 열처리 레이저 시스템(150)과 같은 사전 열처리 레이저를 포함하지 않는 다른 예들에서, 사전 열처리 라인 영상(170)이 생략되고 웨이퍼(10)가 y 방향으로 스테이지(120)에 의해 움직여지는 동안 어닐링 영상(270)이 x 방향으로 유사하게 급속하게 스캔될 수 있다.

[0029] 도 3a는 웨이퍼 표면(12) 상에 형성된 어닐링 영상(270) 및 사전 열처리 라인 영상(170) 중의 하나의 탑다운 클로즈업 도면이다. 사전 열처리 라인 영상(170)은 근위 단부(172), 원위 단부(174) 및 대향 측면들(173)을 가진다. 사전 열처리 라인 영상(170)은 근위 단부(172)에서 원위 단부(174)로 뻗는 장방향(치수)을 가지고 길이 L1을 가진다. 사전 열처리 라인 영상(170)은 또한 폭 W1을 가지는 대향 측면들(173) 간에서 측정된 좁은 방향(치수)을 가진다. 예에서 길이 L1은 5mm에서 20mm의 범위에 있고 예시적인 길이 L1은 7mm에서 12mm까지의 범위에 있다. 또한 예에서 폭 W1은 50 μm 에서 200 μm 까지의 범위에 있고 예시적인 폭 W1은 150 μm 이다. 예시적인 실시예에서 사전 열처리 레이저 빔(68)(도 1)은 스캐닝 방향(예를 들어 y 방향)으로 가우시안 강도 프로파일을 가지고 장(크로스 스캐닝) 방향(예를 들어 x 방향)으로 비교적 평탄한 상부 프로파일을 가진다. 빔 폭 W1은 가우시안 프로파일의 $1/e^2$ 강도 값에서 또는 가우시안 프로파일의 FWHM(full-width half-maximum)에서 정의될 수 있다.

[0030] 어닐링 영상(270)은 사전 열처리 라인 영상(170)의 부분과 중첩되고 중첩 영역은 여기서 스캐닝 중첩 영역(SOR)이라 불려진다. 어닐링 영상(27)은 길이 L2를 가지는 장 치수 및 폭 W2를 가지는 좁은 치수를 가진다. 예시된 실시예에서 어닐링 영상(270)은 x 방향 및 y 방향으로 실질적으로 가우시안 강도 분포를 가진다. 어닐링 영상(270)의 장 치수(L2)는 사전 열처리 라인 영상(170)의 단 치수(W1)의 방향으로 배향된다. 예에서 길이 L2는

100 μm 에서 500 μm 까지의 범위에 있는 한편 폭은 10 μm 에서 50 μm 까지의 범위에 있고 폭은 15 μm 에서 20 μm 까지의 범위에 있거나 16 μm 에서 18 μm 까지의 범위에 있다. 어닐링 영상(270)의 스캔 방향 AR2는 그 장 방향에 수직이다(직교한다). 스캔 방향 AR2는 어닐링 스캔 또는 스위프 방향으로 불리기도 하고 사전 열처리 스캔 방향 AR1에 실질적으로 직교한다. 어닐링 영상(270)의 폭 W2는 어닐링 스캔 방향(AR2)으로 스캐닝 중첩 영역(SOR)의 폭을 정의한다. 스캐닝 방향 AR2로의 어닐링 영상(270)의 급속한 스캐닝은 y 방향으로의 스테이지(120)의 움직임에 의해 y 방향(사전 열처리 스캔 방향 AR1)으로 웨이퍼 표면(12)을 따라 순차적으로 움직이는 사전 열처리 라인 영상(170)과 실질적으로 동일한 크기를 가지는 어닐링 조사 라인(272)을 형성하는 SOR이 생기게 된다.

[0031] 예에서 길이 L2는 폭 W1 보다 실질적으로 더 커서(예를 들어 2x 및 4x 사이에서 더 큼) 도 3a에 도시된 바와 같이 어닐링 영상(270)의 단부들이 사전 열처리 라인 영상(170)의 측면들(173)을 넘어서 연장된다. 이로 인해 스캐닝 중첩 영역 SOR을 정의하도록 사전 열처리 라인 영상(170) 및 어닐링 영상(270)을 정렬하기가 비교적 쉬워진다. 이 구성은 웨이퍼 표면 온도 T_s 를 용융 온도 T_m 까지 가해 하기 위해 사전 열처리 라인 영상(170)에 의해 제공되는 웨이퍼 표면의 국부화된 사전 열처리에 더하기 위해 어닐링 영상(270)의 중앙 고강도 부분을 활용한다.

[0032] 하나의 예에서 스캐닝 중첩 영역 SOR의 드웰 시간 t_d 는 $10\text{ ns} \leq t_d \leq 500\text{ ns}$ 의 범위에 있는 한편 다른 예에서는 $25\text{ ns} \leq t_d \leq 250\text{ ns}$ 의 범위에 있다. 폭 W2 = 15 μm 및 25ns의 드웰 시간의 경우 어닐링 영상(20) 그리고 이에 따라 스캐닝 중첩 영역 SOR의 스캐닝 속도는 $v_s = (W2)/t_d = 600\text{ m/s}$ 이다. 250ns의 드웰 시간 t_d 의 경우 스캐닝 속도는 $v_s = 60\text{m/s}$ 이다. 500ns의 드웰 시간 t_d 의 경우 스캐닝 속도는 $v_s = 30\text{m/s}$ 이다. 10ns의 드웰 시간 t_d 의 경우 스캐닝 속도는 1500m/s이다. 하나의 예에서 스캐닝 광 시스템(266)은 이러한 속도들 또는 그 사이의 임의의 속도를 제공하도록 구성된다.

[0033] 도 3b는 사전 열처리 레이저 시스템(150)이 생략되는 시스템(100)의 다른 예시적인 구현의 탑다운 클로즈업 도면이다. 어닐링 레이저 시스템(250)은 웨이퍼 표면 온도 T_s 를 원하는 어닐링 온도로 올리도록 설계되고 구성된다. 스캐닝 방향 AR2로의 어닐링 영상(270)의 급속한 스캐닝은 스테이지(120)의 y 방향으로의 움직임에 의해 y 방향(화살표 AR1)으로 웨이퍼 표면(12)을 따라 실질적으로 움직이는 어닐링 조명 라인(272)이 생기게 한다. 예에서 어닐링 조명 라인(272)의 길이 L1은 3mm에서 12mm 범위 내에 있고 어닐링 영상(270)의 폭 W2는 10 μm 에서 50 μm 까지의 범위에 있고 어닐링 영상(270)의 길이 L2는 100 μm 에서 500 μm 까지의 범위에 있다.

[0034] 도 3c는 어닐링 조명 라인(272)을 따라 스캔 방향 AR2로 이동하는 어닐링 영상(270)의 시간의 3가지 경우들(a, b 및 c로 레이블됨)을 보여주는 웨이퍼 표면(12)의 부분의 탑다운 도면이다. 도 3c는 웨이퍼 표면(12)의 국부 영역이 용융되고 고체에서 액체 상으로 부분적으로 또는 전적으로 전이되어 고체 및 액체 상들 간의 인터페이스(312)가 생기게 하는 스캐닝 레이저 빔(268)에 의해 형성된 용융 풀(pool)(310)을 개념적으로 예시한다. 예시된 예에서 용융 풀(310)의 크기는, 잠재적으로 어닐링 조명 라인(272)을 가로지르는 어닐링 영상(270)의 스위프를 통해 레이저 빔(268)의 광 전력 밀도를 증가시키는 것으로 인해, 스캔 방향 AR2를 따라 증가한다. 용융 풀(310) 내에서 웨이퍼 물질의 상전이는, 웨이퍼 물질(들)의 원자간 또는 분자간 상호작용(들)의 밀도 및 형태에 있어서의 불연속성을 일으키는 1차 상전이이다. 상전이는 물질의 2개의 서로 다른 상들(고체 및 액체)에서의 서로 다른 전자기 상호작용들로 인해 물질의 굴절률에서의 상당한 변화를 초래한다. 예에서 용융 풀(310) 내에서의 액상의 굴절률은 용융 풀(310) 밖의 고상 웨이퍼 물질의 굴절률 보다, 예를 들어 전형적인 IC 반도체 물질들에 대해서는 대략 100퍼센트에서 300퍼센트까지 실질적으로 더 높다.

[0035] 용융 풀(310) 및 용융 풀 주위의 고상 물질 간의 인터페이스(312)는 광시야 구조 계수의 크기가 용융 풀(310)의 반경 r_l 에 따라 커지는, 입사 광의 주요한 스캐터러로서 작용한다. 여기에 개시된 스캐터 이미징 시스템들은 용융의 개시에서 그리고 용융 풀(310)이 초기에 형성되기 시작할 때 일어나는 스캐터링된 광을 검출하도록 설계되고 구성된다. 스캐터링된 광의 강도는 용융 풀(310)의 증가하는 크기와 함께 급속하게 그리고 비선형적으로 증가하고 본 개시의 스캐터 이미징 시스템들은 용융된 웨이퍼 물질의 증가하는 정도로부터 일어나는 스캐터링된

광의 증가하는 강도를 검출하도록 구성될 수 있다.

[0036] 고상에서의 용융 아래에서는 반사된 광신호의 강도 및 물질 온도 간의 관계는 대략 선형인 것으로 γT 근사화될 수 있는데 여기서 γ 는 스케일링 인자이고 T는 물질 온도이다. 입사광의 파장, 예를 들어 레이저 빔(268)의 파장 보다 더 작은 용융 풀(310)의 경우 인터페이스(312) 및 용융 풀(310)의 스캐터링 강도는 대략 $\alpha V^{4/3}$ 이거나 - 여기서 α 는 스케일링 인자이고 V는 용융 풀의 체적임 - 용융 풀의 반경의 4 거듭제곱이다 - 크기 $\alpha \gg \gamma_{\text{입}}$ - 입사광의 파장 보다 상당히 더 큰 용융 풀(310)의 경우 반경 r_l 의 용융 풀 상에서의 불연속성은 광시야로의 주된 스캐터러(primary scatterer)이고 크기는 $\alpha V^{2/3}$ 로 근사화된다. 그러하기에 증가하는 광 전력 및 용융 풀 크기 간의 전체적인 스케일링 관계는 극히 비선형이고 스캐터 이미징 시스템을 궁극적으로 포화시킬 수 있다. 도 3c에 도시된 예에서 용융 풀(310)의 초기 형성은 용융 풀 주위의 영역으로부터 방사되는 스캐터링된 광에 있어서의 급작스러운 증가로 인해 스캐터 용융 검출기(280)에 의해 검출되는 광에서의 예리한 불연속을 초래할 것이다. 용융 풀(310)의 크기가 커짐에 따라서(예를 들어 용융 풀(310a)에 비한 용융 풀(310b, 310c)의 크기), 스캐터 용융 검출기(280)에 의해 검출되는 광의 강도는 대략 용융 풀의 증가하는 반경의 4의 거듭제곱으로 비선형적으로 증가할 것인데 이는 용융 검출기에 의해 생성된 용융 신호(SM)를 급속히 포화시킬 수 있다. 여기에 개시된 스캐터 용융 검출기(280) 및 스캐터 이미징 채널들은 용융의 개시에 극히 민감하도록 설계되고 구성되는데, 여기서 용융 검출기에 의해 캡처된 광의 강도에 있어서의 불연속적인 증가는 용융의 개시에서 실질적으로 순시적으로 일어나서 광 신호의 강도에 있어서의 여러 크기의 정도의 증가를 초래한다.

[0037] 어닐링 공정 동안에 스캐터 용융 검출기(280)는 어닐 영상의 영역에서 광 구조들에 의해 회절되거나 반사되거나 굴절되는 광을 비롯한, 어닐링 영상(270) 주위의 영역으로부터의 광을 캡처하기 위해 사용될 수 있다. 예에서 스캐터 용융 검출기(280)는 검출된 광을 나타내는 용융 신호 SM을 생성하고 용융 신호를 제어기(300)에 전송한다. 예에서 제어기(300)는 용융 신호 SM을 수신하고 어닐링 레이저 시스템(250) 그리고 몇몇 예들에서는 사전 열처리 레이저 시스템(150)의 전력 레벨과 같은 하나 이상의 특성들을 제어하는 피드백 루프를 생성하기 위해 이 신호를 사용할 수 있어 웨이퍼 표면 온도 T_s 가 제어될 수 있다. 몇몇 예들에서 스캐터 용융 검출기(280)는 어닐링 레이저 시스템(250)의 광 성능을 교정하고 추적하기 위해 사용될 수 있다. 그리고 몇몇 경우들에서 스캐터 용융 검출기(280)는 미리 결정된 어닐링 공정 조건들의 세트에 대한 용융 임계값 레이저 전력 설정값들을 제공하는 웨이퍼에 특유한 레이저 전력 교정들을 개발하기 위해 사용될 수 있다.

[0038] 도 4a는 스캐터 용융 검출기(280)의 하나의 예시적 구현의 측면도를 예시한다. 예시된 예에서 용융 검출기(280)는 스캐닝 레이저 빔(268)의 각도 α_2 와 다른 표면 법선(normal) N에 대해 각도 α_1 을 가지는 스캐터 검출기 경로(402)를 따라 웨이퍼 표면(12)으로부터 광을 수신한다. 예시된 예에서 스캐닝 레이저 빔(268)은 스캐터 온도측정법 측정을 위한 프로브로서 그리고 어닐링 레이저 빔으로서 동시에 사용된다. 다른 예들에서 스캐닝 레이저 빔(268)과 다른 광 소스가 프로브로서 사용될 수 있다. 스캐닝 레이저 빔(268)을 스캐터 측정을 위한 광 소스로서 사용하는 것은 간단한 배열의 장점을 제공하는데 이는 추가의 광 소스가 필요하지 않고 그것이 작은 어닐링 영상(270) 주위의 시야만을 조명하여 웨이퍼 표면(12)를 가로질러 약 1km/s까지 급속히 이동할 수 있기 때문이다.

[0039] 스캐닝 레이저 빔(268)은 각도 α_1 과 다른 표면 법선 N에 대해 입사각 α_2 를 가지고 웨이퍼 표면(12) 상에 어닐링 영상(270)을 형성한다. 스캐터 검출기 경로(402)의 각도 α_1 은, 웨이퍼(10)의 표면(12)로부터의 스캐닝 레이저 빔(268)의 정반사(268R)이 스캐터 검출기 경로(402)로 들어가지 않도록 해 용융 검출기(280)에 의한 스캐터 관찰을 가능하게 하도록 설계된다.

[0040] 용융 검출기(280)는 광학 장치(404) 및 영상 캡처 장치(ICD)(406)를 포함한다. ICD(406)는 적어도 하나의 픽셀화된 2차원 CCD 또는 CMOS 초점 평면 어레이(FPA) 및 프로세서 및 캡처된 영상들을 저장하기 위한 저장 유닛을 비롯한, 영상 캡처 장치들의 기술분야에 알려진 연관된 전자장치를 포함하거나 그들에 전기적으로 연결된다. 광학 장치(404)는 웨이퍼 표면(12)을 FPA에 이미징하도록 구성된다. 예에서 ICD(406)는, 어닐링 조명 라인(272)을 가로지르는 어닐링 영상(270)의 적어도 하나의 전체 스윕프가 단일의 영상 프레임에 캡처되도록, 예를 들어 약 50us의 영상 프레임 캡처 속도로, 레이저 빔(268)의 드웰 시간에 비해 비교적 긴 노출 시간 프레임에

걸쳐 스캐터 영상들을 캡처하도록 구성된다.

[0041]

광학 장치(404)는 하나 이상의 렌즈들, 미러들, 필터들, 격자들, 개구들 또는 다른 소자들을 포함할 수 있다. 스캐터 검출기 경로(402)를 따라 수집된 광, 예를 들어 스캐터링된 광은 수집되고 몇몇 경우들에서는 광학 장치(404)에 의해 반사되고 및/또는 필터링되고 영상 캡처 장치(406)의 FPA 상에 이미징된다. 광학 장치(404)의 시야(FOV)는 웨이퍼 표면(12)의 전체 또는 그 부분을 포함할 수 있다. 예를 들어 FOV 광학 장치(404)는 어닐링 조명 라인(272)의 길이 L1과 대략 같은 스캔 방향 AR2(도 3b)로의 폭 또는 어닐링 조명 라인의 길이 L1 보다 약 5퍼센트에서 약 50퍼센트까지 더 큰 방향 AR2로의 폭을 가질 수 있다. 스테이지 스캔 방향 AR1(도 3b)으로의 광학 장치(404)의 FOV의 폭은 어닐링 영상 스캔 방향 AR2로의 FOV의 폭과 동일할 수 있거나 스캔 방향 AR2로의 FOV의 폭 보다 더 크거나 더 작을 수 있다. 예에서 스테이지 스캔 방향 AR1으로의 광학 장치(404)의 FOV의 폭은 스테이지 스캔 방향으로의 어닐링 영상(270)의 직경 또는 외부 범위의 적어도 2배이어서, 어닐링 영상의 용융 이하이고 그 밖인 웨이퍼 표면(12)의 부분들이 어닐링 영상 내에서의 부분들로서 동일 영상에서 캡처된다. 스위프 방향 AR2로의 광학 장치(404)의 FOV는 조명 라인(272)의 길이 L1 보다 적어도 10퍼센트 더 클 수 있고 몇몇 경우들에서는 적어도 20퍼센트 더 클 수 있다. ICD(406)의 공간 분해도는 10um/픽셀에서 50um/픽셀까지일 수 있고 몇몇 경우들에서는 약 30um/픽셀일 수 있다.

[0042]

예시된 바와 같이 광 소스, 여기서는 어닐링 레이저 시스템(2500은 웨이퍼 표면(12) 상에 어닐링 영상(270)을 형성하는 스캐닝 레이저 빔(268)을 생성한다. 스캐닝 레이저 빔(268)의 광의 제1 부분은 웨이퍼 표면(12)에 의해 정반사되고 용융 검출기(280)에 도달하지 않는다. 어닐링 조명 라인(272)을 따른 웨이퍼 표면(12)의 온도가 용융 온도 보다 아래이고 웨이퍼 물질이 고체 상태(고상)에 있을 때, 스캐터 용융 검출기(280)는, 광발광으로부터의 광 및 예를 들어 두께에 있어서의 작은 변화 또는 스크래치 또는 먼지와 같은 큰 규모의 결함들과 같은 웨이퍼 표면(12)에서의 결함들로 인해 스캐터링된 광 또는 처리된 웨이퍼들의 경우에는 웨이퍼 표면 또는 부표면에서의 제조된 패턴들과 같은 웨이퍼에서의 광학적 불연속성들로부터 회절되고, 반사되고 및/또는 굴절되는 광과 같은 배경 광의 약간의 양을 검출할 수 있다. 따라서 처리되지 않고 고도로 연마된 웨이퍼(10)의 경우에는 용융 검출기(280)는 스캐터 검출기 경로(402)를 따라 거의 광을 검출할 수 없거나 전혀 광을 검출할 수 없고 용융 검출기(280)의 시야는 실질적으로 어둡다. 처리된 웨이퍼들의 경우에는 부차적으로 용융된(sub-melt) 고상 조건과 연관된 어느 정도의 스캐터링된 광이 캡처될 수 있다. 스캐닝 레이저 빔(268)의 전력 밀도가 용융 임계값 에너지 밀도 E_m 으로 상승될 때 웨이퍼 표면(12) 또는 부표면에서의 웨이퍼 물질에서의 상전이가 일어나서 대략 어닐링 영상(270)에 위치한 용융된 액상(liquid-phase) 물질의 체적을 초래한다. 용융된 액상 물질의 반사도는 고상에서의 물질의 반사도와는 실질적으로 다르다. 새로 형성된 액체의 체적의 고상 및 액상 간의 인터페이스(예를 들어 인터페이스(312)(도 3c))는 광을 2π 로 웨이퍼의 용융된 영역 위의 각도들의 반구체로 강력하게 스캐터링시키는 웨이퍼 표면에서의 새로운 광학적 불연속성을 생성한다. 용융된 영역(예를 들어 용융된 풀(310))에서의 관찰된 반사는 확산되고 몇몇 경우들에서는 람베르시안 반사도에 접근한다. 용융된 영역의 이미징 열반사도 신호의 결과적인 강도는 고상에 비해 상당한 증가, 예를 들어 50퍼센트 정도의 증가를 가질 것이다. 고체에서 액체로의 물질 상전기로 인한 스캐터 검출기 경로(402)를 따른 스캐터 이미징 열반사도 신호의 강도에 있어서의 변화는 대조적으로 극심해서 예를 들어 100,000퍼센트 더 높은 강도의 정도이고 이에 따라 용융의 개시의 검출에 대해 예민한 민감도를 제공한다.

[0043]

예에서 ICD(406)는 어닐링 영상(270)의 드웰 시간 보다 더 큰 길이의 시간에 걸쳐 그리고 대응하는 주파수 $f \leq \frac{1}{t_a}$ 에서 스캐터 영상들을 캡처한다. 스캐터 용융 검출기(280)은 어닐링 영상(270)이 속도 v에서 $-x = v * t -$ 움직이면서 어닐링 레이저 스위프 방향 AR2를 따라 시간을 분해한다. 이러한 방식으로 캡처된 스캐터 영

상들이 스캐터 신호 데이터를 x 방향(스위프 방향 AR2)을 따라서 $f = \frac{1}{t_a}$ 으로의 대역폭들에서 전력 변동 스펙트럼 측정들로 분해하기 위해 사용될 수 있다. 어닐링 영상(270)의 전체 스위프 또는 복수의 스위프를 포함하는 스캐터 영상 프레임으로, 단일의 영상 프레임에서의 전체 어닐링 영상 스위프 스트립에 걸쳐 공정 균일성을 측정하기 위해 사용될 수 있다. 예에서 스캐터 용융 검출기(280)는 고도로 실용적이고 어닐링 레이저 시스템

(250)의 최적화에 유용한, 단일 프레임에서의 모든 포인트들 $x = v \cdot (t \pm t_a)$ 에 대해 공간적으로 분해

될 수 있는 스캐터 영상들을 캡처함으로써 모든 주파수들 $f \leq \frac{1}{t_a}$ 에서 용융 행동 및 균일성을 측정하도록 구성

될 수 있다.

[0044] 도 4b는 어닐링 레이저 시스템(250)과는 별도의 프로브 광 소스(410)가 스캐터 측정들을 위한 프로브로서 사용되는 스캐터 용융 검출기(280)의 다른 예시적인 구현을 예시한다. 예시된 예는 광학 장치(404) 및 ICD(406)과 동일 또는 유사한 소자들을 포함할 수 있는 광학 장치(412)를 포함하는 검출기를 비롯한, 도 4a에 도시된 예로서 유사한 구성을 가진다. 프로브 광 소스(410)는 어닐링 영상(270)과 중첩되는 영역에서 웨이퍼 표면(12) 상에 입사하는 프로브 광(420)을 방사하는 펄스형 광 소스일 수 있다. 도 4a에 도시된 예에서와 같이, 도 4b에서의 스캐터 용융 검출기(280)는, 광학 장치(412)가 프로브 광(420)의 정반사(420R) 또는 스캐닝 레이저 빔(268)의 정반사(268R)를 캡처하지 않도록, 스캐터 검출기 경로(416)를 가진다. 예시된 예에서 용융 검출기(280)는 스캐닝 레이저 빔(268)의 각도(α_2) 또는 프로브 광(420)의 각도(α_3)와 다른 법선 표면 N에 대해 각도(α_1)를 가지는 스캐터 검출기 경로(416)를 따라 웨이퍼 표면(12)로부터의 광을 수신한다. 프로브 광 소스(410)는 다이오드 또는 레이저 소스에 연결된 광섬유일 수 있고 예를 들어 녹색, 청색, NIR과 같은 또는 예를 들어 1260nm 및 1675nm 사이의 텔레콤 대역에서의 짧은 파장의 광을 방사할 수 있다. 광학 장치(412)는 프로브 광(420)과는 다른 파장들의 광을 필터링하도록 구성될 수 있다. 프로브 광 소스(410)는, 어닐링 조면 라인(272)의 이산적 부분들이 이미징될 수 있도록, 더 큰 주파수에서 또는 ICD(406)의 프레임 속도 보다 더 짧은 시간 구간 동안 프로브 광(420)의 펄스들을 방사하도록 구성될 수 있다.

[0045] 도 5a 및 도 5b는 스캐터 이미징을 위한 2개의 대안적 광학 배열들(500, 501)을 개념적으로 예시한다. 배열(500)은 예를 들어 ICD(406)과 같은 ICD의 FPA 상에 용융 풀(310)을 포함하는 웨이퍼 표면(12)의 영역의 스캐터 영상을 형성하기 위한 대물 렌즈(502) 및 영상 형성 렌즈(504)를 포함한다. 배열(500)은 스캐닝 레이저 빔(268)(도 4a에서의 예) 또는 별도의 프로브 광 소스(예를 들어 도 4b의 예에서의 프로브 광(420))과 같은 광이 예를 들어 용융 풀(310)과 같은 대상에 입사하는, 도 4a 및 도 4b에 예시된 예들에 대응한다. 푸리에 광학의 면에서, 1차 광(530)(스캐터링된 광)은, FPA 상에 형성된 영상이 용융 풀(310) 및/또는 웨이퍼 표면 또는 부표면에서의 다른 광학적 스캐터러들 또는 분연속성들에 의해 스캐터링되는 고차 회절 강도들(532)로부터이도록, 렌즈들(502, 504)의 공간적 위치 및 개구수로 인해 대물 렌즈(502)에 도달하지 않는다.

[0046] 도 5b는 대안적 광학 배열(501)을 예시하는데 여기서는 FPA 상에 대물 렌즈(510) 및 영상 형성 렌즈(512)에 의해 형성된 영상이 용융 풀(310) 및/또는 웨이퍼 표면 또는 부표면에서의 다른 광학적 스캐터러들 또는 분연속성들에 의해 스캐터링되는 고차 회절 강도들(532)로부터이도록, 적어도 하나의 불투명 광 스톱(520)이 0차 광(530)(스캐터링되지 않은 광)이 ICD(406)과 같은 ICD의 FPA에 도달하지 못하도록 하기 위해 사용된다. 도 4a의 스캐터 용융 검출기(280) 또는 도 4b의 스캐터 용융 검출기는 스캐터 영상을 형성하기 위해 적어도 하나의 불투명 광 스톱(520)을 사용하는 광학 배열(501)을 가지도록 변경될 수 있다.

[0047] 도 6a는 웨이퍼 표면(12)이 용융 미만일 때 어닐링 영상(270)의 스위프 동안에 스캐터 용융 검출기(280)의 ICD(406)에 의해 영상 프레임에서 캡처되는 데이터를 개념적으로 그리고 도식적으로 예시한다. 도 6b는 어닐링 레이저 시스템(250)의 광 전력이 증가되고 웨이퍼 표면(12)의 온도가 용융 임계값을 초과하고 웨이퍼 물질이 용융되기 시작할 때 영상에 캡처된 데이터에 있어서의 변화를 개념적으로 예시한다.

[0048] 용융 미만에서는 용융 검출기(280)에 의해 캡처된 영상은 웨이퍼의 거칠기에 의해 스캐터되는 프로브 강도 $I(\vec{x})$ 그리고 몇몇 경우들에서는 웨이퍼 표면(12)에 임베딩된 공진 스캐터러들이다. 박막 근사화에서는 높이 차이들 $\delta(\vec{x})$ 로 인한 거칠기는 무작위 홀로그래픽 위상 격자 $\phi(\vec{x})$ 로서 부과되고 이는
$$e^{i\phi(\delta(\vec{x}))} = e^{i\alpha\delta(\vec{x})}$$
로서 전기장에 부과된다. 변동 전력 스펙트럼, $\delta(\vec{x})$ 의 푸리에 변환의 제곱
$$|\mathcal{F}(\delta(\vec{x}))|^2 = |\delta(\vec{k})|^2$$
은 균일한 웨이퍼 제조 공정들에 대해 전형적으로 0이 아닌 웰 패스트
$$\vec{k} = \frac{4\pi}{\lambda}$$
이고 따라서 $I(\vec{x})$ 를 웨이퍼 표면 위의 반구로 균일하게 스캐터시킬 것이다. 도 6a는 용융 미만에서 일어날 수 있는 낮은 광 및 비교적 평평한 응답을 개념적으로 예시한다.

[0049] 처리되고 고도로 패턴화된 웨이퍼들(10)에 대해, 몇몇의 물질 제조 공정들은 폴스 용융 신호를 제공할 수 있는 무작위 영상들을 생성할 수 있는 박막들의 회귀 광학 스캐터러들을 포함한다. 용융 검출기(280)로부터의 영

상 데이터가 컴파일된 영상 프레임들에 걸쳐 평균되는 경우에는 그러나 용융 아네르이 폴스 용융 신호들은 어닐링 레이저(250)의 증가된 광 전력 밀도를 가지는 어닐링 조명 라인에 걸친 저체 스위프에 대해 균일하게 컴파일된 영상 프레임들에서 나타나기 때문에 참의 용융 신호로부터 구분될 수 있다. 본 개시의 측면들은 예를 들어 스캐닝 레이저 빔(268)과 같은 조면 프로브 빔의 모양 또는 프로브 광 소스(410)로부터의 프로브 광(420)을 샘플하기 위해 용융 미만의 웨이퍼(10)의 고 분해도 영상들의 세트를 컴파일하는 것을 포함한다. 아래 용융의 영

상 데이터는 위의 용융의 영상 데이터로부터 구분될 수 있는데 이는 반경 $r_{melt} < r_{beam}$ 의 용융 폴(310)의 높은 강도 아티팩트 및 연관된 인터페이스(312)를 포함할 것이다. 용융 폴에서의 웨이퍼 물질의 액상 부분에서의 프로브 빔의 단축된 흡수 길이는 처리된 웨이퍼에서의 부표면 광학 불연속성들에 의해 야기되는 스캐터링을 줄이고, 따라서 용융의 개시의 검출을 더욱 촉진하는 용융 임계값이 초과될 때 스캐터 광학 응답을 단 순화시킨다.

[0050] 도 6c는 용융을 식별하기 위해 캡처된 광의 진폭을 이용하는 시스템(100)의 예시적인 구현으로부터의 테스트 데이터의 영상 프레임들을 예시한다. 도 6c는 적절히 최적화되지 않은 시스템의 예를 예시하는데 어닐링 영상 스위프의 시작(영상의 상부) 및 단부(하부)가 모두 용융 아래이고 중간에서의 침침한 영역은 용융 아래이다. 어닐링 레이저 시스템(250)의 광 전력 밀도는 적절히 고정되지 않고 원하지 않는 광 전력에 있어서의 변동을 초래하고 이는 용융 위의 스위프의 시작 및 단부 및 용융 아래의 스위프의 중간을 야기한다.

[0051] 도 7a 내지 도 7c는 독특한 물질 스택을 가진 특정의 처리된 웨이퍼에 대해 그리고 특정의 척 온도에서 용융 임계 고정으로부터의 테스트 데이터를 예시한다. 도 7a 내지 도 7c는 스캐닝 레이저 빔(268)의 3개의 서로 다른 스트립들로부터의 하나 이상의 스위프들을 보여주는데 여기서 스트립은 일련의 연속적 스위프들이다. 도 7a에서 어닐링 레이저 시스템(250)의 전력은 132W로 설정되고 도 7b 및 도 7c의 스트립에서는 전력 레벨이 135W로 증가되었고 도 7c의 제3 스트립에서는 전력이 138W로 증가되었다. 화살표들은 스캐터된 광에 있어서의 날카로운 증가를 야기하는 웨이퍼 물질의 용융으로 인해 영상의 그러한 영역들에서의 높은 광 강도를 나타내는 신호가 포화되는 영상에서의 위치들을 가리킨다. 도 7a 내지 도 7c의 영상들은 처리된 웨이퍼의 고유한 거칠기 및 비균일성에 의해 야기되는 낮은 강도 아티팩트들을 또한 보여준다(낮은 강도 아티팩트의 몇몇은 각각의 도면에서 점선으로 원으로 표시된다). 그러나 웨이퍼의 용융된 영역들에 해당되는 높은 강도 위치들은 더 큰 공간 밀도 및 스캐터 영상에서의 아래 용융의 배경 광 보다 훨씬 더 큰 크기이고 배경 스캐터링으로부터 강하게 눈에 띄는 크기를 가진다. 도 7a 내지 도 7c는 용융 임계값이 레이저 전력을 높이고 용융 메트롤로지를 학습함으로써 유일한 물질 스택을 가지는 특정의 처리된 웨이퍼 타입에 대해 고정될 수 있는 예를 예시한다.

[0052] 도 8은 도 7a 내지 도 7c에 예시된 동일한 고정 공정으로부터의 추가 데이터를 예시한다. Y 축은 ICD(406)의 FPA에 의해 캡처된 광의 누적 강도이다. 더욱 구체적으로 Y 축은 영상에서의 모든 픽셀들의 모든 그레이 값들의 합인데, 여기서는 당업계에 알려진 바와 같이 FPA의 각각의 픽셀이 0(검은색) 및 1(흰색) 간의 그레이 레벨 스케일 상에의 입사 광의 강도의 레벨을 기록한다. X축은 어닐링 영상 스위프 수이다. 도 8은 132W에서의 어닐링 영상의 제1의 복수의 스위프를 나타내고 그레이 값들의 합은 낮고 용융 아래의 조건 및 ICD(406)의 FPA에 의해 캡처되는 배경 광 스캐터링을 나타내는 제1 값이다. 도 8은 용융 임계값 이상이라고 결정된 138W로 레이저 전력이 증가되고 웨이퍼 물질의 액체 체적이 어닐링 영상 스위프의 큰 부분에에 대해 시종일관하게 형성되었을 때 ICD(406)에 의해 캡처된 광의 강도면에서의 날카로운 증가 및 용융 임계값이라고 결정된 135W로 전력이 증가될 때의 그레이 값들에서의 증가를 나타낸다.

[0053] 도 9a 및 도 9b는 반도체 웨이퍼에 대한 용융 임계값이라고 결정된 것에서 설정된 어닐링 레이저 시스템(250)의 전력으로 양호하게 최적화된 시스템에 대한 테스트 데이터를 예시한다. 도 9a 및 도 9b는 동일한 데이터를 2개의 다른 포맷들로 보여준다. 각각은 높은 속도의 스팟 스위핑 방향으로의 많은 영상 프레임들로부터의 프로파일 분석들의 집합이다. 도 9a에서 Y 축은 강도이고 X 축은 어닐링 영상 스위프를 따른 위치이고 여기서 복수의 순차적 스위프에 대한 광 강도 프로파일들이 중첩된다. 도 9b에서 동일한 스위프 강도 프로파일들이 3차원 컬러 맵 상에 도시되는데 Y축은 어닐링 영상 스위프 방향에서의 위치이고 X 축은 스테이지 스캔 방향에서의 영상 프레임 및 위치이고 컬러는 광 신호의 강도를 나타낸다. 도 9b는 스캐터 용융 검출기(280)로 캡처된 복수의 영상 프레임의 모세익이다.

[0054] 영상 프레임에서의 위치는 어닐링 영상의 속도 및 ICD의 공간 분해도를 안 상태에서 어닐링 영상 스위프를 따른 시간 및 특정 위치에 있어서의 경우로 변환될 수 있다. 예로서 어닐링 영상 스위프의 속도가 500m/s이고 ICD의 공간 분해도가 30 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 이면 각각의 픽셀은 시간에서의 60ns를 나타내고 50ns의 노출을 가진 어닐링 영상

스위프의 영상은 60ns 시간 증분들로 분해될 수 있다. 더욱 구체적으로 스캐터 용융 검출기(280), 예를 들어 도 4a에 예시된 예는 어닐링 레이저(250)의 최적화를 위해 실용적이고 유용한 단일 프레임에서의 모든 포인트들

$x = v \cdot (t \pm t_d)$ 을 공간적으로 분해함으로써 주파수들 $f \leq \frac{1}{t_d}$ 에서 용융 작용 및 균일성을 측정하기 위해 사용될 수 있다. 도 4b에서와 같이 공정 레이저 빔과 별개인 펄스형 프로브가 사용되는 예들에서는 더 큰 주파수들에서의 데이터가 얻어질 수 있다.

[0055] 몇몇 예들에서 어닐링 영상(270)의 스위프에 걸쳐 스캐닝 레이저 빔(268)의 광 전력 밀도에 있어서의 작은 변동성이 있을 수 있다. 따라서 어닐링 레이저 시스템(250)을 교정하는 방법은 교정 공정으로부터의 스위프를 따라서 광 전력에 있어서의 변동성으로부터의 임의의 효과를 제거하기 위해 복수의 스위프에 걸친 스위프에서의 특정 포인트에서 스캐터 용융 검출기(280)로부터의 용융 신호를 분석하는 것을 포함할 수 있다. 예로서 도 9b에서의 위치(902)는 위치(902)에서의 복수의 스위프로부터의 용융 신호가 분석될 수 있는 특정 스위프 위치를 예시한다. 예를 들어 어닐링 레이저 시스템(250)의 전력 레벨은 용융이 검출되는 어닐링 영상의 스위프의 퍼센트를 식별하기 위해 증분적으로 예를 들어 전체 전력의 퍼센트의 부분들로 조정될 수 있다. 예를 들어 주어진 척온도 T_{ch} 및 드웰 시간 t_{dwell} 에 대해, 용융 임계값 에너지 밀도 $E_m(T_{ch}, t_d)$ 이 존재하고 전달되는 실제의 에너지 밀도는 $E_m \pm \delta_E$ 이다. 전력이 용융 임계값을 때때로 충돌하기 때문에 용융이 설정점 전력 $E_m - \delta_E$ 에서 드물게 검출된다. 용융은 공정의 범위 이상에서 $E_m + \delta_E$ 에서 항상 검출된다. 일련의 스트립들에 걸쳐 스캐닝 레이저 빔(268)의 전력을 $E_m - \delta_E$ 에서 $E_m + \delta_E$ 로 변화시킴으로써 그리고 용융이 특정 스위프 위치(예를 들어 위치(902))에서 검출되는 시간 퍼센트를 분석함으로써 E_m 및 δ_E 모두가 그 미만에서는 용융이 검출되지 않고 그 위에서는 스위프들의 모두 또는 실질적으로 모두에서 용융이 존재하는 에너지로부터 독립적으로 식별될 수 있다. 예에서 어닐링 공정 동안에 스캐닝 레이저 빔(268)의 전력 레벨이 어닐링 영상 스위프에 걸쳐 증분적으로 변화된다. 따라서 전술한 교정 공정은 어닐링 영상의 전체 스위프에 걸쳐 용융 임계값 전력 레벨 설정치를 결정하기 위해 복수의 스위프 위치에서 반복될 수 있다.

[0056] 제어기

[0057] 도 10은 제어기(300), 스테이지 제어기(124) 및 용융 검출기(280)을 위한 기능성을 제공하기 위한 것을 비롯한, 본 개시의 어닐링 시스템들과 같이 사용될 수 있는 하나 이상의 컴퓨팅 장치들(1000)의 하나의 예시적인 구현의 물리적 소자들을 나타내는 블록도이다. 칩셋(1004)에 결합된 적어도 하나의 프로세서(1002)가 예시되어 있다. 메모리(1006), 네트워크 어댑터(1008) 및 통신 모듈(들)(1010)이 칩셋(1004)에 또한 결합되어 있다. 주변 장치들(1012) 및 디스플레이(1014)가 컴퓨팅 장치(1000)에 결합된다. 다른 실시예에서 메모리(1006)이 프로세서(1002)에 직접 연결된다. 저장 장치(1016)는 또한 칩셋(1004)에 결합된다.

[0058] 저장 장치(1016)는 하드 디스크, 콤팩트 디스크 판독전용 메모리(CD-ROM) 또는 고체상태 메모리 장치와 같은 임의의 비일시적 컴퓨터 판독가능 저장 매체일 수 있다. 저장 장치(1016)는 레이저 어닐링 시스템들의 기술분야에서 알려진 바의 어닐링 시스템과 통신하는 컴퓨터 저장 장치에 저장될 수 있는 임의의 소프트웨어 또는 데이터를 포함할 수 있다. 도 10은 또한 용융 임계값들(1022) 및 어닐링 레이저 용융 교정 설정치들(1024) 뿐만 아니라 저장 장치(1016)에 저장될 수 있는 응용들(1020)의 비제한적인 예시적인 리스트를 나타낸다.

[0059] 예시된 예에서 응용들(1020)은 예를 들어 스캐터 용융 검출기(280)의 ICD(406)와 같은 스캐터 용융 검출기의 ICD를 제어하기 위한 명령어들을 포함하는 영상 처리 응용(1032) 및 ICD 제어 응용(1030)을 포함한다. ICD 제어 응용(1030)은 프레임 속도 및 셔터 속도와 같은 기능들을 제어하기 위한 그리고 ICD의 FPA(들)에 의해 생성된 신호들을 처리하기 위한 명령어들을 포함할 수 있다. 영상 처리 응용(1032)은 어닐링 영상을 포함하는 FOV를 가지는 스캐터 검출기 경로로부터 수집된 광을 분석하기 위해 하나 이상의 영상 처리 알고리즘들을 수행하도록 구성될 수 있다.

[0060] 여기에 기술된 바와 같이 예를 들어 어닐링 영상(270)과 같은 어닐링 영상이 웨이퍼 표면(12) 상에서의 또는 그 아래에서의 물질이 용융하기 시작하도록 야기할 때, 스캐터 용융 검출기에 의해 수집되는 광의 강도에 있어서의 상당한 증가를 야기하는, 물질의 광학 특성에 있어서의 실질적인 변화들이 일어난다. 영상 처리 응용(1032)은 다양한 영상 처리 알고리즘들의 임의의 것을 사용하여 ICD에 의해 수집된 광의 강도에 있어서의 증가를 식별하

도록 구성될 수 있다. 예를 들어 피팅 알고리즘들, 에지 검출 알고리즘들, 아이젠거저 분해들, 피드포워드 분류기들 중의 하나 이상 또는 용융 임계값을 초과하는 캡처된 영상 프레임에서의 임의의 강도 또는 웨이퍼 물질의 액체 및 고체 상태들 간의 인터페이스에 의해 야기되는 광 스캐터링 효과에 해당되는 강도 값의 검출. 예에서, 영상 처리 응용(1032)은 예를 들어 레이저 빔(268)과 같은 공정 빔에 의해 형성된 어닐링 영상(270) 보다 더 작은 영역에서 ICD에 의해 수집된 광의 강도에 있어서의 증가를 식별하도록 구성될 수 있다. 예에서, 영상 처리 응용(1032)은 광 강도들을, 광 강도를 아래 용융 강도들 및 레이저 전력 레벨들에 관련시키는 서로 다른 크기의 용융 풀들 또는 임계값들에 대해 스캐터 용융 검출기(280)에 의해 캡처된 광의 강도에 해당되는 임계값들을 포함할 수 있는 용융 임계값들(1022)과 비교할 수 있다. 예로서 도 3c를 참조하면 영상 처리 응용(1032)은 주위의 프로브 빔의 것 위에서의 상대적 스캐터링 강도를 초과하는 스캐터 검출기 경로(402 또는 416)를 따라 캡처된 광의 강도를 검출함으로써 용융의 개시 및 용융 풀(310) 및 대응하는 인터페이스(312)의 형성을 검출하도록 구성될 수 있다. 예에서 임계값들은 서브 용융되고 스캐터링된 빔 광 강도 프로파일로 정규화될 수 있다. 또한 영상 처리 응용(1032)은 비 용융 스캐터러들에 의해 야기되는 이산적 폴스 신호들 및 참의 용융 신호 간을 구분하기 위해 용융 임계값을 초과하는 광의 강도를 포함하는 영상 프레임의 공간 밀도 및 공간 범위를 분석하도록 구성될 수 있다. 영상 처리 응용(1032)은 고 강도 신호가 중첩되거나 어닐링 영상 또는 어닐링 조명 라인에 바로 인접해 있음을 검증하기 위해 고 강도 신호의 공간적 위치를 움직이는 어닐링 영상(270)의 알려진 위치 및/또는 어닐링 조명 라인(272)의 위치와 비교하도록 구성될 수 있다.

[0061] 도 11은 어닐링 공정 동안 ICD(406)에 의해 캡처되는 예시적인 영상 프레임(1100)의 부분을 개념적으로 예시한다. 도 11은 픽셀들(1102)의 그리드 및 조명 라인(272)의 부분을 나타낸다. 영상 프레임(1100)은 스테이지 스캔 방향과 정렬되고 도 11에서 y로 레이블링된 복수의 컬럼(1104a 및 1104b로 레이블링된 2개의 컬럼들) 및 어닐링 영상 스위프 방향과 정렬되고 도 11에서 x로 레이블링된 복수의 로우(1106)(1106a로 레이블링된 하나의 로우)로 구성된다. 크로스 해치 셰이딩은 주어진 컬럼(1104)을 따라 픽셀들의 변화하는 그레이 레벨들의 예를 예시하기 위해 픽셀들의 하나의 컬럼에 포함된다.

[0062] 도 12 내지 도 14는 영상 처리 응용(1032)(도 10)과 같은 영상 처리 응용이 수행하도록 구성될 수 있는 용융 검출 알고리즘들의 예들을 예시한다. 도 12는 아래 용융 기준 영상들 및 연관 파라미터들을 생성하는 예시적인 방법(1200)을 예시한다. 블록(1203)에서 방법(1200)은 아래 용융 웨이퍼를 어닐링하고 스캐터 용융 검출기로 영상 프레임들을 캡처하고 어닐링 레이저 전력 레벨을 기록하는 것을 포함할 수 있다. 예에서 레이저 전력은 어닐링 레이저 빔(268)과 같은 어닐링 레이저 빔의 광 전력 밀도에 대응하는 전압 V_{ref} 를 생성하는 온보드 검출기(OBD)로 측정될 수 있다. 다른 예들에서 레이저 전력을 모니터링하기 위한 임의의 다른 센서 기술 또는 기법이 사용될 수 있다. 블록(1203)은 또한 특정 웨이퍼 설계에 대응하는 유일한 식별 번호와 같은 웨이퍼 타입 정보를 수신하는 것을 포함할 수 있다. 블록(1203)에서 영상 프레임(1100)(도 11)과 같은 영상 프레임들이 캡처된다. 따라서 블록(1203)은 용융을 검출하기 위해 용융 공정 동안에 기준 대조 데이터로서 사용될 수 있는 스캐터 용융 검출기(280)와 같은 스캐터 용융 검출기로 아래 용융 영상 데이터를 수집하기 위해 웨이퍼 물질을 용융시킬 수 있는 전력 레벨 아래의 어닐링 레이저 전력 레벨에서 어닐링 공정을 수행하는 것을 포함할 수 있다.

[0063] 블록(1205)에서 방법(1200)은 영상에서의 웨이퍼의 에지를 포함하는 임의의 영상들을 제외한, 복수의 영상 프레임의 픽셀 값들을 평균하는 것을 포함할 수 있는, 캡처된 영상 프레임들로부터 아래 용융 기준 영상 I_{ref} 를 생성하는 것을 포함할 수 있다. 블록(1207)에서 복수의 아래 용융 1차원 스테이지 스캔 방향 강도 프로파일들을 생성하기 위해 아래 용융 기준 영상을 처리한다. 블록(1207)은 스테이지 스캔 방향에서의 픽셀들의 하나 이상의 컬럼들(1104)에 대해 1차원 피크 검출 알고리즘 또는 피팅 알고리즘을 실행하는 것 및 각각의 1차원 강도 프로파일에 대한 진폭 $A_{ref}(x)$, 폭 $w_{ref}(x)$ 및 무게 중심 또는 최대 위치 $y_{0,ref}(x)$ 와 같은 파라미터들을 생성하는 것을 포함할 수 있는데, 여기서 예에서 $w_{ref}(x)$ 는 $y_{0,ref}(x)$ 로부터의 $\pm y$ 거리이고 전체 폭은 $2 \cdot w_{ref}(x)$ 이다. 여기서 y는 스테이지 스캔 방향을 나타내고 x는 스위프 방향을 나타낸다(도 11 참조). 블록(1207)은 따라서 y 방향을 따라서 각각의 컬럼(1104) 또는 일 군의 컬럼들의 강도의 프로파일을 반환한다. 블록(1207)은 또한 복수의 프로파일을 스위프 프로파일로서 저장하는 것을 포함할 수 있다.

[0064] 블록(1209)에서 영상에서의 조명 라인(272)의 공간적 위치에 대응하는, 여기서 ROI_{ref} 가 언급되는 아래 용융

기준 영상의 관심영역(ROI)이 식별될 수 있다. ROI_{ref} 는 스위프 프로파일들 내에 놓인 최소 값 위의 강도를 가진 픽셀들을 식별함으로써 결정될 수 있다. 예에서 ROI_{ref} 는 예를 들어 어닐링 영상 외부에 있고 $y = y_{0,ref}(x) \pm 2 w_{ref}(x)$ 내에 놓인 y 위치를 가지는 백그라운드에 해당하는 그레이 레벨들, 예를 들어 FPA의 255개의 그레이 레벨들의 스케일 상에서의 2개의 그레이 레벨들의 개수 더하기 검은 레벨 보다 더 큰 진폭을 가진 기준 영상에서의 픽셀들과 같은 블록(1207)에서 결정된 스위프 프로파일 파라미터들로부터 결정된다. 블록(1211)에서 방법(1200)은 예를 들어 각각의 로우(1106)에서 ROI_{ref} 내의 픽셀들의 그레이 레벨들을 합산하고 컬럼들(1104)의 개수로 나눔으로써 평균 1차원 스테이지 스캔 방향 강도 프로파일을 생성하는 것을 포함할 수 있다(도 11 참조).

[0065] 도 13은 용융이 영상 프레임에서의 진폭들의 비선형성으로부터 검출되는 용융 검출 알고리즘의 하나의 예시적인 방법(1300)을 예시한다. 블록(1303)에서 방법(1300)은 용융 임계값 아래에서, 그에서 또는 그 위에서 웨이퍼를 어닐링하는 것, 스캐터 용융 검출기로 영상 프레임들을 캡처하는 것 및 영상들이 캡처되었을 때 어닐링 레이저 빔의 전력 레벨을 나타내는, 여기서 V_{melt} 라 불리는 대응하는 OBD 전압들을 기록하는 것을 포함할 수 있다. 블록(1303)은, 방법(1200)에서 획득된 근사적인 아래 용융 기준 데이터가 참조될 수 있도록 유일한 ID와 같은 웨이퍼 정보를 수신하는 것을 포함할 수 있다. 블록(1305)에서 방법(1300)은 동일 레이저 전력 레벨에서 수행되는 스위프들의 영상 프레임들의 모두를 평균하고 웨이퍼의 에지를 포함하는 임의의 프레임들을 제외시키고 평균된 영상을 저장함으로써 캡처된 영상 프레임들로부터 평균된 영상을 생성하는 것을 포함할 수 있다. 블록(1307)에서 블록(1305)에서 생성된 평균 영상을 동일한 웨이퍼 타입에 대한 대응하는 아래 용융 기준 영상과 비교하는 용융 검출 영상 I_{data} 이 생성된다. 예에서 블록(1305)로부터의 평균 영상의 픽셀값들 및 대응하는 레이저 전력 값들이 도 12의 블록(1205)에서 생성된 아래 용융 기준 영상에서의 픽셀 값들 및 $\frac{I_{data}}{I_{ref}} \times \frac{V_{ref}}{V_{melt}}$ 와 같은 대응하는 레이저 전력들에 참조될 수 있다 - 여기서 I_{data} 는 블록(1207)에서 생성된 평균 영상의 픽셀 값들이고 I_{ref} 는 아래 용융 기준 영상의 픽셀 값들이고 V_{ref} 및 V_{melt} 는 대응하는 OBD 신호 값들임 -. 블록(1309)에서 용융 영상 값들이 임의의 용융이 영상에서 일어났는지를 결정하기 위해 예를 들어 1.1과 같은 임계값에 비교될 수 있다. 예를 들어 용융 영상에서의 ROI_{ref} 내의 픽셀 값들이 평균되고 임계값에 비교될 수 있다.

[0066] 블록(1309)을 수행하는 것에 부가하여 또는 그 대신에 본 방법은 레이저 빔의 폭 보다 작은 폭을 가지는 스테이지 스캔 방향에서의 좁은 피크들을 식별하기 위해 블록(1307)에서 생성된 용융 검출 영상의 1차원 프로파일 분석을 적용하는 것을 포함할 수 있다. 블록(1312)에서 식별된 피크들의 폭 $w(x)$ 를 결정하고 아래 용융 기준 영상의 $w(x)$ 를 폭에 비교한다. 식별된 피크들이 아래 용융 기준 영상의 폭 $w_{ref}(x)$ 보다 작은, 예를 들어 그 미만인 폭을 가진다면, 용융이 일어난 것으로 결정된다. 전술한 사항은 레이저 빔의 에너지 프로파일에 기초하고 더 큰 어닐링 영상(270)의 좁은 영역에서만 일어나는 용융을 야기하는 스테이지 스캔 방향 y에서의 가우시안 프로파일을 가정한다. 따라서 스테이지 스캔 방향에서의 어닐링 영상의 폭 보다 작은 (스위프 방향에 직교하는) 스테이지 스캔 방향에서의 폭을 가지는 강도에서의 검출된 피크는 어닐링 영상 매에서의 국부화된 용융 영역 또는 용융 풀을 나타낸다. 예로서 도 11을 참조하면 컬럼(1104)을 따른 픽셀들(1102a - 1102e)는 블록(1307)에서 생성된 용융 검출 영상의 서로 다른 진폭들을 나타내는 크로스 해칭을 포함한다. 예를 들어 방법(1300)은 픽셀들(1102c 또는 1102b - 1102d)가 예를 들어 임계값 위인 주위 픽셀들의 진폭 보다 더 큰 진폭을 가지고 스테이지 스캔 방향 y에서의 픽셀들(1102b - 1102c)의 폭이 어닐링 조명 라인(272)의 폭 또는 대응하는 ROI_{ref} 와 비교하여 충분히 좁다면 용융이 일어났다고 결정할 수 있다. 단계들(1311, 1313)은 높은 스캐터를 가지는 처리된 웨이퍼에 대해 가장 유용할 수 있고 고해상도 광학 장치를 가진 스캐터 용융 검출기로 성취될 수 있다.

[0067] 도 14는 용융 통계에 따른 방법(1400) 용융을 검출하기 위한 다른 예시적인 알고리즘을 예시한다. 블록(1403)에서 방법(1400)은 용융 임계값 아래에서, 그에서 또는 그 위에서 웨이퍼를 어닐링하고 스캐터 용융 검출기로

영상 프레임들을 캡처하고 OBD 전압 신호 V_{melt} 를 기록하는 것을 포함할 수 있다. 블록(1405)에서 영상 프레임들의 ROI_{ref} (단계(1209)에서 결정된) 내의 픽셀 값들의 표준편차를 계산한다. 예에서 블록(1405)은 ROI_{ref} 내의 픽셀 값들의 평균에 대한 ROI_{ref} 내의 픽셀 값들의 비율의 표준편차인 부분 표준편차를 계산하는 것을 포함할 수 있다. 큰 표준편차는 ROI_{ref} 내의 강도 값들에서의 넓은 변동성을 나타내고 도 9b에 도시된 예에서와 같이 위의 그리고 아래의 용융인 픽셀들에서의 큰 변동성이 있는, 용융 임계값에 레이저 전력이 설정되었음을 나타낸다. 블록(1407)에서 계산된 표준편차는 용융의 존재를 결정하기 위해 임계값과 비교된다. 방법(1400)은 베어 Si 웨이퍼들과 같은 최소한의 스캐터를 가지는 웨이퍼들에 대해 가장 유용할 수 있다.

[0068] 방법들(1200, 1300, 1400)은 웨이퍼 타입, 척 온도 및 드웰 시간의 특정 조합에 대한 레이저 전력 교정 테이블들 또는 커브들을 결정하기 위한 그리고 레이저 시스템을 교정하기 위한 것을 비롯하여, 특정 웨이퍼 타입 및 레이저 어닐링 공정을 위한 용융 검출 서브루틴으로서의 응용에 따라 선택적으로 사용될 수 있다. V_{ref} , ROI_{ref} , V_{melt} 와 같은 파라미터들 및 기준 데이터, 아래 용융 1차원 스테이지 스캔 방향 강도 프로파일들 등은 저장 장치(1016)에서와 같은 메모리에 저장될 수 있고 여기에 개시된 영상 처리 알고리즘들의 임의의 것을 수행하기 위한 영상 처리 응용(1032)에 의해 액세스될 수 있다.

[0069] 어닐링 레이저 제어 응용(1034)를 가지는 컴퓨팅 장치(1000)는 응용에서의 또는 그 위에서의 임계값에서 원하는 공정 조건을 성취하기 위해 사전 열처리 및/또는 어닐링 레이저 시스템들(150, 250)의 하나 이상의 파라미터들을 제어하도록 구성될 수 있다. 또한 어닐링 레이저 제어 응용(1034)은 어닐링 레이저 용융 교정 설정치들(1024)에 따라 어닐링 레이저 시스템(250)의 전력 레벨을 제어하도록 구성될 수 있다. 어닐링 레이저 용융 교정 설정치들(1024)는 특정 척 히터 온도, 어닐링 영상의 드웰 시간 및 웨이퍼(10)의 타입과 같은 공정 조건들의 특정 세트에 대해 부 응용, 용융 임계값 또는 용융 임계값 어닐링 조건을 성취하기 위한 레이저 전력 레벨 설정치들을 지정할 수 있다. 여기에 기술된 바와 같이 스캐터 용융 검출기(280)는 어닐링 레이저 용융 교정 설정치들(1024)을 결정하기 위해 어닐링 레이저 시스템(250)에 대한 용융 교정을 수행하기 위해 이용될 수 있다.

[0070] 예에서 ICD(406)은 어닐링 영상의 스위프 주파수 f_{sweep} 보다 작은 최대 노출 주파수를 가질 수 있다. 스캐터 용융 검출기(280)의 FOV는 적어도 하나의 어닐링 조명 라인(272)(즉 어닐링 영상의 적어도 하나의 스위프) 및 몇몇 경우들에서는 복수의 어닐링 조명 라인들(어닐링 영상의 복수의 연속적인 스위프들)을 포함할 수 있다. 따라서 ICD(406)의 한번의 노출에 의해 캡처된 단일의 영상은 적어도 하나 및 몇몇 경우들에서는 어닐링 영상(270)의 복수의 스위프를 포함할 수 있다. 영상 처리 응용(1032)은 물질 상 전이의 알려진 강도 프로파일에 대한 미리 결정된 정보를 이용할 수 있고, 용융 공정의 일관성을 특성화하거나 FFT로 용융 검출을 단순화하기 위한 공간 록인 주파수로서 기능하기 위해 하나 이상의 영상 프레임들로부터의 복수의 스위프의 캡처된 강도로부터 하나 이상의 통계적 상관 함수들을 추출할 수 있다.

[0071] 본 개시의 스캐터 용융 검출기들이 공정 레이저, 예를 들어 프로브 광 소스(410)(도 4b)와 별도의 프로브를 포함하는 예들에서, 응용들(1020)은 프로브 광 소스(410)에 의해 방사되는 펄스 방사의 강도, 위상 및/또는 주파수 및/또는 가변되는 길이 및 주기의 ICD(406)의 노출 타이밍과 같은 센서 노출 및/또는 프로브에 의해 방사되는 방사의 펄스 타이밍을 제어하기 위한 프로브 제어 응용(1036)을 포함할 수 있다. 프로브 제어 응용(1036)은

공통 클럭을 통해 스위프 주파수 f_{sweep} 로 프로브 및 ICD를 동기화하고 프로브(410)에 대한 펄스 주파수 f_{probe} 및 펄스 위상 ϕ_{probe} 및 ICD 노출 $f_{exposure}$ 을 스위프 주파수, 스위프 위상 및 측정될 웨이퍼 물질 상전이 공정의 측면의 함수로서 결정하기 위한 명령어들을 포함할 수 있다. 하나의 예에서 f_{probe} 및 $f_{exposure} \ll f_{sweep}$ 이므로 ICD 노출 당 n_{probes} 가 1이 된다. 하나의 예에서 주파수 비율 $R = f_{sweep} / f_{probe}$ 은 정수일 수 있어서 상전이 공정의 안정성에 대한 통계가 추출될 수 있다. 하나의 예에서 f_{probe} 가 없을 수 있으나 알려진 시간들에서의 펄스들의 무작위 분포가 넓은 통계의 추출을 위해 수

집될 수 있다. 몇몇 예들에서 f_{Probe} 는 스위프 균일성을 결정하고 최적화하기 위해 f_{sweep} 을 가진 레이저
 널 비트 주파수(rational beat frequency)일 수 있다. 하나의 예에서 프로브 펄스 주파수 f_{Probe} 는,
 f_{Probe} 가 x 방향으로의 어닐링 영상(270)의 스위프들과 동기되도록, 어닐링 영상 스위프들의 세트에서의 동기
 된 순간들의 서브세트가 개별적인 펄스들로 프로빙되어 복수의 펄스들이 ICD(406)에 의해 단일의 영상 프레임으
 로 수집되고 상전이의 높은 대역폭 일관성이 용융 영역의 콘트라스트로부터 추출될 수 있도록 선택된다. 몇몇
 예들에서 프로브(410)는 3ns -20ns, 몇몇 경우들에서는 5ns - 15ns 그리고 몇몇 경우들에서는 5ns -10ns의 기간
 을 가지는 광 펄스들을 방사하도록 구성된다.

[0072] 메모리(1006)는 프로세서(1002)에 의해 사용되는 명령어들 및 데이터를 유지할 수 있다. 네트워크 어댑터
 (1008)는 컴퓨팅 장치(1000)를 근거리 또는 광역 네트워크에 결합시키고 통신 모듈들(1010)은 유선 또는 무선
 통신을 위한 추가의 채널들을 제공한다. 본 기술분야에 알려진 바와 같이 컴퓨팅 장치(1000)는 도 10에 도시된
 것들과 다른 및/또는 그것 이외의 소자들을 가질 수 있다. 추가로 컴퓨팅 장치(1000)는 특정의 예시된 소자들
 이 빠져있을 수 있다. 몇몇 예들에서 저장 장치(1016)는 별도의 저장 장치, 콜드 저장 장치, 저장 역역 네트워
 크(SAN) 또는 클라우드 기반의 저장 구조와 같이 컴퓨팅 장치(1000)로부터 근거리에 및/또는 원거리에 있을 수
 있다.

[0073] 잘 알려진 바와 같이 컴퓨팅 장치(1000)는 여기에 기술된 기능성을 제공하기 위한 컴퓨터 프로그램 모듈들을 실행하도록 적용된다. 여기서 사용되는 용어인 모듈은 지정된 기능성을 제공하기 위해 사용되는 컴퓨터 프로그램
 로직을 가리킨다. 따라서 모듈은 하드웨어, 펌웨어 및/또는 소프트웨어로 구현될 수 있다. 하나의 실시예에서
 프로그램 모듈들은 저장 장치(1016)에 저장되고 메모리(1006)에 로드되고 프로세서(1002)에 의해 실행된다.

[0074] 본 개시의 몇몇 부분들은 알고리즘 공정들 또는 동작들에 의해 예들을 기술한다. 이러한 알고리즘적 설명들과
 표현들은 당업자에게 그들 작업의 본질을 효율적으로 전달하기 위해 데이터 처리 기술에 숙련된 자들에 의해 주
 로 사용된다. 기능적으로, 계산적으로 또는 논리적으로 설명되기는 하나 이러한 동작들은 프로세서 또는 균등
 한 전기 회로들, 마이크로코드 또는 이와 유사한 것에 의해 실행되기 위한 명령어들을 포함하는 컴퓨터 프로그
 램들에 의해 구현되는 것으로 이해된다. 더욱이 기능적 동작들의 이러한 배열들을 일반성을 해치지 않고 모듈
 들로서 언급하는 것이 때때로 편리한 것으로 입증되었다.

[0075] 도 10이 단일의 컴퓨팅 장치(1000) 및 저장 장치(1016)를 예시하기는 하나 컴퓨팅 장치(1000) 및 저장 장치
 (1016)에 의해 제공되는 기능성 및 저장기 컴퓨팅 장치들 및 저장 장치들의 임의의 개수로 구현될 수 있음이 이
 해될 것이다. 예로서 제1 컴퓨팅 장치(1000)는 제어기(300)를 구현하기 위해 사용될 수 있고 하나 이상의 다른
 컴퓨팅 장치들(1000)은 스테이지 제어기(124), 척 히터, 용융 검출기(280) 등과 같이 여기에 개시된 다른 기능
 성을 실행하기 위해 사용될 수 있다.

[0076] 컴퓨팅 장치(1000)는 유선 및/또는 무선 통신 시스템들을 사용하는, 근거리 및/또는 광역 네트워크들의 임의의
 조합을 포함할 수 있는 하나 이상의 네트워크들을 통해 시스템(100)우 다른 컴퓨팅 장치들과 통신하도록 구성
 될 수 있다. 하나의 실시예에서 네트워크는 표준 통신 기술들 및/또는 프로토콜들을 사용한다. 예를 들어 네
 트워크는 Ethernet, 802.11, worldwide interoperability for microwave access (WiMAX), 3G, 4G, code
 division multiple access (CDMA), digital subscriber line (DSL) 등과 같은 기술들을 이용하는 통신 링크들
 을 포함한다. 네트워크를 통해 통신하기 위해 사용되는 네트워킹 프로토콜들의 예들은 multiprotocol label
 switching (MPLS), transmission control protocol/Internet protocol (TCP/IP), hypertext transport
 protocol (HTTP), simple mail transfer protocol (SMTP) 및 file transfer protocol (FTP)을 포함한다. 네
 트워크를 통해 교환되는 데이터는 hypertext markup language (HTML) 또는 extensible markup language (XML)
 와 같은 임의의 적절한 포맷을 사용하여 나타낼 수 있다. 다른 적절한 기법들을 이용한 암호화가 네트워크의
 성질에 기반한 다양한 응용들에 대해 적절할 수 있음을 당업자는 인식할 것이다.

[0077] 본 개시의 예들은 스캐터 영상 데이터를 분석하는 방법을 포함한다. 본 방법은 반도체의 레이저 어닐링 공정
 동안 캡처된 반도체 표면의 영역의 스캐터 영상을 수신하는 것 및 영상으로부터 반도체 물질의 고체에서 액체로
 의 물질 상전이를 식별하는 것을 포함하는데, 여기서 위의 식별하는 것은 영상 강도의 통계적, 시계열적 또는
 기하학적 비선형적 변동을 하나 이상의 어닐링 공정 제어 파라미터들의 함수로서 식별하는 것을 포함한다. 몇
 몇 예들에서 상기 하나 이상의 어닐링 공정 제어 파라미터들은 레이저 전력 또는 광 전력 밀도를 포함한다.

[0078] 또한 본 개시의 예들은 반도체 물질에 대한 레이저 어닐링 공정에 대한 용융 교정을 수행하는 방법을 포함한다.

본 방법은 어닐링 레이저로부터의 어닐링 레이저 빔으로 반도체 물질의 영역을 어닐링하는 것 - 여기서 위의 어닐링하는 것은 어닐링 레이저의 전력 레벨을 반도체 물질의 고체에서 액체로의 상전이가 일어나는 용융 임계값 전력 레벨 아래로 그리고 위로 증분적으로 변화시키는 것을 포함함 -, 어닐링 동안에 반도체 물질의 영역의 스캐터 영상들을 캡처하는 것 및 캡처된 스캐터 영상들로부터 어닐링 레이저를 위한 적어도 하나의 용융 임계값 설정치 전력 레벨을 결정하는 것을 포함한다.

[0079] 본 개시의 예들은 레이저 어닐링 공정 동안에 어닐링 레이저 동작 파라미터를 제어하기 위한 방법을 포함한다. 본 방법은 이전 단락에서 기술된 방법을 수행함으로써 생성된 레이저 어닐링 온도 교정에 따라 반도체 물질의 어닐링 공정 동안에 어닐링 레이저의 동작 파라미터를 제어하는 것을 포함한다.

[0080] 또한 본 개시의 예들은, 레이저 어닐링 시스템의 제어기의 프로세서가, 여기에 개시된 방법들에 따라 결정된 적어도 하나의 어닐링 레이저 용융 임계값 교정 설정치 및 어닐링 공정 파라미터에 따라 어닐링 레이저를 제어하도록 야기하도록 구성된 머신 판독가능한 명령어들을 포함한다.

[0081] 본 개시의 예들은 아래 용융 기준 영상들 및 용융 검출 알고리즘과 함께 사용하기 위한 파라미터들을 현성하는 방법을 포함한다. 본 방법은 아래 용융 웨이퍼를 어닐링하는 것, 스캐터 용융 검출기로 영상 프레임들을 캡처하는 것, 어닐링 레이저 전력 레벨을 기록하는 것, 캡처된 영상 프레임들로부터 아래 용융 기준 영상을 생성하는 것, 복수의 아래 용융 1차원 스테이지 스캔 방향 강도 프로파일들을 생성하기 위해 아래 용융 기준 영상을 처리하는 것, 아래 용융 기준 영상의 관심영역(ROI_{ref})을 식별하는 것 및 평균 1차원 스테이지 스캔 방향 강도 프로파일을 생성하는 것을 포함한다.

[0082] 본 개시의 예들은 웨이퍼 물질이 어닐링 공정 동안에 용융되었는지를 결정하는 방법을 포함한다. 본 방법은 용융 임계값 아래에서, 그에서 또는 그 위에서 웨이퍼를 어닐링하는 것, 어닐링 동안에 스캐터 용융 검출기로 영상 프레임들을 캡처하는 것 및 레이저 전력 레벨들을 기록하는 것, 캡처된 영상 프레임들로부터 평균된 영상을 생성하는 것 및 평균된 영상을 동일 웨이퍼 타입에 대한 대응하는 아래 용융 기준 영상에 참조하는 용융 검출 영상을 생성하는 것을 포함한다.

[0083] 단락 [0082]의 방법은 영상의 하나 이상의 영역들에서 용융이 일어났는지를 결정하기 위해 용융 검출 영상의 값들을 임계값에 비교하는 것을 더 포함한다.

[0084] 단락 [0082]의 방법은 공정 레이저 빔의 폭 보다 작은 폭을 가지는 스테이지 스캔 방향에서의 좁은 피크들을 식별하기 위해 용융 검출 영상의 1차원 프로파일 분석을 적용하는 것을 더 포함한다.

[0085] 단락 [0082]의 방법에서 아래 용융 기준 영상은 여기에 개시된 시스템들의 임의의 것을 이용하는 방법들의 임의의 것을 수행함으로써 획득되었다.

[0086] 본 개시의 예들은 또한 웨이퍼 물질이 어닐링 공정 동안에 용융되었는지를 결정하는 방법을 포함한다. 본 방법은 용융 임계값 아래에서, 그에서 또는 그 위에서 웨이퍼를 어닐링하는 것 및 스캐터 용융 검출기로 어닐링 동안에 영상 프레임들을 캡처하는 것, 영상 프레임들의 관심영역(ROI_{ref}) 내에서의 픽셀 값들의 통계적 변동을 계산하는 것 - ROI_{ref} 는 어닐링 레이저 영상이 웨이퍼 상에서 형성된 영상의 영역임 -, 및 용융의 개시를 식별하기 위해 계산된 통계적 변동을 비교하는 것을 포함한다.

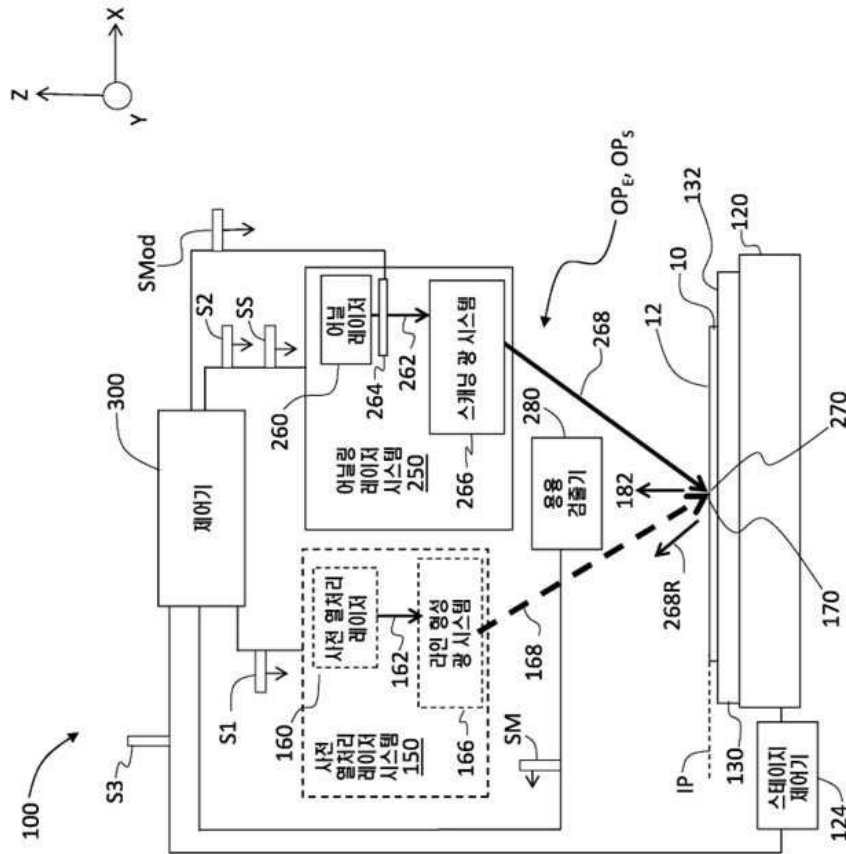
[0087] 이상은 본 개시의 예시적 실시예들의 상세한 설명이었다. 본 명세서 및 첨부된 청구항들에서 'X, Y 및 Z 중의 적어도 하나' 및 'X, Y 및 Z의 하나 이상'과 같은 구절에 사용되는 것과 같은 접속어는 특히 언급하거나 달리 나타내지 않는 경우 접속어 목록에서의 각각의 항목이 목록에서의 하나 걸러서의 항목의 임의의 개수 또는 접속어 목록에서의 임의의 또는 모든 다른 항목(들)과 결부된 의의의 개수에 존재할 수 있고 그 각각이 또한 임의의 개수로 존재할 수 있는 것을 의미하는 것으로 받아들여져야 할 것임이 주목된다. 이러한 일반적 규칙을 적용하면 접속어 목록이 X, Y 및 Z로 구성되는 전술한 예들에서의 접속어 구절들은 각각 다음을 포괄할 것이다: X의 하나 이상, Y의 하나 이상, Z의 하나 이상, X의 하나 이상 및 Y의 하나 이상, Y의 하나 이상 및 Z의 하나 이상, X의 하나 이상 및 Z의 하나 이상 및 X의 하나 이상, Y의 하나 이상 및 Z의 하나 이상.

[0088] 다양한 변경들 및 부가들이 본 개시의 정신 및 범위를 벗어나지 않고 이루어 질 수 있다. 위에서 기술된 다양한 실시예들의 각각의 특징들은 연관된 새로운 실시예들에서의 복수의 특징 조합들을 제공하기 위해 필요한 만큼의 다른 기술된 실시예들의 특징들과 조합될 수 있다. 더욱이 전술한 사항은 여러 별도의 실시예들을 기술하지만 여기에 기술된 것은 본 개시의 원리들의 적용을 단지 예시한 것이다. 부가적으로 여기서의 특정 방법들이

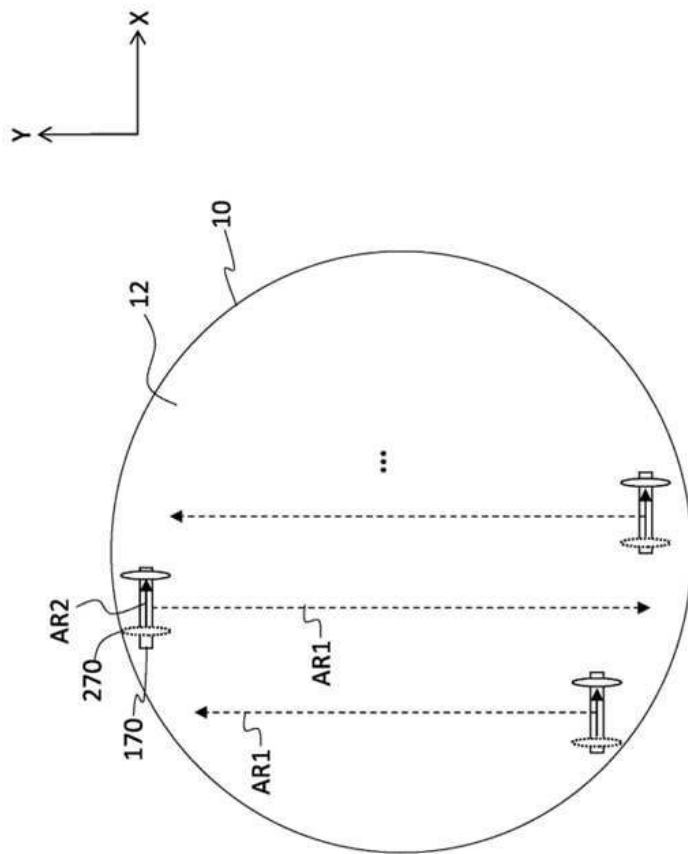
특정 순서로 수행되는 것으로 예시되고 기술될 수 있지만 이 순서는 본 개시의 측면들을 성취하기 위해 통상의 지식 내에서 고도로 가변적이다. 따라서 본 기술은 예로서만 받아들여질 의도인 것이고 본 개시의 범위를 달리 제한하고자 의도된 것이 아니다.

도면

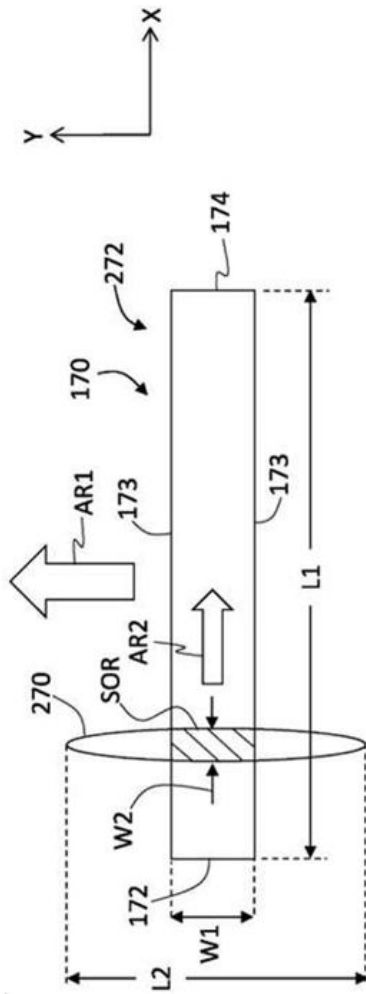
도면1



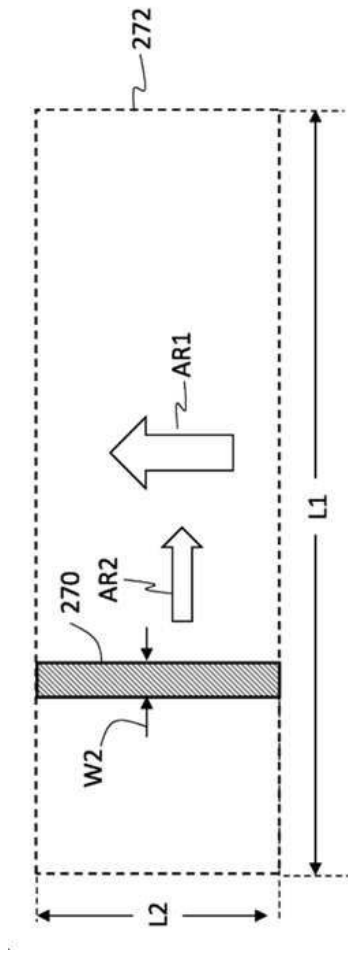
도면2



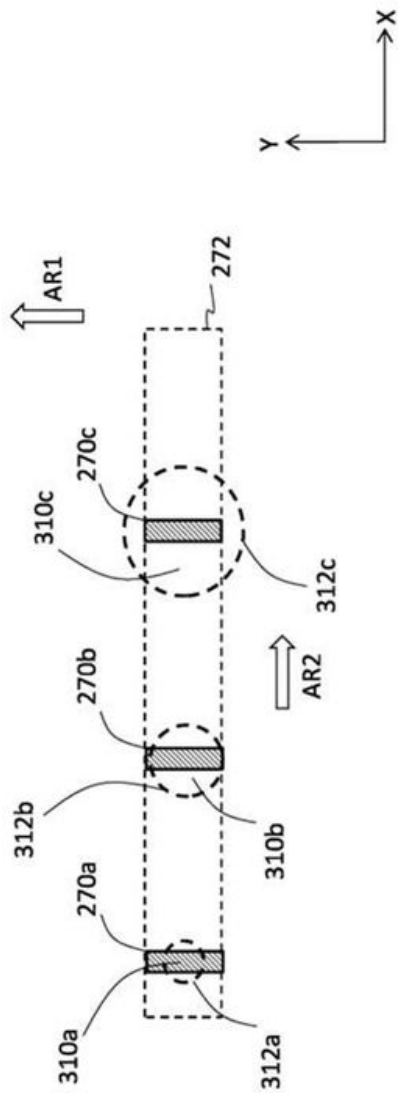
도면3a



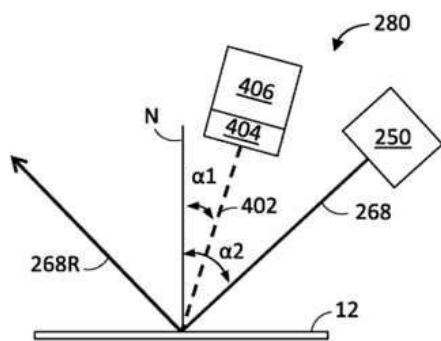
도면3b



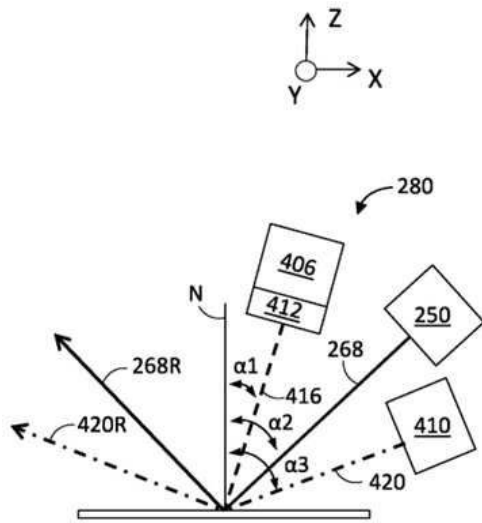
도면3c



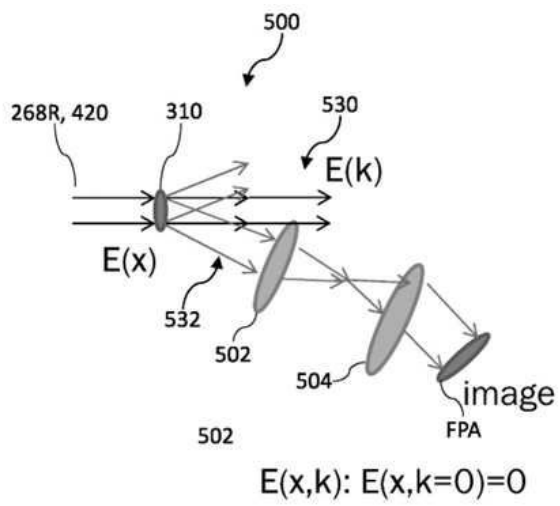
도면4a



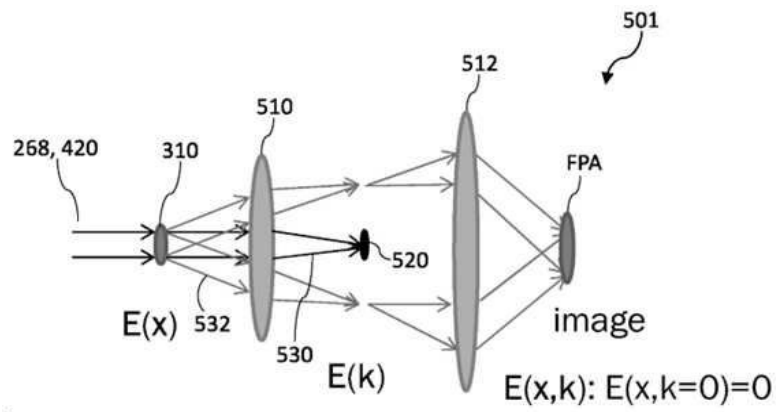
도면4b



도면5a



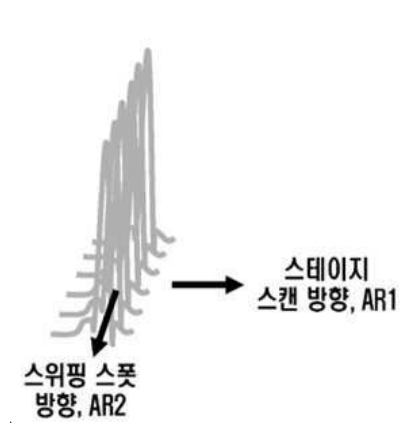
도면5b



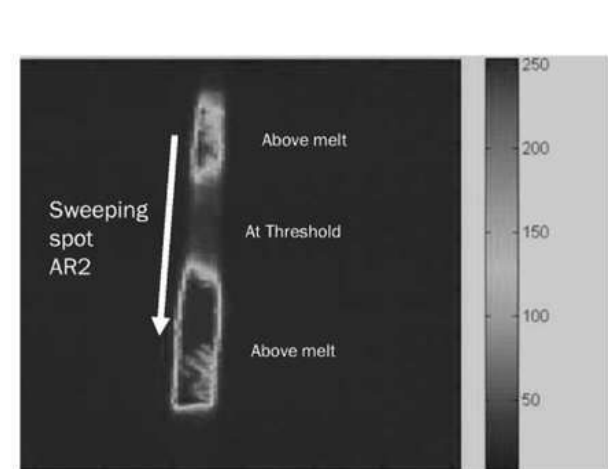
도면6a



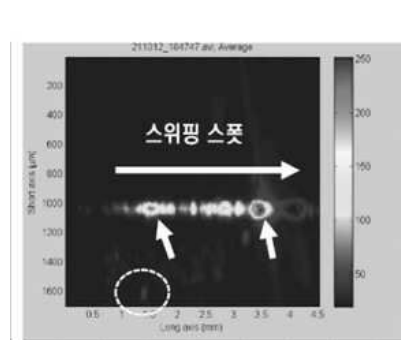
도면6b



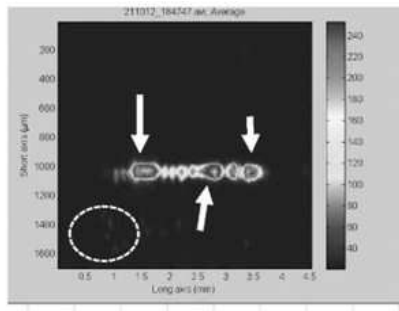
도면6c



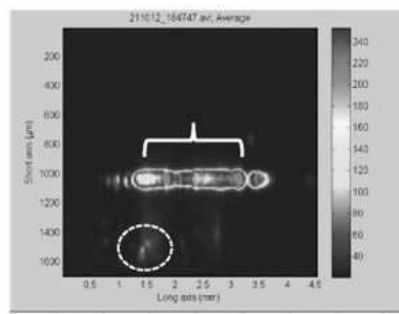
도면7a



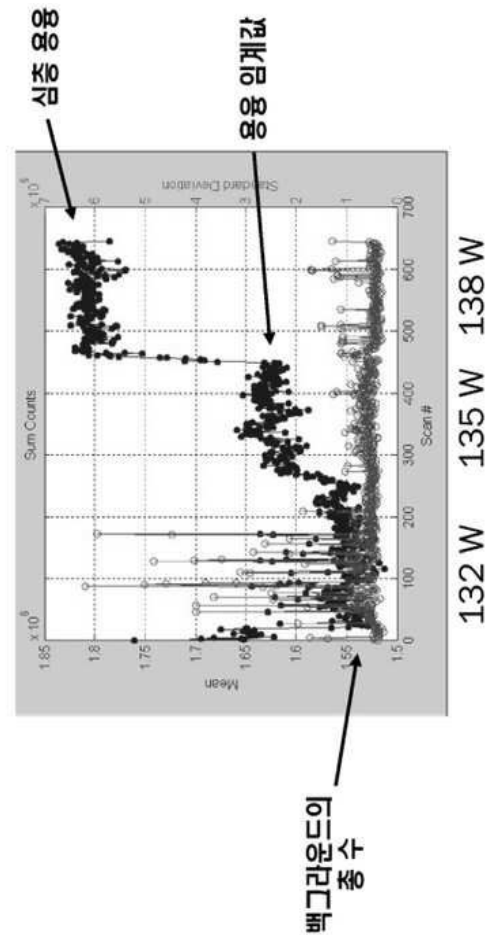
도면7b



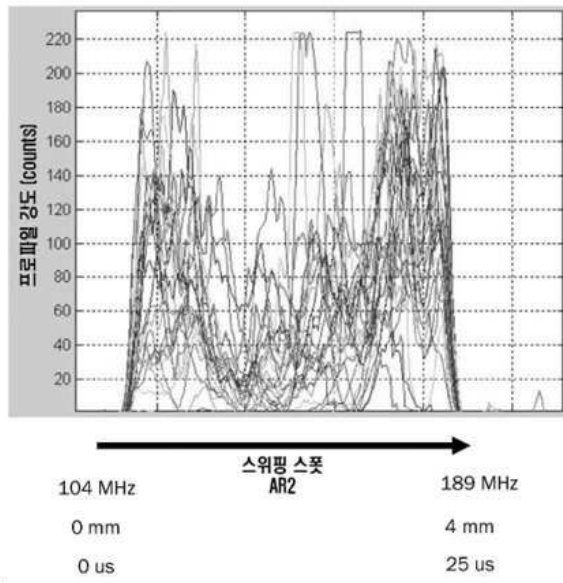
도면7c



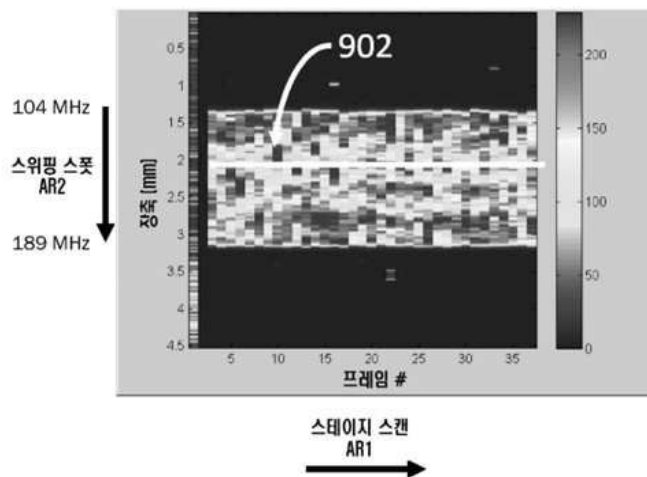
도면8



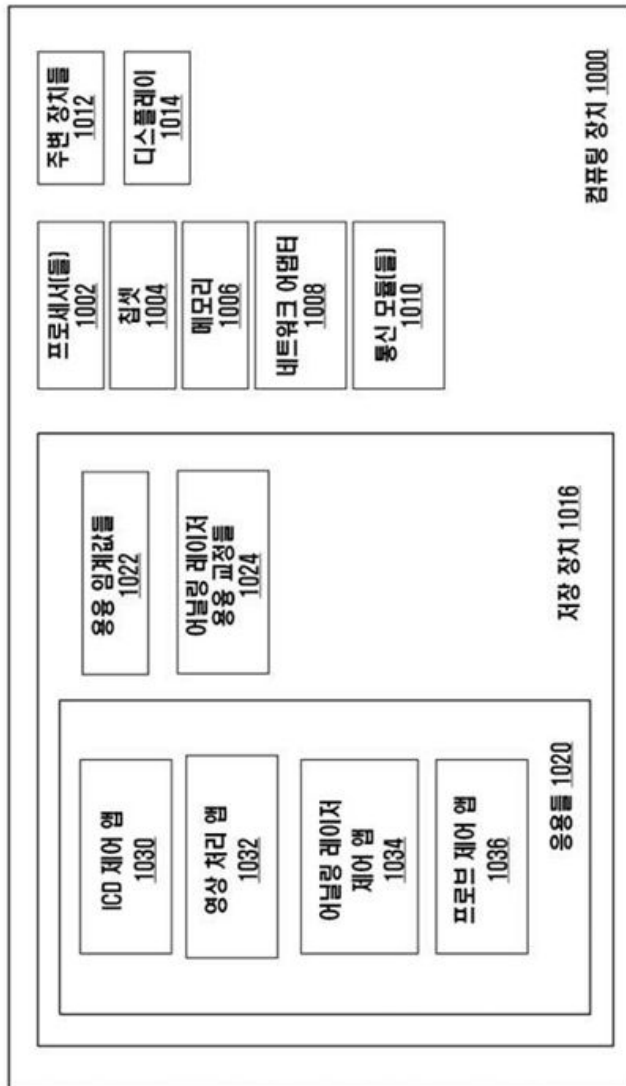
도면9a



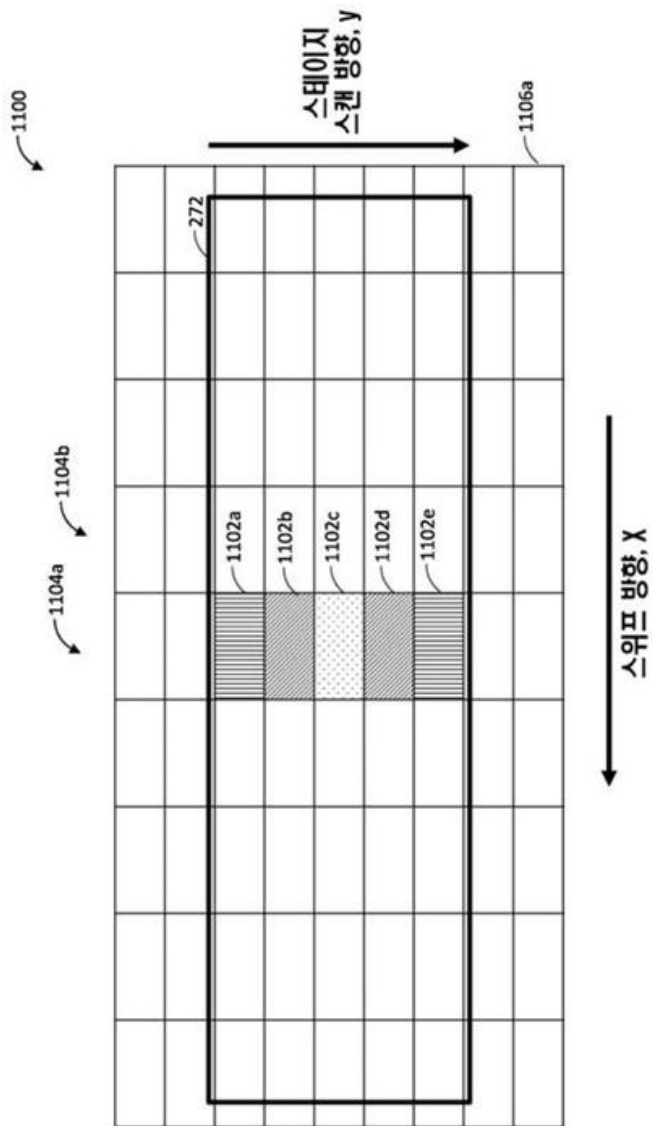
도면9b



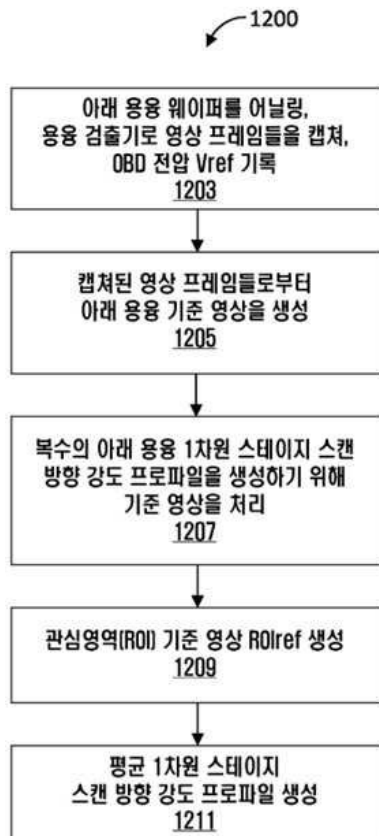
도면10



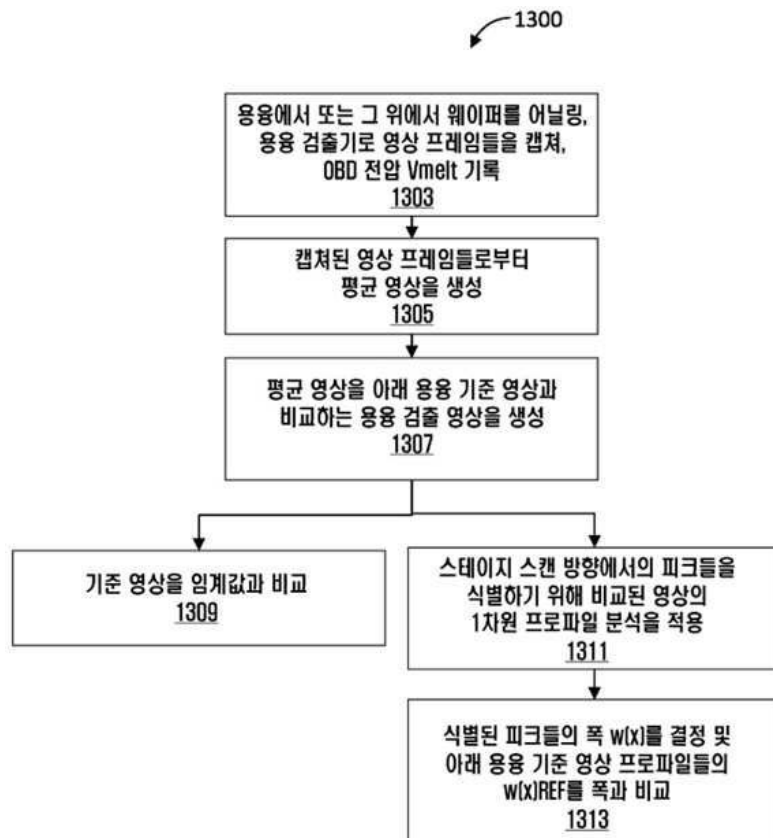
도면11



도면12



도면13



도면14

