



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2018년10월29일
(11) 등록번호 10-1913020
(24) 등록일자 2018년10월23일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G03F 7/20 (2006.01) G03F 1/60 (2012.01)
G03F 1/72 (2012.01) G03F 7/00 (2006.01)
H01L 21/66 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G03F 7/70591 (2013.01)
G03F 1/60 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2016-7028830
(22) 출원일자(국제) 2015년03월24일
심사청구일자 2016년10월17일
(85) 번역문제출일자 2016년10월17일
(65) 공개번호 10-2016-0134783
(43) 공개일자 2016년11월23일
(86) 국제출원번호 PCT/EP2015/056250
(87) 국제공개번호 WO 2015/144700
국제공개일자 2015년10월01일
(30) 우선권주장
61/970,289 2014년03월25일 미국(US)
(56) 선행기술조사문헌
US20070224522 A1*
US20120009511 A1
WO20120103933 A1
JP2012088712 A*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
칼 짜이스 에스엠에스 엘티디
이스라엘, 카미엘 21613, 마알레 카먼 44
칼 짜이스 에스엠티 게엠베하
독일 오버코헨 73447 루돌프-에버-슈트라쎈 2
(72) 발명자
드미트리브, 블라디미르
이스라엘, 카미엘 21721, 바즈 105
게, 번드
미국, 아리조나 85254, 스캇스데일, 이스트 제넨
드라이브 6845
(74) 대리인
한양특허법인

전체 청구항 수 : 총 57 항

심사관 : 박종민

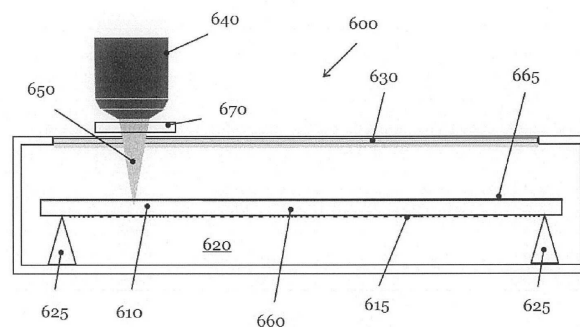
(54) 발명의 명칭 광학 부품 및/또는 웨이퍼의 미리 정해진 3차원 윤곽을 생성하는 방법 및 장치

(57) 요약

본 발명은 구성 부품 및/또는 웨이퍼의 미리 정해진 3차원 윤곽을 생성하는 방법에 관한 것이며, 이 방법은, (a) 상기 미리 정해진 3차원 윤곽으로부터 상기 구성 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 기준 3차원 윤곽의 편차를 결정하는 단계; (b) 상기 미리 정해진 3차원 윤곽으로부터 상기 3차원 윤곽의 상기 결정된 기준 편차를 정정하기 위한

(뒷면에 계속)

대표도 - 도6



레이저 펄스를 정의하는 하나 이상의 파라미터 세트를 갖는 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 계산하는 단계; 및 (c) 상기 미리 정해진 3차원 윤곽을 생성하기 위해, 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼에 가하는 단계를 포함한다.

(52) CPC특허분류

G03F 1/72 (2013.01)

G03F 7/0002 (2013.01)

G03F 7/70316 (2013.01)

G21K 1/062 (2013.01)

H01L 22/12 (2013.01)

H01L 22/20 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

광학 부품 또는 웨이퍼의 미리 정해진 3차원 윤곽(contour)을 생성하는 방법으로서,

- a. 상기 미리 정해진 3차원 윤곽으로부터 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 기존 3차원 윤곽의 편차를 결정하는 단계;
- b. 상기 미리 정해진 3차원 윤곽으로부터 상기 3차원 윤곽의 상기 결정된 기존 편차를 정정하기 위한 레이저 펄스를 정의하는 하나 이상의 파라미터 세트를 갖는 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 계산하는 단계;
- c. 상기 b단계는, (i) 미리 정의된 3차원 배열의 레이저 펄스를 순차적으로 가함으로써, 제2 광학 부품 또는 제2 웨이퍼에 기본 체적 변형을 유발하는 단계 - 상기 미리 정의된 3차원 배열의 레이저 펄스는, 미리 정의된 파라미터 세트를 갖거나 레이저 펄스의 상기 3차원 배열에서 세 방향의 레이저 펄스의 미리 정의된 거리를 가지며, 상기 세 방향은 평면 내에 있지 않음 -, 및 (ii) 상기 제2 광학 부품 또는 제2 웨이퍼에 유발된 상기 기본 체적 변형으로부터 상기 레이저 펄스를 정의하는 상기 하나 이상의 파라미터 세트를 계산하는 단계를 더 포함하고,
- d. 상기 미리 정해진 3차원 윤곽을 생성하기 위해 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼 상에 상기 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는(apply) 단계를 포함하는, 방법.

청구항 2

청구항 1에 있어서, 상기 단계 b.는,

적어도 하나의 미리 정의된 파라미터 세트를 갖고, 상기 배열의 레이저 펄스에 있어서 세 방향의 레이저 펄스의 미리 정의된 거리를 갖는, 미리 정의된 3차원 배열의 레이저 펄스에 의해, 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼에 유발된 기본 체적 변형을 결정하는 단계를 더 포함하고, 상기 세 방향은 평면 내에 있지 않은, 방법.

청구항 3

청구항 1에 있어서,

상기 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 계산하는 단계는,

- e. 상기 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스에 의해 유발된 상기 미리 정해진 3차원 윤곽 및 체적 변형으로부터 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 상기 기존 3차원 윤곽의 편차를 포함하는 목표 함수를 설정하는 단계; 및
- f. 상기 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 변화시켜 상기 목표 함수를 최소화시키는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 4

청구항 3에 있어서, 상기 목표 함수를 최소화하기 위해 라그랑주 변분 원리(Lagrange variational principle)를 사용하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 5

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

상기 레이저 펄스를 정의하는 상기 파라미터 세트는, 레이저 펄스의 에너지, 펄스 길이, 반복률, 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 한 위치에 지향된 레이저 펄스의 수, 빔의 편광, 개구 수, 초점 크기, 빔의 형상, 및 비점수차 중 적어도 하나를 포함하는, 방법.

청구항 6

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

상기 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스의 파라미터는, 세 방향의 배열의 크기, 및 3차원에서 2개 이상의 입사 레이저 펄스들 사이의 간격을 포함하는, 방법.

청구항 7

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

레이저 펄스에 의해 생긴 스트레인 분포에 의해 도입된 응력 분포에 의해, 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 질량 밀도 및 광 투과 중 적어도 하나를 변경하는 단계를 더 포함하고,

상기 응력 분포 및 상기 스트레인 분포는 후크의 법칙(Hooke's law)에 의해 관련되어 있는, 방법.

청구항 8

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼를 통과하는 노드 N_i 를 갖는 3차원 그리드를 도입하는 단계를 더 포함하고,

상기 3차원 그리드 노드 N_i 는 기본 체적 α 을 정의하는, 방법.

청구항 9

청구항 8에 있어서,

상기 3차원 그리드 노드 N_i 의 변위 ξ_i 는 상기 레이저 펄스의 파라미터 세트 및 적어도 하나의 배열의 상기 레이저 펄스의 파라미터 중 적어도 하나의 함수인, 방법.

청구항 10

청구항 9에 있어서,

적어도 하나의 3차원 기입 밀도 a^α 및 복수의 기입 모드 시그니처 MS_i^m 를 결정하는 단계를 더 포함하고,

MS_i 는 단일 기입 모드 시그니처의 구성 요소를 나타내고, m 은 상기 복수의 기입 모드 시그니처를 카운트(count)하는, 방법.

청구항 11

청구항 10에 있어서,

기본 체적 α 에서 상기 3차원 기입 밀도 a^α 와 상기 기입 모드 시그니처 MS 는,

$$\xi_n = \sum_{o=0}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{k=0}^7 \sum_{s=0}^2 \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{i=0}^{17} (P_{no}^g)^{-1} P_{oks\alpha}^w a^\alpha \eta_{(3k+s)i} MS_i$$
에 의해 주어진 변위 ξ_n 를 유발하고,

상기 텐서(tensor) $(P_{no}^g)^{-1}$ 는 변위 공간에서 작용하는 포텐셜의 역텐서이고, P_{oks}^w 는 노멀 기본 체적 변형 모드의 공간에서 작용하는 상기 텐서의 요소이고, 양 텐서는 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 재료 파라미터를

포함하고, $\sum_{j=0}^{17} \eta_{ij} MS_j$ 는 상기 기입 모드 시그니처 MS_i 에 대한 통합 기입에 대한 평형 변형 변위의 투영인, 방법.

청구항 12

청구항 8에 있어서,

상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼에 걸친 한 배열의 레이저 펄스의 3차원 기입 밀도 a^α 는,

$$\xi_n = \sum_{0=1, \alpha=1}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z, K_x \cdot L_y \cdot M_z} (P_{no}^g)^{-1} A_{o\alpha} a^\alpha$$
 에 의해 주어진 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 기본 체적 α 에서 그리드 노드 N 의 변위 ξ 를 유발하고,

상기 텐서 $(P_{no}^g)^{-1}$ 는 변위 공간에서 작용하는 포텐셜의 역텐서이고, $A_{n\alpha} = \sum_{l=0, t=0}^{7,2} P_{nlt\alpha}^w e_{lt}$ 이고, $P_{nlt\alpha}^w$ 는 노멀 기본 체적 변형 모드의 공간에서 작용하는 포텐셜을 기술하는 상기 텐서의 요소이고, 양 텐서는 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 재료 파라미터를 포함하고, e_{lt} 는 통합 기입 밀도에 대한 기본 체적 α 의 그리드 노드 N_i 의 평형 변형 변위인, 방법.

청구항 13

청구항 8에 있어서,

기본 체적 α 에 중첩된 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼에 걸친 R 배열의 레이저 펄스의 3차원 기입 밀도 a_m^α 는

$$\xi_n = \sum_{0=1, \alpha=1, m=1}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z, K_x \cdot L_y \cdot M_z, R} (P_{no}^g)^{-1} A_{o\alpha} a_m^\alpha$$
 에 의해 주어진 변위 ξ 를 도입하는, 방법.

청구항 14

청구항 11에 있어서,

레이저 빔의 적어도 하나의 기입 밀도가 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 손상 스트레스홀드 미만인, 방법.

청구항 15

청구항 9에 있어서,

상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 다른 기본 체적과 상기 기본 체적 α 의 상호 작용없이 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 기본 체적 α 의 상기 3차원 그리드 N 의 상기 변위 ξ 를 결정하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 16

청구항 15에 있어서,

상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 기본 체적을 결합하고 상기 결합된 기본 체적의 축적된 포텐셜 에너지를 최소화하여 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 전체 변형을 결정하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 17

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서, 단계 a.는

상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 기존 3차원 윤곽을 측정하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 18

청구항 17에 있어서,

상기 기존 3차원 윤곽을 측정하는 단계는, 접촉 조면계, 의사 접촉 조면계, 비접촉 조면계, 간섭계, 백색광 간섭계, 공초점 현미경, 포토 마스크 계측 툴, 주사형 전자 현미경, 및 이들 장치의 조합 중 적어도 하나를 사용하는, 방법.

청구항 19

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서, 단계 a.는

결정된 기준 위치 $\varphi_i^{det.}$ 와 미리 정해진 위치 $\varphi_i^{predet.}$ 사이의 차이로부터 위치 i 에서 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 상기 3차원 윤곽의 편차 $\Delta\varphi_i$ 를 결정하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 20

청구항 19에 있어서, 단계 b.는, 목표 함수
$$\min \left\{ \sum_{i=1}^L (\Delta\varphi_i + \zeta_i)^2 + \sum_{m=1}^{R \cdot K_s \cdot L_s \cdot M_s} \lambda_m^a a_j^m \right\}$$
 를 최소화하는 단계를 더 포함하고, ζ_i 는 R 기입 밀도 a_j^m 에 의해 생성된 위치 i 에서의 변위이고, 최종 항이 조절 계수 λ 를 갖는 티호노프 정규화인, 방법.

청구항 21

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼를 본질적으로 투과할 수 있는 레이저 펄스를 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼에 가하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 22

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

레이저 펄스의 광자 에너지가 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 밴드 갭 에너지보다 작도록, 상기 레이저 펄스의 파장을 선택하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 23

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

레이저 펄스의 광자 에너지는 0.95의 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 밴드 갭 에너지보다 작은, 방법.

청구항 24

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

레이저 펄스의 광자 에너지는 0.95의 가장 작은 밴드 갭 에너지를 갖는 처리된 웨이퍼의 재료의 밴드 갭 에너지보다 작고, 상기 처리된 웨이퍼는 하나 이상의 집적 회로 또는 하나 이상의 집적 회로의 적어도 일부를 포함하는, 방법.

청구항 25

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

상기 광학 부품은 극자외선 파장 방사용 광학 부품을 포함하는, 방법.

청구항 26

청구항 25에 있어서,

상기 극자외선 파장 방사용 광학 부품은 다층 구조물을 갖는 전면의 반대쪽 후면에 투명 전도성 코팅을 포함하고,

투명 전도층이 근적외선, 가시광 및 근자외선 파장 범위 중 적어도 하나에 있어서 광학적으로 투명한, 방법.

청구항 27

청구항 26에 있어서,

상기 투명 전도성 코팅은, 산화 주석, 인듐 주석 산화물, 안티몬 주석 산화물, 알루미늄 아연 산화물, 또는 이들 재료의 조합을 포함하는, 방법.

청구항 28

청구항 26에 있어서,

상기 단계 a.는 상기 극자외선 파장 방사용 광학 부품의 상기 후면의 편평도 편차를 결정하는 단계를 포함하고,

상기 단계 c.는 상기 극자외선 파장 방사용 광학 부품의 상기 후면을 평평하게 하기 위한 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 29

청구항 26에 있어서,

상기 단계 a.는, 상기 전면에 다층 구조물 및 흡수층을 배치한 후, 그러나 상기 흡수층을 패터닝하기 전에, 극자외선 방사용 포토리소그래픽 마스크의 후면의 편평도 편차를 결정하는 단계를 포함하고,

상기 단계 c.는, 상기 극자외선 방사용 포토리소그래픽 마스크의 상기 후면을 평평하게 하기 위한 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 30

청구항 26에 있어서,

상기 단계 a.는, 상기 전면의 주변 영역으로부터 상기 다층 구조물을 제거한 후, 상기 극자외선 파장 방사용 광학 부품의 후면의 편평도 편차를 결정하는 단계를 포함하고,

상기 단계 c.는 상기 극자외선 파장 방사용 광학 부품의 상기 후면을 평평하게 하기 위한 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 31

청구항 26에 있어서,

상기 단계 a.는, 상기 다층 구조물의 미리 정해진 편평도로부터 상기 극자외선 파장 방사용 광학 부품의 상기 다층 구조물의 편평도 편차를 결정하는 단계를 포함하고,

상기 단계 c.는 상기 극자외선 파장 방사용 광학 부품의 상기 다층 구조물의 미리 정해진 편평도를 만들기 위한 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 32

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

상기 단계 a.는, 미리 정해진 패턴으로부터 투과형 포토리소그래픽 마스크의 패턴 요소의 편차를 결정하는 단계를 포함하고,

상기 단계 c.는 상기 미리 정해진 패턴을 생성하기 위한 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 33

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

상기 단계 a.는, 미리 정해진 광 투과로부터 투과형 포토리소그래픽 마스크에 걸친 광 투과의 편차를 결정하는 단계를 포함하고,

상기 단계 c.는 상기 미리 정해진 광 투과를 만들기 위한 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 34

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

상기 단계 a.는, 미리 정해진 패턴 및 미리 정해진 광 투과로부터 투과형 포토리소그래픽 마스크에 걸친 패턴 요소 및 광 투과의 편차를 결정하는 단계를 포함하고,

상기 단계 c.는 상기 투과형 포토리소그래픽 마스크에 걸친 상기 미리 정해진 패턴 및 상기 미리 정해진 광 투과를 동시에 만들기 위해 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 35

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

상기 단계 a.는, 미리 정해진 3차원 광학 형상으로부터 평평한 광학 부품의 편차를 결정하는 단계를 포함하고,

상기 단계 c.는 상기 원래 평평한 광학 부품의 미리 정해진 3차원 광학 형상을 생성하기 위한 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 36

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

상기 단계 a.는, 미리 정해진 비구면 형상으로부터 광학 부품의 구형 형상의 편차를 결정하는 단계를 포함하고,

상기 단계 c.는 상기 광학 부품의 상기 미리 정해진 비구면 형상을 생성하기 위한 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 37

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

상기 단계 a.는 좌절된(frustrated) 총 내부 반사 셔터의 미리 정해진 접촉면으로부터 상기 좌절된 총 내부 반사 셔터의 접촉면의 편차를 결정하는 단계를 포함하고,

상기 단계 c.는 상기 좌절된 총 내부 반사 셔터의 상기 미리 정해진 접촉면을 생성하기 위한 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 38

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

상기 단계 a.는 나노임프린트 리소그래피 템플릿의 미리 정해진 3차원 윤곽으로부터 상기 나노임프린트 리소그래피 템플릿의 상기 3차원 윤곽의 편차를 결정하는 단계를 포함하고,

상기 단계 c.는 상기 나노임프린트 리소그래피 템플릿의 상기 미리 정해진 3차원 윤곽을 생성하기 위한 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 39

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

상기 웨이퍼는 반도체 재료를 포함하거나 또는 상기 웨이퍼가 화합물 반도체 재료를 포함하는, 방법.

청구항 40

청구항 39에 있어서,

상기 반도체 재료는 실리콘을 포함하는, 방법.

청구항 41

청구항 39에 있어서,

상기 웨이퍼는 하나 이상의 집적 회로의 적어도 일부를 포함하는, 방법.

청구항 42

청구항 39에 있어서,

상기 웨이퍼는 실리콘을 포함하고, 상기 레이저 펄스의 파장은 $1.0\ \mu\text{m} - 8.0\ \mu\text{m}$ 의 범위에 있는, 방법.

청구항 43

청구항 39에 있어서,

계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 웨이퍼에 가하는 것은 웨이퍼를 구부러지게 하는, 방법.

청구항 44

청구항 39에 있어서,

계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 웨이퍼에 가하는 것은 웨이퍼 처리 시에 발생하는 상기 웨이퍼의 벤딩이 보상되는, 방법.

청구항 45

청구항 39에 있어서,

상기 레이저 펄스의 적어도 하나의 3차원 배열은, 상기 웨이퍼의 깊이에 대하여 상기 웨이퍼에 비대칭으로 가해지는, 방법.

청구항 46

청구항 39에 있어서,

상기 웨이퍼는 마이크로 전자 기계 시스템(MEMS) 및 광자 집적 회로 중 적어도 하나를 포함하는, 방법.

청구항 47

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

g. 상기 미리 정해진 3차원 윤곽으로부터 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 생성된 3차원 윤곽의 잔여 편차를 결정하는 단계;

h. 상기 잔여 편차가 미리 정해진 스레스홀드보다 작으면, 상기 방법을 종료하는 단계; 및

i. 상기 잔여 편차가 상기 미리 정해진 스레스홀드 이상이면, 단계 b 및 c를 반복하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 48

청구항 1 내지 청구항 4 중 어느 한 항에 있어서,

상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼는 근적외선, 가시광 및 근자외선 파장 범위 중 적어도 하나에 있어서 광학적으로 투명한, 방법.

청구항 49

광학 부품 또는 웨이퍼의 미리 정해진 3차원 윤곽을 생성하는 장치로서,

a. 상기 미리 정해진 3차원 윤곽으로부터 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 기존 3차원 윤곽의 편차를 결정하도록 동작 가능한 계측 틀;

b. 상기 미리 정해진 3차원 윤곽으로부터 상기 3차원 윤곽의 결정된 기존 편차를 정정하기 위한 레이저 펄스를 정의하는 하나 이상의 파라미터 세트를 갖는 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 계산하도록 동작 가능한 연산부; 및

c. 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 미리 정해진 3차원 윤곽을 생성하기 위해 계산된 적어도 하나의 3차원

배열의 레이저 펄스를 가하도록 동작 가능한 광원을 포함하고,

d. 상기 광원은 미리 정의된 3차원 배열의 레이저 펄스를 순차적으로 가함으로써, 제2 광학 부품 또는 제2 웨이퍼에 기본 체적 변형을 유발하도록 더 동작 가능하고 - 상기 미리 정의된 3차원 배열의 레이저 펄스는, 미리 정의된 파라미터 세트를 갖거나 레이저 펄스의 상기 3차원 배열에서 세 방향의 레이저 펄스의 미리 정의된 거리를 가지고, 상기 세 방향은 평면 내에 있지 않음 -, 상기 연산부는 상기 제2 광학 부품 또는 제2 웨이퍼에 유발된 상기 기본 체적 변형으로부터 상기 레이저 펄스를 정의하는 상기 하나 이상의 파라미터 세트를 계산하도록 더 동작 가능한, 장치.

청구항 50

청구항 49에 있어서,

상기 계측 툴은 접촉 조면계, 의사 접촉 조면계, 비접촉 조면계, 간섭계, 백색광 간섭계, 공초점 현미경, 포토 마스크 계측 툴, 및 주사형 전자 현미경 중 적어도 하나를 포함하는, 장치.

청구항 51

청구항 49에 있어서,

상기 연산부는 마이크로 프로세서, 범용 프로세서, 특수 목적 프로세서, 중앙 처리 장치 및 이들의 조합 중 적어도 하나를 포함하는, 장치.

청구항 52

청구항 49에 있어서,

상기 광원은 초단 레이저 펄스의 빔을 생성하도록 동작 가능한 레이저 소스, 및 적어도 하나의 배열의 레이저 펄스를 생성하도록 동작 가능한 주사 수단을 포함하는, 장치.

청구항 53

청구항 52에 있어서,

상기 레이저 소스는, Ti:사파이어 레이저 시스템 및 네오디뮴(Nd), 툴륨(Tm), 홀뮴(Ho) 및 에르븀(Er)으로 이루어진 그룹의 적어도 하나의 요소가 도핑된 YAG 레이저 시스템 중 적어도 하나인, 장치.

청구항 54

청구항 49 내지 청구항 53 중 어느 한 항에 있어서,

상기 장치는 반도체 공장에서의 반도체 제조 장치에 통합되도록 되어 있는, 장치.

청구항 55

청구항 12에 있어서,

레이저 빔의 적어도 하나의 기입 밀도가 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 손상 스트레스홀드 미만인, 방법.

청구항 56

청구항 13에 있어서,

레이저 빔의 적어도 하나의 기입 밀도가 상기 광학 부품 또는 상기 웨이퍼의 손상 스트레스홀드 미만인, 방법.

청구항 57

청구항 25에 있어서,

상기 극자외선 파장 방사용 광학 부품은 극자외선 방사용 미리 또는 포토리소그래픽 마스크를 포함하는, 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 광학 부품 및/또는 웨이퍼의 미리 정해진 3차원 윤곽을 생성하는 분야에 관한 것이다.

배경 기술

- [0002] 광학 시스템은 그 성능에 대해서 증가하는 요구를 충족해야 한다. 예를 들어, 먼 거리에 위치하는 물체로부터 발생된 제한된 수의 광자를 수집하기 위해, 망원경의 광학 부품의 크기가 꾸준히 증가하고 있다. 광학 부품이 그 사전 정의된 표면 형태에서 약간 벗어나면 망원경 또는 일반적으로 광학 시스템의 광학 성능이 감소하게 된다.
- [0003] 한편, 망원경은 예를 들어 그 주위에 비해 매우 낮은 콘트라스트를 갖는 개체를 해상해야 한다. 또한, 리소그래피 장치의 투영 시스템은 더 작은 구조물을 해상하는 것이 요구된다.
- [0004] 집적 회로(IC)도, 꾸준히 증가하는 요구를 충족해야 하는 또 다른 종류의 장치이다. 무어의 법칙(Moore's law)에 따르면, IC를 제조하기 위해 웨이퍼 상에 형성되는 구성 요소의 최소 치수가 계속 감소된다.
- [0005] 이하에서, 광학 시스템의 수요 증가는 투영 시스템, 특히 포토리소그래피 투영 노광 시스템에 대해서 예시된다.
- [0006] 반도체 산업에서 집적도가 지속적으로 증가하는 결과로서, 포토리소그래피 투영 노광 시스템 및 포토리소그래픽 마스크는 웨이퍼 상에 배치된 포토 레지스트 상에 더 작은 구조물을 투영한다. 이러한 요구를 충족하기 위해서, 투영 노광 시스템의 노광 파장은, 전자기 스펙트럼의 근 자외선으로부터 평균 자외선을 거쳐 깊은 자외선 영역으로 시프트된다. 현재, 193 nm의 파장은 일반적으로 웨이퍼상의 포토 레지스트의 노광에 사용된다.
- [0007] 그 결과, 투영 노광 시스템의 광학 부품의 제조는 점점 더 복잡해지므로 점점 더 비싸지고 있다. 미래에, 투영 노광 시스템은 전자기 스펙트럼의 극 자외선(EUV)의 파장 범위에서 매우 짧은 파형 길이를 사용한다(예를 들면, 10nm ~ 15 nm의 범위).
- [0008] 이러한 파장 범위에서, 예를 들어 미러 또는 포토리소그래픽 마스크로서의, EUV 광학 소자는, 평면성, 순도 및 온도 안정성에 대해 가장 높은 요구를 만족해야 한다. 평면성에 관한 이들 광학 소자의 기관의 허용 가능한 편차는, 기관의 표면 상에 배치된 다층 구조물에서 반사된 전자기파의 파면을 크게 방해하지 않도록 하는 노광 파장의 일부일 뿐이다. EUV 미러와 마스크의 기관의 평면성의 더 큰 편차는, 웨이퍼의 포토레지스트에서 파면의 (부분) 보강 또는 상쇄 추가로 인해 포토 레지스트의 광 강도 분포의 변화를 가져 올 수 있다. 웨이퍼의 추가 처리시에, 광 강도의 변화로 인해서 예를 들면, 결함이 있는 IC와 같은 반도체 장치가 제조 될 수 있다.
- [0009] 제조사에서 공급되는 EUV 기관도 EUV 미러와 마스크의 평면성 조건을 충족하지 않을 수 있다. 또한, 다층 구조물을 형성하고 이 다층 구조물의 일 면상에 미세 패턴을 형성하는 미러 및 마스크의 제조 공정은, 각각 기관의 평탄성을 저하시킬 수 있다.
- [0010] 본 출원인의 미국 출원 US 13/179,799 및 US 13/252,480은, 레지스트레이션 에러, 투과 마스크의 투과 에러, 및 다른 마스크들의 오버레이 에러를 정정하는 2차원 모델을 기술하고 있다. 그 전체가 본원에 참고로 인용되어 있다.
- [0011] 본 출원인의 미국 출원 13/084,991은, 기관 표면 내부에 칼라 센터를 생성하여 EUV 마스크의 기관 두께 결함을 국소적으로 보정하는 방법을 개시한다. 이 문헌도 그 전체가 참고로 본원에 인용되어 있다.
- [0012] 또한, 포토리소그래픽 마스크의 기관의 곡률은 또한 EUV 마스크의 활상 에러를 발생시킬 수 있다. US 2008/0,322,206 A1은 제조된 포토리소그래픽 마스크의 평면성을 개선하는 방법을 기술한다. 상기 기관의 곡률을 조정하거나, 기관의 요철을 매끄럽게 하기 위해, 이 문헌은, 만곡 영역을 갖는 기관의 미리 정해진 영역에 팽창 응력 및/또는 압축 응력 발생부를 형성하는 것을 제안한다. 팽창 응력 및 압축 응력 발생부는 이 영역에 펨토초(femtosecond) 레이저 펄스를 집광함으로써 생성되며, 기관의 접합 상태를 국부적으로 변경시킨다.
- [0013] 위에 개략적으로 설명된 문헌은 기존의 광학 부품의 결함의 보정을 위한 근사 방법을 제공한다. 그러나, 미래의 더 높은 성능의 광학 부품의 항상 증가하는 결함 보정 요구는 여전히 충족되지 않는다.
- [0014] 또한, 제조 공정 동안 웨이퍼가 가끔 구부러지는 것이 관찰되므로, 웨이퍼를 진공 척에 고정하는 것은 어렵다. 이 벤딩은 IC의 제조 공정시 웨이퍼에 도입되는 응력에 기인한 것으로 보여진다. 현재, 웨이퍼의 공정시 발생하는 웨이퍼의 벤딩은, 제조 공정의 여러 처리 단계들에서 생긴 응력을 감소시킴으로써만 저하될 수 있다. 이를 위해, 처리 단계들이 수정되어야 한다. 이것은 현대의 IC의 제조에 필요한 처리 단계들의 매우 복잡한 시퀀

스에 관련된 작업이다. 또한, 제조 IC의 전기 기능의 성능 손실을 허용하는 것도 필요하다.

[0015] 또 다른 접근 방법으로서, 현재 웨이퍼의 후면에 인가될 수 있어서 여러 처리 단계에서의 벤딩 효과를 감소시키는 층들이 개발되었다. 후방 웨이퍼 측에 추가 층을 더하므로, 현대의 IC 기존 관련 제조 공정에 추가 처리 단계가 도입된다.

[0016] 그러므로, 본 발명의 목적은 고성능의 광학 부품 및/또는 웨이퍼를 생성하는 개선된 방법 및 장치를 제공하는 것이다.

발명의 내용

[0017] 본 발명의 제1 양태에 따르면, 청구항 1의 방법이 제공된다. 일 실시 예에서, 광학 부품 및/또는 웨이퍼의 미리 정해진 3차원 윤곽을 생성하는 방법은, (a) 상기 미리 정해진 3차원 윤곽으로부터 상기 광학 부품의 기존 3차원 윤곽의 편차를 결정하는 단계; (b) 상기 미리 정해진 3차원 윤곽으로부터 상기 3차원 윤곽의 상기 결정된 기존 편차를 정정하기 위한 레이저 펄스를 정의하는 하나 이상의 파라미터 세트를 갖는 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 계산하는 단계; 및 (c) 상기 미리 정해진 3차원 윤곽을 생성하기 위해, 상기 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼에 가하는 단계를 포함한다.

[0018] 본 발명의 3차원(3D) 접근 방식은 한편 레이저 빔 파라미터들과 3차원 배열의 레이저 펄스의 파라미터들 및 다른 한편 광학 부품 및/또는 웨이퍼의 3차원 배열의 레이저 펄스에 의해 생긴 체적 변형 사이의 관계를 설정한다. 이러한 관계의 설정을 이용하여, 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 미리 정해진 3차원 윤곽의 생성에 필요한 레이저 빔 파라미터들과 3차원 배열의 레이저 펄스의 파라미터들을 결정할 수 있다.

[0019] 따라서, 레이저 펄스의 3차원 배열의 계산을 위한 본 발명의 방법의 접근 방법은 광학 부품 및/또는 웨이퍼의 3차원 특성을 고려한다. 따라서, 일반적으로 지금까지 사용되는 현상학적 접근 방법뿐만 아니라 2차원 근사 방법의 단점의 대부분이 극복된다. 따라서, 본 발명의 방법에 따르면, 그 미리 정해진 3차원 윤곽으로부터 광학 부품 및/또는 웨이퍼의 결정된 편차를 정정하는 레이저 펄스를 정의하는 하나 또는 여러 개의 파라미터 세트를 갖는 레이저 펄스의 하나 이상의 3차원 배열을 산출할 수 있다. 일 실시 예에서, 본 발명의 방법에 따르면, 3차원 윤곽의 편차를 광학 부품 및/또는 웨이퍼의 표면에 평행하게 및 직교하여 동시에 정정할 수 있다. 또한, 본 발명의 방법에 따르면, 광학 부품이나 웨이퍼의 결함을 보정할 수 있을 뿐 아니라, 블랭크 또는 표준 광학 부품으로부터 특정 광학 부품을 제조할 수 있다.

[0020] 본 발명의 또 다른 양태에 따르면, 이 방법에서, 상기 단계b는, 미리 정의된 파라미터 세트를 갖고 및/또는 레이저 펄스의 상기 배열에서 세 방향의 레이저 펄스의 미리 정의된 거리를 갖는, 레이저 펄스의 미리 정의된 3차원 배열에 의해, 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼에 유발된 기본 체적 변형을 결정하는 단계를 더 포함하고, 상기 세 방향은 평면 내에 있지 않다.

[0021] 본 발명의 또 다른 양태에 따르면, 이 방법에서, 상기 단계b는, 레이저 펄스의 미리 정의된 3차원 배열을 순차적으로 가함으로써, 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼에 유발된 기본 체적 변형을 결정하는 단계를 더 포함하고, 상기 레이저 펄스의 미리 정의된 3차원 배열은, 미리 정의된 파라미터 세트를 갖고 및/또는 레이저 펄스의 상기 3차원 배열에서 3방향의 레이저 펄스의 미리 정의된 거리를 갖는 레이저 펄스를 포함하고, 상기 세 방향은 평면 내에 있지 않다.

[0022] 특정 재료 및/또는 특정 편차에 대해서, 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 재료에 특정의 미리 정의된 3차원 배열을 기입하여 레이저 펄스의 특정의 미리 정의된 배열의 효과를 결정하는 것이 유익할 수 있다. 다수의 레이저 펄스의 미리 정의된 3차원 배열들에 의해 생긴 측정된 체적 변형으로부터, 그 미리 정해진 형상으로부터 광학 부품 및/또는 웨이퍼의 3차원 윤곽의 결정된 편차를 정정하기 위해 레이저 펄스의 파라미터들 및 3차원 배열의 레이저 펄스가 계산된다. 이 접근 방법으로 인해 재료 파라미터의 변형 체적의 결정 및 복잡한 계산을 피할 수 있다.

[0023] 이러한 상황이 간단한 예에 도시되어 있다. 예를 들면, 레이저 펄스의 제1 3차원 배열이, 레이저 펄스(선형) 밀도가 y-방향보다 x-방향에서 더 높은 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼에 적용된다. 그 후, 다음 단계에서 레이저 펄스의 제2 3차원 배열이, 레이저 펄스(선형) 밀도가 x-방향보다 y-방향에서 더 높은 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼에 적용된다. 또는, 농도는 3차원 배열의 레이저 펄스 내에서 고정으로 유지될 수 있고, 레이저 펄스의 파라미터는 변경될 수 있다.

[0024] 또 다른 양태에서, 상기 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 계산하는 단계는, (d) 상기 적어도 하나의

3차원 배열의 레이저 펄스에 의해 도입된 상기 미리 정해진 3차원 윤곽 및 체적 변형으로부터 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 상기 기존 3차원 윤곽의 편차를 포함하는 목표 함수를 설정하는 단계; 및 (e) 상기 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 변경하여 상기 목표 함수를 최소화시키는 단계를 포함한다. 상기 레이저 펄스의 적어도 하나의 3차원 배열을 변화시키는 것은 레이저 펄스의 적어도 하나의 파라미터를 변화시키는 것을 포함한다.

[0025] 또 다른 양태는 상기 목표 함수를 최소화하기 위해 라그랑주 변분 원리(Lagrange variational principle)를 사용하는 단계를 포함한다.

[0026] 또 다른 양태에 의하면, 상기 레이저 펄스를 정의하는 상기 파라미터 세트는, 상기 레이저 빔의 에너지, 펄스 길이, 반복률, 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 한 지점에 지향된 펄스의 수, 빔의 편광, 개구 수, 초점 크기, 빔의 형상, 및/또는 비점수차를 포함한다.

[0027] 또 다른 양태에서, 상기 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스의 파라미터는 세 방향의 배열의 크기, 및 3차원에서 2개 이상의 입사 레이저 펄스의 위치 사이의 간격을 포함한다. 일 양태에서, 상이한 레이저 펄스들은 3차원 배열의 레이저 펄스에서 빔 방향에 수직인 영역에 중첩하지 않은 픽셀들을 생성한다. 다른 양태에서, 레이저 펄스들은 3차원 배열의 레이저 펄스에서 빔 방향에 수직인 영역에 부분적으로 또는 본질적으로 완전히 중첩하는 2개 이상의 픽셀들을 생성한다. 또 다른 양태에서, 빔 방향에 수직인 영역에서 중첩하는 2개 이상의 픽셀들은 빔 방향으로 완전히 또는 부분적으로 중첩한다.

[0028] 비중첩 픽셀의 경우에, 광학 부품 및/또는 웨이퍼에 레이저 펄스를 배열하는 효과가 개별 픽셀의 영향을 합산하여 계산될 수 있다. 부분적으로 또는 완전히 중첩하는 픽셀의 경우에, 픽셀을 형성하는 각각의 레이저 펄스의 효과를 가산함으로써만 레이저 펄스의 3차원 배열의 영향을 결정하는 것은 불가능하다.

[0029] 또 다른 양태는 레이저 펄스에 의해 생긴 스트레인 분포에 의해 도입된 응력 분포에 의해, 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 질량 밀도 및/또는 광 투과를 변경하는 단계를 더 포함하고, 상기 응력 분포 및 상기 스트레인 분포는 후크의 법칙(Hooke's law)에 의해 관련되어 있다.

[0030] 또 다른 바람직한 양태는 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼를 통과하는, 노드 N 를 갖는 3차원 그리드를 도입하는 단계를 포함하고, 상기 3차원 그리드 노드 N_i 는 기본 체적 α 을 정의한다. 본 출원에서, 용어 기본 체적과 기본 셀은 동의어로 사용된다.

[0031] 또 다른 양태에 따르면, 상기 3차원 그리드 노드 N_i 의 변위 ξ_i 는 상기 레이저 펄스의 파라미터 세트 및/또는 상기 레이저 펄스의 적어도 하나의 배열의 파라미터의 함수이다. 또 다른 양태는, 적어도 하나의 3차원 기입 밀도 a^α 및 복수의 기입 모드 시그니처 MS_i^m 를 결정하는 단계를 더 포함하고, MS 는 단일 기입 모드 시그니처의 구성 요소를 나타내고, 지표 m 은 상기 복수의 기입 모드 시그니처를 카운트(count)한다. 여러 3차원 기입 밀도 a_m^α 의 경우에, 지표 m 은 기입 밀도의 수이다.

[0032] 바람직한 양태에서, 기본 체적 α 에서 상기 3차원 기입 밀도 a^α 와 상기 기입 모드 시그니처 MS 는,

$$\xi_n = \sum_{o=0}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{k=0}^7 \sum_{s=0}^2 \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{i=0}^{17} (P_{no}^g)^{-1} P_{oks\alpha}^w a^\alpha \eta_{(3k+s)i} MS_i$$

에 의해 주어진 변위 ξ_n 를 유발하고, 상기 텐서 $(P_{no}^g)^{-1}$ 는 변위 공간에서 작용하는 포텐셜 에너지의 역텐서이고, $P_{oks\alpha}^w$ 는 노멀 기본 체적 변형 모드의 공간에서 작용하는 포텐셜을 기술하는 상기 텐서의 요소이고, 양 텐서는 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 재료 파라미터를 포함하고, $\sum_{j=0}^{17} \eta_j MS_j$ 는 상기 기입 모드 시그니처 MS 에 대한 통합 기입에 대한 평형 변형 변위의 투영이다.

[0033] 이 식은 레이저 펄스의 파라미터 및/또는 3차원 배열의 레이저 펄스를 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼 상에 미치는 그들의 영향과 연결시킨다. 이것은, 본 발명의 방법이 광 펄스의 빔이 상기 광학 부품 및/또는 상기

웨이퍼의 기판 재료에 발생시키는 효과를 결정하기 위해서 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 재료 파라미터와 기본적인 물리 법칙을 사용하는 것을 의미한다.

[0034] 또 다른 양태에서, 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼에 걸친 레이저 펄스의 배열의 3차원 기입 밀도 a^a 는,

$$\xi_n = \sum_{o=1, \alpha=1}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z, K_x \cdot L_y \cdot M_z} (P_{no}^g)^{-1} \Lambda_{o\alpha} a^\alpha$$
에 의해 주어진 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 그리드 노드 N_n 의 변위 ξ_n 를 유발하고, 상기 텐서 $(P_{no}^g)^{-1}$ 는 상기 변위 공간에서 작용하는 포텐셜의 역텐서이고, $A_{na} = \sum_{l=0, t=0}^{7,2} P_{nla}^w e_{lt}$ 이고, P_{nla}^w 는 노멀 기본 체적 변형 모드의 공간에서 작용하는 포텐셜을 기술하는 상기 텐서의 요소이고, 양 텐서는 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 재료 파라미터를 포함하고, e_{lt} 는 통합 기입 밀도에 대한 기본 체적 α 의 그리드 노드 N_i 의 평형 변형 변위이다.

[0035] 또 다른 양태에 따르면, 기본 체적 α 에 중첩된 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼에 걸친 레이저 펄스의 R

배열의 상기 3차원 기입 밀도 a_m^a 는
$$\xi_n = \sum_{o=1, \alpha=1, m=1}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z, K_x \cdot L_y \cdot M_z, R} (P_{no}^g)^{-1} \Lambda_{o\alpha} a_m^\alpha$$
에 의해 주어진 변위 ξ_n 를 도입한다.

[0036] 또 다른 양태에서, 상기 레이저 빔의 상기 적어도 하나의 기입 밀도는 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 손상 스트레스 미만이다. 또 다른 양태에서, 상기 레이저 빔의 상기 적어도 하나의 기입 밀도는 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 손상 스트레스를 초과한다.

[0037] 또 다른 양태는 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 다른 기본 체적과 상기 기본 체적 α 의 상호 작용 없이 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 기본 체적 α 의 상기 3차원 그리드 N_n 의 변위 ξ_n 를 결정하는 단계를 더 포함한다. 또 다른 양태는 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 기본 체적을 결합하고 상기 결합된 기본 체적의 축적된 포텐셜 에너지를 최소화하여 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 전체 변형을 결정하는 단계를 더 포함한다.

[0038] 마지막 양태의 접근 방법은, 레이저 펄스의 파라미터와 3차원 배열의 레이저 펄스의 복잡한 계산을 용이하게 한다. 또한, 레이저 펄스의 효과는 광학 부품 및/또는 웨이퍼의 재료에서 작고 실험적인 해상도가 현재 제한되므로 이 접근 방법이 유일하게 가능한 것 일 수 있다.

[0039] 또 다른 양태에 따르면, 단계 (a)는 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 상기 기준 3차원 윤곽을 측정하는 단계를 더 포함한다. 또 다른 양태에서, 상기 기준 3차원 윤곽을 측정하는 단계는, 접촉 조면계 (profilometer), 의사 접촉 조면계, 비접촉 조면계, 간섭계, 백색광 간섭계, 공초점 현미경, 포토 마스크 계측틀, 주사형 전자 현미경, 및/또는 이들 장치의 조합을 사용한다.

[0040] 또 다른 양태에 따르면, 단계 (a)는 상기 결정된 기준 위치 $\varphi_i^{det.}$ 와 상기 미리 정해진 위치 $\varphi_i^{predet.}$ 사이의 차이로부터 위치 i 에서 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 상기 3차원 윤곽의 편차 $\Delta\varphi$ 를 결정하는 단계를 더 포함한다.

[0041] 또 다른 양태에서, 단계 (b)는 상기 목표 함수

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^L (\Delta\varphi_i + \zeta_i)^2 + \sum_{m=1, j=1}^{R, K_x \cdot L_y \cdot M_z} \lambda_m^a a_j^m \right\}$$
를 최소화하는 단계를 더 포함하고, ζ_i 는 R 기입 밀도 a_j^m 에 의해 생성된 위치 i 에서의 변위이고, 상기 최종 항은 조절 계수 λ 를 갖는 티호노프

(Tikhonov) 정규화이다.

- [0042] 유익한 측면은 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼를 본질적으로 투과할 수 있는 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼에 레이저 펄스를 인가하는 단계를 더 포함한다.
- [0043] 이러한 맥락에서뿐만 아니라, 본 명세서의 또 다른 부분에서, 용어 "본질적으로"는 측정 한계 내에서 양의 수치를 의미한다.
- [0044] 또 다른 양태는, 상기 레이저 펄스의 광자 에너지가 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 밴드 갭 에너지보다 작도록, 상기 레이저 펄스의 파장을 선택하는 단계를 더 포함한다.
- [0045] 또 다른 양태에서, 상기 레이저 펄스의 광자 에너지는 0.95의 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 밴드 갭 에너지보다 작고, 바람직하게는, 0.9의 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 밴드 갭 에너지보다 작고, 보다 바람직하게는, 0.8의 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 밴드 갭 에너지보다 작고, 가장 바람직하게는, 0.7의 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 밴드 갭 에너지보다 작다.
- [0046] 바람직한 양태에 따르면, 상기 레이저 펄스의 상기 광자 에너지는 0.95의 가장 작은 밴드 갭 에너지를 갖는 처리된 웨이퍼의 재료의 밴드 갭 에너지보다 작고, 바람직하게는, 0.9의 가장 작은 밴드 갭 에너지를 갖는 처리된 웨이퍼의 재료의 밴드 갭 에너지보다 작고, 보다 바람직하게는, 0.8의 가장 작은 밴드 갭 에너지를 갖는 처리된 웨이퍼의 재료의 밴드 갭 에너지보다 작고, 가장 바람직하게는, 0.7의 가장 작은 밴드 갭 에너지를 갖는 처리된 웨이퍼의 재료의 밴드 갭 에너지보다 작고, 상기 처리된 웨이퍼는 하나 이상의 집적 회로 또는 상기 하나 이상의 집적 회로의 적어도 일부를 포함한다.
- [0047] 또 다른 양태에서, 상기 광학 부품은 극자외선 방사용 광학 부품을 포함하고, 특히, 극자외선 방사용 미러 또는 포토리소그래픽 마스크를 포함한다.
- [0048] 또 다른 양태에 따르면, 상기 극자외선 파장 방사용 광학 부품에는 다층 구조를 갖는 전면에 대향하는 후면에 투과 전도성 코팅을 포함하고, 상기 투과 전도층은 근적외선, 가시광 및/또는 근자외선 파장 범위의 광을 광학적으로 투과시킨다.
- [0049] 또 다른 양태에서, 상기 투과 전도성 코팅은, 산화 주석, 인듐 주석 산화물, 안티몬 주석 산화물, 알루미늄 아연 산화물, 또는 이들의 조합을 포함한다.
- [0050] 또 다른 양태에서, 상기 단계(a)는 상기 극자외선 파장 방사용 광학 부품의 상기 후면의 편평도 편차를 결정하는 단계를 포함하고, 상기 단계(c)는 상기 극자외선 파장 방사용 광학 부품의 상기 후면을 평평하게 하기 위한 상기 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함한다.
- [0051] 또 다른 양태에서, 상기 단계 (a)는, 상기 전면의 상기 다층 구조물 및 흡수층을 배치한 후, 그러나 상기 흡수층을 패터닝하기 전에, 상기 극자외선 방사용 포토리소그래픽 마스크의 상기 후면의 편평도 편차를 결정하는 단계를 포함하고, 상기 단계 (c)는 상기 극자외선 방사용 포토리소그래픽 마스크의 상기 후면을 평평하게 하기 위한 상기 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함한다.
- [0052] 또 다른 양태에서, 상기 단계 (a)는, 상기 전면의 주변 영역으로부터 상기 다층 구조물을 제거한 후, 상기 극자외선 파장 방사용 광학 부품의 상기 후면의 상기 편평도 편차를 결정하는 단계를 포함하고, 상기 단계 (c)는 상기 극자외선 파장 방사용 광학 부품의 상기 후면을 평평하게 하기 위한 상기 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함한다. 또 다른 바람직한 양태에 따르면, 상기 단계 (a)는, 상기 다층 구조물의 미리 정해진 편평도로부터 상기 극자외선 파장 방사용 광학 부품의 상기 다층 구조물의 상기 편평도 편차를 결정하는 단계를 포함하고, 상기 단계 (c)는 상기 극자외선 파장 방사용 광학 부품의 상기 다층 구조물의 미리 정해진 편평도를 생성하기 위한 상기 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함한다.
- [0053] 본 발명의 방법은 마스크 제조 공정에서 결함의 발생을 방지하기 위해 EUV 마스크의 제조 공정의 다양한 단계들 사이에 적용될 수 있다.
- [0054] 다른 구성에 따르면, 상기 단계 (a)는, 미리 정해진 패턴으로부터 투과형 포토리소그래픽 마스크의 패턴 요소의 편차를 결정하는 단계를 포함하고, 상기 단계 (c)는 상기 미리 정해진 패턴을 생성하기 위한 상기 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함한다. 바람직한 양태에 따르면, 상기 단계 (a)는, 미리 정해진 광 투과로부터 투과형 포토리소그래픽 마스크의 광 투과의 상기 편차를 결정하는 단계를 포함하고,

상기 단계 (c)는 상기 미리 정해진 광 투과를 만들기 위한 상기 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함한다.

- [0055] 다른 양태에서, 상기 단계 (a)는, 상기 미리 정해진 패턴 및 상기 미리 정해진 광 투과로부터 투과형 포토리소그래픽 마스크에 걸친 패턴 요소 및 광 투과의 상기 편차를 결정하는 단계를 포함하고, 상기 단계 (c)는 상기 투과형 포토리소그래픽 마스크에 걸친 상기 미리 정해진 패턴 및 상기 미리 정해진 광 투과를 동시에 생성하기 위해 상기 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함한다.
- [0056] 이것은, 레이저 펄스의 단일 3차원 배열의 적용에 의해 또는 단일 기입 단계에 의해 광학 부품의 여러 결함의 보정을 가능하게 하는 본 발명의 방법의 3차원 접근 방법의 장점 중 하나이다.
- [0057] 또 다른 양태에서, 상기 단계 (a)는, 미리 정해진 3차원 광학 형상으로부터 평평한 광학 부품의 편차를 결정하는 단계를 포함하고, 상기 단계 (c)는 상기 원래 평평한 광학 부품의 상기 미리 정해진 3차원 광학 형상을 생성하기 위한 상기 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함한다.
- [0058] 3차원 접근 방법을 사용함으로써 본 발명의 방법은 주어진 블랭크로부터 특정 광학 부품을 제조할 수 있는 포텐셜을 갖는다.
- [0059] 또 다른 양태에서, 상기 단계 (a)는, 미리 정해진 비구면 형상으로부터 광학 부품의 구형 형상의 편차를 결정하는 단계를 포함하고, 상기 단계 (c)는 상기 광학 부품의 상기 미리 정해진 비구면 형상을 생성하기 위한 상기 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함한다.
- [0060] 또한, 본 발명의 방법에 따르면, 표준 비용-효율적인 광학 부품들에서 특정 광학 부품들을 제조할 수 있다. 표준 광학 부품의 3차원 윤곽이 표준 부품의 제조자에 의해 제공되면, 본 발명의 방법의 단계 (a)는 실행되지 않는다.
- [0061] 또 다른 바람직한 양태에 따르면, 상기 단계 (a)는 좌절된(frustrated) 총 내부 반사 서터의 미리 정해진 접촉면으로부터 상기 좌절된 총 내부 반사 서터의 접촉면의 편차를 결정하는 단계를 포함하고, 상기 단계 (c)는 상기 좌절된 총 내부 반사 서터의 상기 미리 정해진 접촉면을 생성하기 위한 상기 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함한다.
- [0062] 다른 양태에서, 상기 단계 (a)는 나노임프린트 리소그래피 템플릿의 미리 정해진 3차원 윤곽으로부터 상기 나노임프린트 리소그래피 템플릿의 상기 3차원 윤곽의 편차를 결정하는 단계를 포함하고, 상기 단계 (c)는 상기 나노임프린트 리소그래피 템플릿의 상기 미리 정해진 3차원 윤곽을 생성하기 위한 상기 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하는 단계를 포함한다.
- [0063] 다른 바람직한 형태에서, 상기 웨이퍼는 반도체 재료를 포함하고, 상기 웨이퍼가 화합물 반도체 재료를 포함한다. 바람직한 형태에서, 상기 반도체 재료는 실리콘을 포함한다. 바람직한 양태에서, 상기 웨이퍼는 하나 이상의 집적 회로의 적어도 일부를 포함한다.
- [0064] 광학 부품들 이외에, 웨이퍼가 상기 정의된 방법이 적용될 수 있는 제2 종류의 부품 또는 장치이다. 본 명세서의 제2 부분에서 이미 언급한 것 같이, 반도체 공장의 제조 공정 중에 웨이퍼가 구부러질 수 있다. 축소 구조 요소와 더 복잡한 IC에서 이 벤딩은 더 악화된다. 상기 방법은 반도체 공장의 제조 공정 중에 축적된 처리된 또는 부분적으로 처리된 웨이퍼의 벤딩을 보정하는 IC의 제조 공정 내에서 사용될 수 있다. 따라서, 상기 정의된 방법은 미래의 IC의 성능 손실을 적어도 부분적으로 방지할 수 있다.
- [0065] 또 다른 양태에서, 상기 웨이퍼는 실리콘을 포함하고, 상기 레이저 펄스의 파장은 $1.0\ \mu\text{m} - 8.0\ \mu\text{m}$, 바람직하게는 $1.3\ \mu\text{m} - 7.0\ \mu\text{m}$, 및 가장 바람직하게는 $1.5\ \mu\text{m} - 6.0\ \mu\text{m}$ 의 범위에 있다.
- [0066] 또 다른 양태는 레이저 펄스의 에너지가 웨이퍼의 밴드 갭 에너지에 가깝도록 레이저 펄스에 대한 파장을 선택하는 단계를 포함한다. 또 다른 양태에서, 웨이퍼는 실리콘을 포함하고, 레이저 펄스의 파장은 1300 nm 보다 작고, 더 바람직하게 1200 nm 보다 작고, 가장 바람직하게 1100 nm 보다 작다.
- [0067] 바람직한 양태에 따르면, 상기 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 상기 웨이퍼에 도입하면, 상기 웨이퍼가 구부러진다. 바람직한 양태에서, 상기 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 상기 웨이퍼에 도입하면, 웨이퍼 처리 시에 발생하는 상기 웨이퍼의 벤딩이 보상된다.
- [0068] 또 다른 양태에서, 상기 레이저 펄스의 적어도 하나의 3차원 배열은, 상기 웨이퍼의 깊이에 대하여 상기 웨이퍼에 비대칭으로 도입된다.

- [0069] 또 다른 양태에서, 상기 웨이퍼는 마이크로 전자 기계 시스템(MEMS) 및/또는 광자 집적 회로를 포함한다.
- [0070] 또 다른 양태는 웨이퍼의 전면 측을 통해 상기 웨이퍼에 상기 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 도입하는 것을 포함하며, 하나 이상의 집적 회로들을 생성하기 위해 상기 웨이퍼는 전면이 처리된다. 또 다른 양태에 따르면, 레이저 펄스의 에너지는 가장 낮은 밴드 갭 에너지를 갖는 집적 회로의 재료보다 낮다.
- [0071] 또 다른 양태는 하나 이상의 집적 회로들을 생성하기 위해 상기 웨이퍼가 처리되는 전면에 대향하는 웨이퍼의 후방 측을 통해 상기 웨이퍼에 상기 계산된 적어도 하나의 레이저 펄스의 3차원 배열을 도입하는 것을 포함한다.
- [0072] 다른 바람직한 양태는, (f) 상기 미리 정해진 3차원 윤곽으로부터 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 생성된 3차원 윤곽의 잔여 편차를 결정하는 단계; (g) 상기 잔여 편차가 미리 정해진 스트레스홀드보다 작으면, 상기 방법을 종료하는 단계; 및 (h) 상기 잔여 편차가 상기 미리 정해진 스트레스홀드 이상이면, 단계 (b) 및 (c)를 반복하는 단계를 포함한다.
- [0073] 다른 바람직한 양태에서, 상기 광학 부품은 근적외선, 가시광 및/또는 근자외선 파장 범위의 광을 광학적으로 투과시킨다.
- [0074] 본 형태는 본 발명의 방법의 단계 (c)가 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼 상에서 실제로 실행될 수 있는 것을 확실하게 한다.
- [0075] 또 다른 양태에 따르면, 광학 부품 및/또는 웨이퍼의 미리 정해진 3차원 윤곽을 생성하는 장치는, (a) 상기 미리 정해진 3차원 윤곽으로부터 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 기존 3차원 윤곽의 편차를 결정하도록 동작 가능한 계측 툴; (b) 상기 미리 정해진 3차원 윤곽으로부터 상기 3차원 윤곽의 상기 결정된 기존 편차를 정정하기 위한 레이저 펄스를 정의하는 하나 이상의 파라미터 세트를 갖는 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 계산하도록 동작 가능한 연산부; 및 (c) 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 상기 미리 정해진 3차원 윤곽을 생성하기 위해 상기 계산된 적어도 하나의 3차원 배열의 레이저 펄스를 가하도록 동작 가능한 광원을 포함한다.
- [0076] 다른 양태에서, 상기 계측 툴은 접촉 조면계, 의사 접촉 조면계, 비접촉 조면계, 간섭계, 백색광 간섭계, 공초점 현미경, 포토 마스크 계측 툴, 및/또는 주사형 전자 현미경을 포함한다.
- [0077] 다른 바람직한 양태에서, 상기 연산부는 마이크로 프로세서, 범용 프로세서, 특수 목적 프로세서, 중앙 처리 장치 및/또는 이들의 조합을 포함한다.
- [0078] 또 다른 양태에서, 상기 광원은 초단 레이저 펄스의 빔을 생성할 수 있는 레이저 소스, 및 레이저 펄스의 상기 적어도 하나의 배열을 생성할 수 있는 주사 수단을 포함한다. 또 다른 양태에서, 상기 레이저 소스는, Ti:사파이어 레이저 시스템 및/또는 네오디뮴(Nd), 톨륨(Tm), 홀뮴(Ho) 및 에르븀(Er)으로 이루어진 그룹의 적어도 하나의 요소가 도핑된 YAG 레이저 시스템을 포함한다. 마지막으로, 상기 장치는, 반도체 공장에서의 반도체 제조 장치에 통합된다.

도면의 간단한 설명

- [0079] 본 발명을 더 잘 이해하고 그 실용적인 적용을 이해하기 위해, 다음의 도면들이 제공되어 다음에 참조된다. 이 도면들은 단지 일 예이며, 어떠한 방식으로든 본 발명의 범위를 제한하는 것은 아닌 것에 주목되어야 한다.
- 도 1은 투과형 포토 리소그래픽 마스크의 단면을 개략적으로 나타내는 도면이다.
- 도 2는 반사형 포토 리소그래픽 마스크의 단면을 개략적으로 나타내는 도면이다.
- 도 3은 불균일한 후면을 갖는 극자외선(EUV) 마스크 블랭크의 단면을 개략적으로 나타내는 도면이다.
- 도 4는 광학 부품의 기존의 3차원 형상(3D)의 결정을 위한 공초점 현미경의 단면도를 개략적으로 나타내는 도면이다.
- 도 5는 레이저 펄스의 3차원(3D) 배열을 산출하고, 미리 정해진 형상을 생성하기 위한 광학 부품에 레이저 펄스의 계산된 3차원 배열을 적용하는 장치의 블록도를 개략적으로 나타내는 도면이다.
- 도 6은 EUV 마스크에 레이저 펄스의 계산된 3차원(3D) 배열을 적용하는 구성을 개략적으로 나타내는 도면이다.
- 도 7은 마스크 블랭크를 주로 수직 방향으로 국부적으로 확장시키는, 픽셀을 생성하는 레이저 펄스의 두 개의 2

차원(2D) 배열을 적용하여 마스크 블랭크 표면에 수직으로 초기에 평평한 마스크 블랭크를 확장시키는 것을 개략적으로 나타내는 도면이다.

도 8은 빔 방향에 수직인 평면에서 본질적으로 등방성 확장을 가져오는 레이저 펄스의 인가에 의해 기본 영역에 유도된 변형을 개략적으로 표시하는 도면이다.

도 9는 x-방향으로 본질적으로 1차원 확장을 가져오는 레이저 펄스의 인가에 의해 기본 영역에 유도된 변형을 개략적으로 표시하는 도면이다.

도 10은 3차원 배열의 레이저 펄스가 적용되는 마스크 블랭크의 일부를 나타내는 도면이다.

도 11은 도 8에 표시한 것 같이 기본 영역의 변형을 가져오는 레이저 펄스를 사용하는 레이저 펄스의 2D 배열에 의해 유도된 빔 방향(z-방향)의 마스크 블랭크의 변형을 도시하는 도면이다.

도 12는 도 9에 표시한 것 같이 기본 영역의 변형을 가져오는 레이저 펄스를 사용하는 레이저 펄스의 2D 배열에 의해 유도된 빔 방향의 마스크 블랭크의 변형을 도시하는 도면이다.

도 13은 생성되는 회전 대칭 3차원 목표 형상의 단면을 나타내는 도면이다.

도 14는 마스크 블랭크 상의 2D 표현으로서 도 13의 3차원 목표 형상을 나타내는 도면이다.

도 15는 x-방향으로 도 14의 마스크 블랭크의 확장을 행하기 위해 사용되는 레이저 펄스의 계산된 2D 배열 또는 기입 맵을 도시하는 도면이다.

도 16은 y-방향으로 도 14의 마스크 블랭크의 확장을 행하기 위해 사용되는 레이저 펄스의 계산된 2D 배열을 도시하는 도면이다.

도 17은 도 15 및 16의 기입 맵을 포함하는 3차원 배열의 레이저 펄스를 인가함으로써 마스크 블랭크에 유도된 측정된 3차원 윤곽을 나타내는 도면이다.

도 18은 평활화 박관 스플라인(TPS: smoothing thin plate spline) 피트를 적용한 뒤의 도 17의 측정된 3차원 윤곽을 나타내는 도면이다.

도 19는 도 13의 3차원 목표 형상(y-축에 의해 표시된 y-방향의 스케일)과 도 18에 표시된 단면에서 얻어진 2개의 플롯(도 19의 우측에 표시된 y-방향의 스케일)을 비교하는 도면이다.

도 20은 3차원 배열의 레이저 펄스를 적용함으로써 최초 평평한 마스크 블랭크로부터 큰 초점 길이를 갖는 렌즈의 제조를 개략적으로 도시하는 도면이다.

도 21은 새들의 프로필을 갖는 3차원 목표 형상의 2D 표현을 나타내는 도면이다.

도 22는 최초 평평한 마스크 블랭크를 마스크 블랭크의 전면에 가깝게 수평 방향(x-방향)으로 확장하기 위해 사용되는 레이저 펄스의 계산된 2D 배열을 나타내는 도면이다.

도 23은 최초 평평한 마스크 블랭크를 마스크 블랭크의 전면에 가깝게 수직 방향(y-방향)으로 확장하기 위해 사용되는 레이저 펄스의 계산된 2D 배열을 나타내는 도면이다.

도 24는 최초 평평한 마스크 블랭크를 후방 마스크 블랭크 표면에 가깝게 수평 방향으로 확장하기 위해 사용되는 계산된 2D 기입 모드를 표시하는 도면이다.

도 25는 최초 평평한 마스크 블랭크를 후방 마스크 블랭크 표면에 가깝게 수직 방향으로 확장하기 위해 사용되는 계산된 2D 기입 모드를 표시하는 도면이다.

도 26은 도 23 내지 26의 기입 맵을 포함하는 3차원 배열의 적용에 의해 유도된 마스크 블랭크의 측정된 3차원 윤곽을 나타내는 도면이다.

도 27은 마스크 블랭크의 측정된 3차원 윤곽을 나타내는 도면이다.

도 28은 TPS 피트를 적용한 뒤의 도 27의 측정된 3차원 윤곽을 나타내는 도면이다.

도 29는 3차원 윤곽을 제거하기 위해, 즉, 마스크 블랭크 표면을 평탄하게 하기 위해, 도 27의 3차원 윤곽을 수평 방향으로 확장하기 위한 레이저 펄스의 계산된 2D 배열 또는 기입 맵을 나타내는 도면이다.

도 30은 3차원 윤곽을 제거하기 위해, 즉, 마스크 블랭크 표면을 평탄하게 하기 위해, 도 27의 3차원 윤곽을 수

직 방향으로 확장하기 위한 레이저 펄스의 계산된 2D 배열을 나타내는 도면이다.

도 31은 도 29 및 30의 기입 맵을 포함하는 3차원 배열의 레이저 펄스를 적용한 뒤 도 27의 3차원 윤곽을 나타내는 도면이다.

도 32는 높이 스케일을 8 μm (-4000 nm 내지 +4000nm)로부터 1 μm (-500 nm 내지 +500 nm)로 줄인 후 도 31의 3차원 윤곽을 나타내는 도면이다.

도 33은 평활화 TPS 피트를 적용한 뒤의 도 32의 3차원 윤곽을 나타내는 도면이다.

도 34는 0.1 μm 내지 100 μm 의 파장 범위에서 실리콘(Si)의 투과 스펙트럼의 개요를 나타내는 도면이다.

도 35는 1 μm 내지 9 μm 의 파장 범위에서 Si의 투과 스펙트럼을 나타내고, 이 파장 범위에서 투과의 온도 동작을 추가적으로 나타내는 도면이다.

도 36은 250 nm 내지 1400 nm의 파장 범위에 걸친 흡수 계수의 변동을 나타내는 도면이다.

도 37은 가우스 빔의 초점 범위를 나타내고, 이 범위에서 실린더를 나타내는 도면이다.

도 38은 가우스 빔 초점에서 도 37의 실린더에서 레이저 펄스에 의해 증착된 에너지를 나타낸다.

도 39는 개별 펄스가 펄스 폭 Δt_{pulse} 및 주기 ΔT 를 갖는 주기적인 펄스 열을 나타내는 도면이다.

도 40은 밴드 에지 범위, 즉, 950 nm 내지 1200 nm의 파장 범위에서 Si의 투과율을 나타내는 도면이다.

도 41은 도 37의 가우스 빔 초점을 Si의 용점을 넘는 온도까지 가열하기 위해 추정된 펄스 에너지를 나타내는 도면이다.

도 42는 웨이퍼의 전면 상에 집적 회로를 제조하기 위한 공정의 시작 전에 웨이퍼를 통한 개략 단면을 나타내는 도면이다.

도 43은 일부 또는 모든 처리 단계들이 실행된 후의 도 34의 웨이퍼를 개략적으로 표현하며, 처리된 웨이퍼에 도입되는 레이저 펄스의 2개의 3차원(3D) 배열의 위치를 나타내는 도면이다.

도 44는 레이저 펄스의 2개의 3차원 배열이 처리된 웨이퍼에 유발된 후의 도 35의 처리된 웨이퍼를 개략적으로 도시하는 도면이다.

도 45는 본 발명의 방법의 플로우차트를 나타내는 도면이다.

도 46a 및 46b는 EUV 마스크의 미리 정해진 3차원 윤곽을 생성하기 위한 EUV 마스크의 제조 공정 동안 본 발명의 방법을 사용하는 플로우차트를 나타내는 도면이다.

도 47은 광학 부품의 기본 체적 또는 기본 셀을 개략적으로 나타내는 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0080]

5. 바람직한 실시 예들에 대한 상세한 설명

[0081]

본 명세서의 이 부분은 다음과 같이 구성된다: 이 부분은 우선, 미리 정해진 3차원 윤곽에 따른 기존 3차원 윤곽을 가져오기 위해, 3차원 배열의 레이저 펄스를 계산하고, 광학 소자에 상기 계산된 3차원 배열의 레이저 펄스를 적용하기 위해, 광학 부품의 기존 3차원 윤곽을 결정하기 위해 사용되는 몇몇 광학 부품과 몇몇 예시된 장치를 설명한다. "적용예"라는 제목의 제2 부분에서, 본 발명의 방법은, 파트 a. 포토 리소그래픽 마스크의 미리 정해진 3차원 윤곽의 생성 및 파트 b. 웨이퍼에 적용된다. 마지막으로, 이 섹션의 다양한 예들에 대한 논의에 필요한 본 발명의 방법의 이론적 및/또는 수학적 배경은 "이론적 배경" 제목의 자신의 섹션에 표시된다.

[0082]

5.1 광학 부품, 계측 툴 및 레이저 시스템의 실시 예

[0083]

이하, 본 발명의 실시 예가 도시된 첨부 도면을 참조하여, 본 발명을 보다 완전하게 설명한다. 그러나, 본 발명은 상이한 형태로 구현될 수 있으며, 본 명세서에 기재된 실시 예들에 한정되는 것으로 해석되어서는 안 된다. 오히려, 본 개시가 명백해지고 당업자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달되도록 이 실시 예들이 제공된다.

[0084]

이하에서, 포토 리소그래픽 마스크와 웨이퍼를 일 예로 사용해서 본 발명을 기재한다. 그러나, 본 발명은 망원

경, 현미경, 및/또는 레이저 시스템에 사용되는 광학 소자에 적용될 수 있으며, 몇 가지 예만을 기재한다. 또한, 광학 부품의 동작 파장 범위는 리소그래피 분야에서 사용되는 파장에 제한되지 않는다. 오히려, 본 발명의 방법에서 처리되는 광학 부품은 전체 광범위에 걸쳐 있다. 또한, 본 발명은 후술하는 실리콘 웨이퍼에 제한되지 않는다. 오히려, 본 발명은, 임의의 유형의 집적 회로의 제조 공정 중 웨이퍼의 모든 종류에 적용될 수 있다.

[0085] 마지막으로, 본 명세서의 세 번째 섹션에 정의된 방법은, 그 재료가 전자기 스펙트럼의 특정 파장 범위의 광을 투과하는 모든 구성 요소에 적용될 수 있다. 구성 요소의 재료(들)가(이) 이 필요 조건을 만족하면, 구성 요소의 재료 내에 픽셀들이 도입될 수 있다. 레이저 시스템은 구성 요소의 재료에 픽셀을 기입하기 위한 레이저 펄스를 생성하기 위해 일반적으로 사용되므로, 투과 파장 영역이 작은 (<100 nm) 것만이 필요하다. 다수의 레이저 소스가 이들 스펙트럼 범위에 대해서 이용 가능하므로, 현재, 구성 요소의 재료의 투과 파장 범위가 전자기 스펙트럼의 자외선, 가시 광선 및/또는 적외선 부분에 있는 것이 바람직하다.

[0086] 도 1은 투과형 포토리소그래픽 마스크(100)의 개략 단면을 나타낸다. 마스크(100)는 제1 또는 전면(130) 및 제2 또는 후면(140)을 갖는 기판(110)을 구비한다. 기판(110)은 웨이퍼 상의 포토레지스트의 조명에 대해서 사용되는 파장을 투과해야 한다. 노광 파장은, 전자기 스펙트럼의 원자외선(DUV) 스펙트럼 범위에 있을 수 있고, 특히, 대략 193 nm이다. 기판 재료는 일반적으로 석영을 포함한다. 기판은 152 mm x 152 mm의 전형적인 폭 치수와 본질적으로 6.35 mm의 두께 또는 높이를 가지고 있다. 포토리소그래픽 마스크(100)의 기판(110)은, 그 전면(130)에 일반적으로 크롬으로 제조된 패턴 요소(120)가 형성되고, 포토레지스트 상에 반도체 장치가 제조되는 미리 정해진 구조의 소자를 형성한다. 패턴 요소(120)를 갖는 포토리소그래픽 마스크(100)의 기판(110)의 일부는 마스크의 활성 영역(150)으로 칭하고, 패턴 요소(120)를 갖지 않는 경계부 또는 주변부는 비활성 영역(160)으로 칭한다. 노광 파장에서의 레이저 빔(170)은 기판(110)의 제2 또는 후면(140)을 통해 마스크(100)의 기판(110)을 조명한다.

[0087] 도 2는 전자기 스펙트럼의 극 자외선(EUV) 스펙트럼 범위, 특히, 10 nm 내지 15 nm의 범위의 노광 파장에 대해서 나중에 사용하기 위한 반사 포토리소그래픽 마스크(200)의 개략 단면도를 나타낸다. 도 1의 포토리소그래픽 마스크(100)와 달리, 마스크(200)는 다층 미러 구조물(255)에 기초한 반사 광학 부품이다. 포토리소그래픽 마스크(200)의 다층 미러 시스템(255)은 용융 실리카 기판과 같은 적절한 기판(210)의 전방 기판 표면(230) 상에 증착된다. 기타 투명 유전체, 유리 재료 또는 반도체 재료는 예를 들면, ZERODUR[®], ULE[®], 또는 CLEARCERAM[®]와 같은 EUV 포토리소그래픽 마스크용 기판으로서 적용될 수 있다.

[0088] 다층 미러 시스템(255)은, 예를 들면, 40개의 몰리브덴(Mo) 층(250)과 실리콘(Si) 층(260)의 교호쌍을 포함한다. 각각의 Mo 층(250)의 두께는 4.15 nm이고, Si 층(260)의 두께는 2.80 nm이다. 다층 구조물(255)을 보호하기 위해, 7 nm 깊이의 자연 산화물을 갖는 실리콘 캡 층(270)이 구조물(255)의 상부에 배치된다. 다층 미러 시스템(255)에서, Mo 층(250)은 산란층으로 기능하는 반면, Si 층(260)은 분리층으로 기능한다. Mo 대신에, 코발트(Co), 니켈(Ni), 텅스텐(W), 레늄(Re) 및 이리듐(IR)과 같은 높은 Z 번호를 갖는 다른 요소가 산란층으로 사용될 수 있다.

[0089] 기판(210) 상의 다층 구조물(255)은 EUV 전자기 방사를 위한 미러의 역할을 한다. 포토리소그래픽 마스크(200)를 형성하기 위해, 버퍼 구조물(280) 및 흡수 구조물(290)이 캡층(270)에 추가로 증착된다. 처리시, 예를 들면, 흡수 구조물(290)의 에칭시, 버퍼층(280)이 다층 미러 구조물(255)을 보호하기 위해 증착될 수 있다. 가능한 버퍼 구조물의 재료는, 예를 들면, 용융 실리카(SiO₂), 실리콘 산화 질화물(SiON), 루테튬(Ru), 크롬(Cr), 및/또는 질화 크롬(CrN)이다. 흡수 구조물(290)은 EUV 파장 범위 내의 광자에 대해서 큰 흡수 상수를 갖는 재료를 포함한다. 이러한 재료의 예는 크롬(Cr) 및/또는 탄탈 질화물(CrN)이다. 일반적으로, 약 50 nm의 두께는 흡수 구조물(290)에 입사된 모든 EUV 광자(295)를 본질적으로 흡수하기에 충분하다. 대조적으로, 상기 캡층(270)에 입사된 광자(295)의 대부분은 광자(297)로서 반사된다.

[0090] 일반적으로, EUV 마스크(200)의 기판(210)은 또한 152 mm x 152 mm의 폭 치수와 본질적 6.35 mm의 두께 또는 높이를 갖는다. 기판(210)의 후면(225) 또는 후방 기판 표면(225)은 얇은 금속 코팅(220)을 갖는다. 일반적으로, 이 코팅(220)은 크롬을 포함하고 있다. 금속 코팅(220)은 정전기력의 인가에 의해 EUV 스캐너에서 포토리소그래픽 마스크(200)를 고정하는데 사용된다.

[0091] 광학 부품의 미리 정해진 3차원 윤곽을 생성하는 방법에서, 예를 들면, 다음에 설명하는 EUV 마스크(200)로서, 광 빔의 광 펄스로부터의 에너지가 EUV 마스크(200)의 기판(210)에 국부적으로 증착된다. 그러나, 광 빔의 광

펄스는 다층 미러 구조물(255)에 의해 흡수되면서, 전방 기관 표면(230)을 관통할 수 없고, 후방 기관 표면(225)위의 금속 코팅(220)에 의해 흡수되면서 후방 기관 표면(225)을 관통할 수 없다.

[0092] 그러므로, EUV 마스크(200)의 후방 기관 표면(225) 상의 금속 코팅(220)은, 도 2에 도시된 것 같이, 투과 전도성 코팅(222)으로 교체된다. 이러한 투과 전도성 코팅(222)은 예를 들면, 인듐 주석 산화물(ITO)을 포함한다. 용어 투과 전도성 코팅은, 코팅(222)이 근적외선, 가시광, 및/또는 근자외선 파장 범위의 광을 광학적으로 투과시키는 것을 의미한다.

[0093] 투과 전도성 코팅의 대체 물질은 예를 들어, 플루오르 주석 산화물(FTO) 및/또는 알루미늄 아연 산화물(AZO) 및/또는 안티몬 주석 산화물(ATO)이다. 이들 재료는 용융 실리카 기관(210)의 후방 기관 표면(225)에 쉽게 도포될 수 있고, EUV 스캐너로 마스크(200)를 고정하기에 충분히 높은 전도성을 가질 수 있다. 투과 전도성 코팅(222)으로 인해 후방 기관 표면(225)을 통해 레이저 빔의 광 펄스(200)를 완전하게 제작된 EUV 마스크(200)에 조사할 수 있다. 투과 전도성 코팅(222)으로 인해서, 제조 공정시, 마스크 제조 공정의 제 1단계에서, 코팅(222)이 마스크 블랭크 또는 후방 기관 표면(225) 상에 배치되면, 초단 레이저 펄스를 EUV 마스크(200)에 조사할 수 있다.

[0094] EUV 미러가 버퍼층(280)과 흡수 구조물(290)을 갖지 않으면, 포토리소그래픽 마스크(200)의 구조를 가질 수 있다. 그러므로, EUV 미러에 대해서, 금속 코팅(220)이 투과 전도성 코팅(222)에 의해 교체될 수 있으므로, 광 펄스가 후방 기관 표면(도 2에 비도시)으로부터 기관으로 들어갈 수 있다.

[0095] 도 3의 도해 300은 후방 기관 표면(340)은 평평하지 않고 미리 정해진 표면 형상(350)으로부터 2개의 편차(360, 370)를 갖는 EUV 마스크(300)의 마스크 블랭크 또는 기관(310)을 개략적으로 나타낸다. 다층 구조물(255)을 증착하는 척에 마스크 블랭크(310)를 고정할 때, 척은 블랭크(300)의 후면(340)을 평평하게 하여, 전면(330)에 왜곡을 가져온다. 그래서, 다층 구조물(255)이 기관(310)의 불균일한 전면(330)에 증착된다. 이로써 다층 구조물(255)이 결국 불균일한 표면을 갖게 된다.

[0096] 기관(310)로부터 EUV 마스크의 제조 시, 후면(340)이 평평하지 않으므로 블랭크(310)를 척으로 고정할 때, EUV 마스크의 평평한 또는 미리 정해진 전면 형상이 제조될 수 있다. 그러나, EUV스캐너에 기관(310)으로부터 제조된 마스크를 고정할 때, 그 단계의 정전기력은 후방 기관 표면(340)의 편차(360, 370)를 본질적으로 평평한 표면(350)으로 평평하게 한다. 차례로, 도 2의 본질적으로 이상적인 EUV 마스크(200)와 비교하여 기관(310)에 배치된 다층 구조물(255)의 수차로 이어진다. 편차(360, 370)에 의해 생기는 수차는 웨이퍼의 위치를 변화시키거나 재생 배율을 변화시킴으로써 제거될 수 없다. 이미 논의된 바와 같이, 1 나노 미터의 범위의 전방 기관 표면(330)의 편평도의 편차는 수차를 유도하기에 이미 충분하다.

[0097] 현재, EUV 마스크(200)의 흡수 구조물(290)은 전자 빔 라이터로 흡수 재료의 층을 패터닝함으로써 일반적으로 생성된다. 이 과정에서, EUV 마스크(200)는 정전 척에 의해 고정되지 않는다. 이것은, 마스크 블랭크(310)의 비평탄 후면(340)은 본질적으로 패터닝 처리 동안 변경되지 않는다는 것을 의미한다. 따라서, 도 3에 나타낸 바와 같은 후방 기관 표면 형상(340)을 갖는 EUV 마스크는, 조명 공정 동안 정전 척에 고정될 때 다른 모양을 가진다. 이는 웨이퍼의 이미지 배치의 왜곡을 초래한다. 표준 마스크 벤딩에 대해서, 보정된 좌표로 전기 빔 라이터를 제어함으로써 이 문제가 부분적으로 수학적으로 해결된다. 그러나, EUV 마스크의 후방 기관 표면의 벤딩이 복잡한 형상을 가질 수 있으면서 여전히 문제가 존재한다. 더욱이, 패터닝 처리 자체는 비평탄 표면에는 이상적이지 않다.

[0098] 도 4는 광학 부품 또는 웨이퍼의 2차원(2D) 또는 3차원 이미지를 결정하기 위해 사용될 수 있는 계측 툴(400)의 예를 개략적으로 도시한다. 도 4의 공초점 현미경(400)은 광학 부품 또는 웨이퍼의 3차원 윤곽을 측정하기 위해 적용될 수 있는 계측 툴의 클래스의 예일 뿐이다. 예를 들어, 조면계는 웨이퍼뿐만 아니라 광학 부품의 표면 프로파일 또는 2D 또는 3차원 미세 또는 서브미세한 형상을 분석하는데 사용될 수 있다. 접촉 또는 의사 접촉 방법을 활용하는 조면계가 사용될 수 있다. 스타일러스 조면계 또는 기계적 조면계, 원자력 현미경, 주사 터널링 현미경은 이 유형의 조면계의 예이다. 또한, 예를 들면, 광학적 방법을 적용하는 다수의 비접촉 조면계도 또한 이용가능하다. 이러한 유형의 조면계는, 예를 들면, 수직 주사 간섭계, 백색광 간섭계, 위상 편이 간섭계, 및/또는 미분 간섭 대조 현미경이다.

[0099] 다음에, 공초점 센서(400) 또는 공초점 현미경(400)의 동작 원리의 개요를 설명한다. 공초점 현미경(400)은 초점을 벗어난 신호 성분을 제거하기 위해 검출기의 전면에서 광학적으로 공액 평면에서 핀홀의 점 조명을 사용한다. 도 4의 예에서, 점 조명은 광원(420)에 의해 생성되고, 광섬유(425)는 광원(420)의 광을 핀홀(430)

을 통해 대물 렌즈(440)를 거쳐 포토 마스크(410)의 초점면(450)에 연결된다. 초점면(450)으로부터 반사된 광은, 검출기(475)의 전방에 배치된 핀홀(465)로 다이크로익 미러(435)에 의해 지시된다. 초점면(450)의 외부로부터 반사되는 광의 일부는 초점면(450)으로부터 반사된 광보다 현저하게 작다. 또한, 초점면의 외부로부터 반사되는 광은 핀홀(465)에 포커싱되지 않는다.

[0100] 예를 들어, 광원(420)은 레이저 광원일 수 있다. 광섬유(425)가 핀홀(430)에 광원으로부터의 전자기 방사선을 안내하기 위해 사용되는 경우, 광섬유(425)가 핀홀(430)과 유사한 효과를 가지므로, 핀홀(430)이 생략가능하다. 예를 들어 검출기(475)는 포토 다이오드, 애벌랜치 포토 다이오드 또는 광전자 배증관(photomultiplier)일 수 있다.

[0101] 포토 마스크 또는 일반적으로 광학 부품(410)은 샘플 스테이지(405) 상에 배치될 수 있다. 샘플 스테이지(405)는 가동이고, 입사광 빔(x- 및/또는 y-방향)에 직교한 면에서 주사부(480)에 의해 이동된다. 예를 들어, 미세 조작기 또는 서보 모터(도 4에 도시되지 않음)는 샘플 스테이지(405)를 이동시키기 위해 사용될 수 있다. 샘플 스테이지(405)를 빔 방향에 평행하게 움직이거나 및/또는 대물 렌즈(440)를 시프팅함으로써, 초점면은 광학 부품(410)을 통해 주사될 수 있다. 다른 구현 예에서 샘플 스테이지는 고정이고, 광빔(455)은 포토 마스크(410)에 걸쳐 주사된다. 이 구현은 공초점 레이저 주사 현미경(CLSM: confocal laser scanning microscope)이라고 한다(도 4에 도시되지 않음).

[0102] 제어부(470)는 광원(420), 검출기(675)뿐만 아니라, 스캔 부(480)도 제어한다. 제어부(470)는 대물 렌즈(440)의 이동(도 4에 도시되지 않음)을 또한 제어한다. 또한, 제어부(470)는 적어도 프로세서, 저장부, I/O(입력/출력)부, 및 디스플레이를 갖는 컴퓨터 시스템에 내장될 수 있다(도 4에 도시되지 않음). 제어부 또는 컴퓨터 시스템은 상기 검출기(475)로부터 수신된 데이터를 저장한다. 또한, 상기 제어부의 처리부 또는 컴퓨터 시스템의 프로세서(또한, 도 4에 도시되지 않음)는 검출기(475)의 측정 데이터를 처리할 수 있다. 마지막으로, 상기 장치(500)로 측정 및/또는 처리된 데이터를 전송하기 위해, 제어부(470) 또는 컴퓨터 시스템은 도 5의 장치(500)로의 연결을 가질 수 있다.

[0103] 횡 방향의 공초점 현미경(400)의 해상도는 회절에 의해 제한된다. 이것은, 가로 해상도가 핀홀(430, 465)의 직경 또는 개구, 대물렌즈(440)의 개구 수(NA), 및 광원(420)의 파장에 의존하는 것을 의미한다. 횡방향에서, 해상도는 광원(420)의 파장의 범위에 있다. 빔 방향의 해상도는 회절에 제한되지 않지만, 최대 강도의 위치의 결정에 의해 제한된다. 이 빔 방향의 해상도는 한 자리 나노미터 범위에 도달한다.

[0104] 도 5는 레이저 펄스의 배열을 계산하고 광학 부품 및/또는 웨이퍼에 적용하기 위해 사용될 수 있는 장치(500)의 개략 블록도를 도시한다. 원리에 대해서, 도 1 및 도 2의 마스크를 일 예로 설명한다. 광학 부품의 다른 예는 나노임프린트 기술에서 사용된 템플릿 및/또는 광학 시스템의 렌즈일 수 있다. 또 다른 예는, 그 위에 집적 회로(IC)가 생성되어 있는 웨이퍼이다. 이 장치(500)는 3차원으로 이동될 수 있는 척(520)을 구비한다. 광학 부품(510), 예를 들면, 마스크(510)는, 예를 들어 클램핑과 같은 다양한 기술을 사용하여, 척(520)에 고정될 수 있다. 포토리소그래픽 마스크(510)는 거꾸로 탑재된 도 1의 투과형 마스크(100)일 수 있으므로, 후방 기판 표면(140)은 대물렌즈(540)를 향한다.

[0105] 장치(500)는 펄스 또는 광 펄스의 빔 또는 광 빔(535)을 생성하는 펄스 레이저 소스(530)를 구비한다. 레이저 소스(530)는 가변 기간의 광 펄스를 생성한다. 펄스 기간은 10 fs 만큼 낮을 수 있지만, 100 ps까지 연속적으로 증가될 수 있다. 펄스 레이저 소스(530)에 의해 생성된 광 펄스의 펄스 에너지는 펄스당 0.001 μ J 내지 펄스당 10 mJ에 달하는 넓은 범위에 걸쳐서 조정가능하다. 또한, 광 펄스의 반복률은 1 Hz 내지 100 MHz의 범위를 포함한다. 바람직한 실시 예에서, 광 펄스는 대략 800 nm의 파장에서 동작하는 Ti:사파이어 레이저에 의해 생성될 수 있다. 그러나, 다음에 서술된 방법은 이 레이저 유형에 제한되지 않고, 원칙적으로 광학 부품(510)의 밴드 갭보다 작은 광자 에너지를 갖고 펨토초 범위의 기간을 갖는 극단 펄스를 생성할 수 있는 모든 레이저 유형이 사용될 수 있다. 이 기준은 웨이퍼에 대해서도 유지된다. 일반적으로, 장치(500)의 발광 파장은 광학 부품(510) 또는 웨이퍼의 밴드 갭에 대해서 채택되어야 한다.

[0106] 그러므로, 예를 들면, 네오디뮴(Nd), 툴륨(Tm), 홀륨(Ho) 및 에르븀(Er) 요소중 적어도 하나가 도핑된 YAG 레이저 시스템이 또한 사용될 수 있다. 또 다른 예로서, 다이 레이저 시스템이 또한 적용될 수 있다. 장치(500)는 이 유형 또는 다른 유형의 하나 이상의 펄스 레이저 소스(530)를 포함할 수 있다(도 5에 도시되지 않음).

[0107] 광학 부품(510)의 밴드 갭이 초단 레이저 펄스를 적용하는 데 사용되는 레이저 광원의 발광 파장보다 커야 한다는 필요 조건은 광학 부품(510)이 근적외선, 가시광 및/또는 근 자외선 파장 범위의 광을 광학적으로 투과시킨

다는 필요 조건과 일반적으로 같다. 이러한 파장 영역에서, 레이저 소스는 큰 에너지 밀도를 갖는 극단 펄스를 생성 할 수 있는데 유용하다.

[0108] 다음 표는 본 발명의 방법의 실시 예에서 사용되는 주파수 2배의 Nd-YAG 레이저 시스템의 레이저 빔 파라미터의 개요를 나타낸다.

표 1

[0109] Nd-YAG 레이저 시스템용 선택된 레이저 빔 파라미터의 수치

개요		
파라미터	수치	단위
펄스 에너지	0.05 - 5	μ J
펄스 길이	0.05 - 100	ps
반복률	1 - 10,000	kHz
펄스 밀도(2D, 횡)	1,000 - 10,000,000	mm^{-2}
NA	0.1 0.9	
파장	532	nm

[0110] 펄스 밀도는 빔 방향(측면)과 직교하는 평면에서 2 차원 밀도를 지칭한다.

[0111] 표 1에 나타난 것 같이, 픽셀의 생성을 위해 사용된 레이저 펄스의 파라미터 범위는 크다. 그러므로, 픽셀의 특성은 또한 매우 다르다. 일반적으로, 레이저 펄스는 구형의 픽셀을 생성하지 않고, 타원체 또는 회전 타원체와 유사한 형태를 갖는 픽셀을 생성한다. 회전 타원체의 길이는 1 μ m 내지 50 μ m의 범위에 있고, 그 폭 또는 두께는 예를 들면 0.5 μ m 내지 10 μ m까지 연장된다. 두께에 대한 길이의 특성 비는 2 내지 10의 범위에 있다. 표 1에 나타난 것 같이, 횡 평면에서 픽셀 밀도는 사각형 mm당 10^3 내지 10^7 픽셀이다. 빔 방향의 일차원 픽셀 밀도는 mm 당 1 내지 100의 픽셀의 범위를 커버한다.

[0112] 다음 표는 포토마스크(100)의 기관(110)의 밀도 및/또는 광 투과 분포에 다르게 영향을 주는 파라미터를 나타낸다. 표 2는 표준 프로세스 윈도우(std PW: standard process window)로 불리는 픽셀을 도입 또는 기입하는 모드용 주파수 2배의 Nd-YAG 레이저 시스템을 사용하는 실시 예의 파라미터를 나타낸다.

표 2

[0113] 표준 프로세스 윈도우용 Nd-YAG 레이저 시스템용 선택된 레이저 빔 파라미터의 수치

Std PW(표준 프로세스 윈도우)		
파라미터	수치	단위
펄스 에너지	0.45	μ J
펄스 길이	8	ps
반복률	50,000	kHz
펄스 밀도(2D, 횡)	1,000 - 100,000	mm^{-2}
NA	0.3	
파장	532	nm

[0114] 표 3은 주파수 2배의 Nd-YAG 레이저 시스템을 사용하는 실시 예의 낮은 등록 프로세스 윈도우(LowReg PW: low registration process window)로 불리는 모드의 파라미터를 요약한 것이다. 레이저 시스템(530)의 동작 모드는 std PW보다 낮은 에너지를 갖는 광 펄스를 사용하지만, 더 높은 픽셀 밀도를 도입한다.

표 3

[0115] 낮은 등록 프로세스 윈도우(LowReg PW)용 Nd-YAG 레이저 시스템에 대한 선택된 레이저 빔 파라미터의 수치

Low Reg PW(낮은 등록 프로세스 윈도우)		
파라미터	수치	단위
펄스 에너지	0.32	μ J
펄스 길이	8	ps

반복률	50,000	kHz
펄스 밀도(2D, 횡)	5,000 - 500,000	mm ⁻²
NA	0.3	
과장	532	nm

[0116] 다음 표는, 레이저 시스템(530)의 광 펄스의 에너지를 더 줄인 것이 특징인, NoReg PW(no registration process window)로 불리는 모드에 대한 파라미터의 리스트이다.

표 4

[0117] NoReg PW(no registration process window)용 Nd-YAG 레이저 시스템에 대한 선택된 레이저 빔 파라미터의 수치

NoReg PW(no registration process window)		
파라미터	수치	단위
펄스 에너지	0.19	μJ
펄스 길이	8	ps
반복률	80 000	kHz
펄스 밀도(2D, 횡)	1,000 - 100,000	mm ⁻²
NA	0.4	
과장	532	nm

[0118] 표 5는 pixelless PW(pixelless process window)로 불리는 모드의 파라미터를 나타낸다. 이 경우, 광학 부품의 밀도 및/또는 광 투과 분포의 수정을 위해 Ti:사파이어 레이저 시스템이 사용된다. 이 레이저 시스템은 대략 800 nm의 방사 과장에서 초단 레이저 펄스를 생성한다. 픽셀리스 PW의 펄스 밀도는 매우 높다.

표 5

[0119] pixelless PW(pixelless process window)용 Ti:사파이어 레이저 시스템에 대한 선택된 레이저 빔 파라미터의 수치

pixelless PW(pixelless process window)		
파라미터	수치	단위
펄스 에너지	0.1 - 0.5	μJ
펄스 길이	0.15	ps
반복률	10 000	kHz
펄스 밀도(2D, 횡)	1,000,000 - 100,000,000	mm ⁻²
NA	0.33	
과장	800	nm

[0120] 스티어링 미러(590)는 펄스 레이저 빔(535)을 집속 대물렌즈(540)로 지향시킨다. 대물렌즈(540)는 펄스 레이저 빔(535)을 후방 기관 표면을 통하여 포토리소그래픽 마스크(510)의 기관으로 집광시킨다. 적용된 대물렌즈의 개구수(NA)는 초점의 미리 정해진 스폿 사이즈 및 후방 기관 표면에 대한 투과형 마스크(510)의 기관 내의 초점의 위치에 의존한다. 표 1에 나타낸 바와 같이, 대물렌즈(540)의 NA는, 본질적으로 1 μm의 초점 스폿 직경 및 본질적으로 10²⁰ W/cm²의 최대 강도를 초래하는 0.9까지 일 수 있다.

[0121] 장치(500)는 또한 레이저 빔(x 및 y 방향)에 수직인 평면에서 샘플 스테이지(520)의 2 축의 위치 설정 단계의 변환을 관리하는 제어기(580) 및 컴퓨터(560)를 포함한다. 제어기(580) 및 컴퓨터(560)는 대물 렌즈(540)가 고정되어 있는 1 축의 위치 설정 단계 550을 통하여 척(520)(Z 방향)의 평면에 직교하게 대물렌즈(540)의 변환을 제어한다. 또한, 장치(500)의 다른 구현 예에서, 척(520)은 광학 부품(510) 또는 마스크(510)를 목표 위치까지 이동시키기 위해 3축 위치 설정 시스템을 구비할 수 있고, 대물렌즈(540)는 고정될 수 있거나, 척(520)이 고정될 수 있고 대물렌즈(540)는 3차원으로 움직일 수 있다. 현재 바람직하지 않지만, 대물 렌즈(540) 및 척(520)이 모두 3축 위치 설정 시스템을 구비하는 것도 생각할 수 있다. 또한, 수동 위치 설정 단계가 예를 들면, 투과형 마스크인 광학 부품(510)을 x-, y- 및 z-방향으로 펄스 레이저 빔(535)의 목표 위치로 이동시키기 위해 사

용될 수 있고, 및/또는 대물렌즈(540)가 3차원 이동을 위한 수동 위치 설정 단계를 가질 수 있다.

- [0122] 또한, 장치(500)는 다이크로익 미러(545)를 통하여 척(520)(도 5에 도시되지 않음)에 배열된 조명 원으로부터 광을 수용하는, 예를 들면, CCD(전하 결합 소자) 카메라로서 검출기(565)를 포함하는 뷰잉 시스템을 제공할 수 있다. 뷰잉 시스템은 목표 위치에 광학 부품(510)의 탐색을 용이하게 한다. 또한, 상기 뷰잉 시스템은 광학 부품(510)에 광원(530)의 레이저 빔(535)으로 레이저 펄스의 배열을 기입하여 광학 부품(510)에서 변경된 영역의 형성을 관찰하는데 사용될 수 있다.
- [0123] 컴퓨터(560)는 마이크로 프로세서, 범용 프로세서, 특수 목적 프로세서, 중앙 처리 장치(CPU), 그래픽 처리 장치(GPU) 등일 수 있다. 컴퓨터는 또한 제어부(580)에 배치될 수 있고, 또는 PC(퍼스널 컴퓨터), 워크스테이션, 메인 프레임 같은 별도의 유닛일 수 있다. 컴퓨터(560)는 키보드, 터치 패드, 마우스, 비디오/그래픽 디스플레이, 프린터 등과 같은 I/O(입력/출력)부를 더 구비할 수 있다. 또한, 컴퓨터(560)는 하나 또는 여러 개의 연결 포트를 포함 할 수 있고, 이를 통하여 도 4의 공초점 현미경(400)의 제어부(470)로 실험 데이터에 대한 요구를 전송할 수 있다. 또한, 컴퓨터(560)는 또한 휘발성 및/또는 비휘발성 메모리를 포함할 수 있다. 컴퓨터(560)는 하드웨어, 소프트웨어, 펌웨어, 또는 이들의 임의의 조합으로 구현될 수 있다. 또한, 컴퓨터(560)는 레이저 소스(530)(도 5에 비도시)를 제어할 수 있다.
- [0124] 컴퓨터(560)의 비 휘발성 저장매체는 광학 부품의 3차원 형상을 저장할 수 있다. 컴퓨터(560)는 공초점 현미경(400)의 제어부(470)로부터 실험 로 데이터를 수신할 수 있다. 또는, 제어부(470)로부터 처리된 데이터를 수신할 수 있다. 컴퓨터(560)의 연산부는 광학 부품(510)의 미리 정해진 3차원 윤곽 및 제어부(470)로부터 수신된 데이터에 기초하여, 그 미리 정해진 3차원 윤곽으로부터의 광학 부품의 측정된 또는 기존의 3차원 윤곽의 하나 또는 다수의 편차를 결정한다. 광학 부품의 공급 업체가 미리 정해진 형상으로부터 기존의 3차원 윤곽의 편차를 제공하는 것도 또한 가능하다.
- [0125] 컴퓨터(560)는 이러한 데이터 및 5.3절에 설명된 알고리즘("이론적 배경")으로부터 미리 정해진 3차원 윤곽에 따라서 광학 부품(510)의 기존의 3차원 윤곽을 가져오기에 적절한 레이저 펄스의 적어도 하나의 배열을 계산한다.
- [0126] 도 6의 도해 600은 EUV 마스크(610)에 레이저 펄스의 하나 이상의 배열을 인가하는 것을 개략적으로 나타낸다. EUV 마스크(610)는 그 전면에 EUV 패턴(615)을 가지며, 그 후면에 광학적 투과 전도성 코팅(665)을 갖는다. 마스크(610)는 특정의 하우징(620) 내에 배치되어 있고, 마스크 패턴(615)이 브라켓(625) 상의 하면에 설치되어 있다. 하우징(620)은 보호 유리 윈도우(630)로 밀봉되어 있다. 특정 하우징(620)에서 마스크(610)의 환경을 제어가능하다. 특히, 하우징(620)을 대피가능하다(도 6에 비도시). 레이저 빔(650)은 EUV 마스크(610)의 기관(660)에 대물 렌즈(640)에 의해 집광된다. 교환 가능한 보상 유리판(670)은 마스크(610)의 기관(660)의 깊이에 레이저 빔(650)의 초점을 조절한다. 하우징(620)은 어떠한 이동 부품도 갖지 않는다.
- [0127] 5.2 응용 예
- [0128] 5.2a 포토리소그래픽 마스크
- [0129] 도 7의 부호 700은 마스크 블랭크(710)의 높이의 국소 변화를 개략적으로 나타낸다. 마스크 블랭크(710)는 초기 상태에서 평탄하다. 레이저 펄스(720)의 2D 배열을 적용하여 표면의 높이를 국소적으로 변경시킬 수 있다. 물리적 용어로 표현된, 높이 변형, 수직 변형 또는 z-방향의 변형은 z-방향의 팽창과 축소 및 벤딩의 조합이다. 국소 변형은 국부의 효과를 유발하는 반면, 벤딩은 전체적인 효과를 가져 온다. z-방향의 국소 변형(730)은 레이저 펄스(720)의 2D 또는 3D 배열을 적용함으로써, 및 포아송 비(5.3 섹션 "이론적 배경" 참조)로 표현된, 레이저 펄스의 2D 또는 3D 배열이 기입된 영역과 국소 변형을 갖는 국소 영역의 상호 간섭으로부터 생길 수 있다. 5.3 섹션에서 이론적 고려 사항들은 대부분의 경우에 z-방향의 벤딩 및 z-방향의(국소) 변형이 서로 상당히 다른 크기를 가지므로 분리될 수 있는 것을 또한 나타낸다.
- [0130] 도 7은, 광학 부품의 편평도 제어가 레이저 펄스의 배열에 의해 생긴 벤딩과 표면 형상의 모두를 제어하는 것을 요구하는 것을 분명하게 나타낸다. 따라서, 광학 부품의 미리 정해진 벤딩의 생성 또는 결정된 벤딩의 정정, 3차원 배열의 레이저 펄스의 계산에 이르게 하는 3차원 변형 모델의 기능을 보여주는 좋은 예이다.
- [0131] 광학 부품의 벤딩의 개념을 수정하기 위해 이하에 서술된 실험의 목표이다. 또한, 3차원 변형 모델을 확인하고, 3차원 배열의 레이저 펄스를 생성하기 위한 다중 모드 접근 방법의 이점을 설명하는 목적도 있다.
- [0132] 아래에 설명되는 실험에서 사용되는 일 예의 광학 부품은 6 인치(152 mm) 마스크 블랭크이다. 대부분의

결과를, 광학 부품, 즉, 근적외선, 가시광 및/또는 근자외선 파장 범위의 광을 광학적으로 투과시키는 광학 부품의 체적에 3차원 배열의 레이저 펄스를 적용할 수 있는 다른 형상을 갖는 많은 다른 광학 부품에 또한 적용 가능하다.

[0133] 레이저 펄스의 서로 다른 2D 배열의 적용은, 마스크 블랭크 전면과 후면에 평행한 면에서, 각각의 표면으로부터 상이한 깊이에서, 상이한 기입 모드를 사용하여, 즉, 레이저 펄스 및/또는 다른 펄스 밀도에 대한 상이한 파라미터를 갖는 레이저 펄스의 2D 배열을 사용하여 행해진다. 2D 배열의 크기는 마스크 블랭크의 전체 활성 영역을 포함한다. 배열에 기입하는 변형은 146 mm x 146 mm의 영역에서 측정되고, 이 측정 그리드는 대략 30 x 30 개의 노드들이다.

[0134] 이 섹션에서 설명된 응용 예에서 사용된 공초점 현미경(400)은, 10 mm의 작동 거리 및 400 nm의 빔 방향 또는 z-방향의 해상도를 갖는 Micro Epsilon IFS 3401-10 공초점 센서이다. 측정 센서의 노이즈는 대략 1000 nm이다. 모든 샘플링 포인트에서, 대략 100 nm의(z-방향)의 거리 샘플링 반복성을 달성하기 위해 100개의 거리 샘플링이 추가되었다. 도 4의 대물 렌즈(440)의 위치 설정 스테이지(Schneeberger)는 대략 200 nm의 z-방향의 반복성을 갖는다. z-방향의 편차에 위치 설정 스테이지가 기여하는 것을 감소시키기 위하여 5개의 순차 스캔이 행해진다. 따라서, 광학 부품의 기존의 3차원 윤곽의 판정 반복성은 약 200nm로 감소될 수 있다. 마스크 블랭크의 기입기는 항상 수학적으로 보장된다.

[0135] 다음 적용 예는 마스크 블랭크의 국소 확장을 가져오는 3차원 배열의 레이저 펄스의 적용의 결과를 보여준다. 그러나, 이것은 본 발명의 방법을 제한시키지 않는다. 이 섹션에 설명된 모든 결과는 마스크 블랭크의 국소 수축을 가져오는 3차원 배열의 레이저 펄스가 적용될 수 있다. 또한, 마스크 블랭크의 제 1 영역에 국소 수축을 가져오고 상기 마스크 블랭크의 제 2 영역에 팽창을 가져오는 3차원 배열의 레이저 펄스를 정의하는 것도 가능하다.

[0136] 제1 적용 예로서, 마스크 블랭크의 1차원(1D) 벤딩이 서술된다. 레이저 펄스의 2D 배열이 적용되어 마스크 블랭크의 면(x-y-면)에서 등방성 확장을 가져 오면, 마스크 블랭크의 면(x-y-면)의 모든 방향에서 동일한 곡률로 상기 설명된 마스크 블랭크에 벤딩을 가져오는 것이 명백하다. 따라서, 로컬 등방성 확장을 가져오는 레이저 펄스의 2D 배열은, 1D 벤딩, 즉, 예를 들어 x-방향의 정의된 벤딩과 y-방향의 마스크 블랭크의 벤딩 없음을 생성하는 것을 허가하지 않는다. 이것은 마스크 블랭크 면 내 등방성 확장을 가져오는 레이저 펄스의 2D 배열을 사용하는 접근 방법의 주요 또는 근본적인 한계이다.

[0137] 그러나, 펄스 밀도와 달리, 레이저 펄스의 형상은 마스크 블랭크 또는 일반적으로 광학 부품의 등방성 확장을 가져오는 효율적인 파라미터이다.

[0138] 이 가정은 현재 실험적으로 증명된다. 레이저 펄스의 2 차원 배열은 그 상면에 근접한 마스크 블랭크에 기입된다. 도 8에 나타난 바와 같이, 횡 평면에서 등방성 확장을 가져오는 레이저 펄스의 2D 배열이 마스크 블랭크에 기입된다. 빔 방향에 수직인 평면에서 등방성 확장은 예를 들어 원형을 갖는 레이저 펄스에 의해 생성될 수 있다. 도 8의 타원(820)은 마스크 블랭크의 결과의 확장을 나타낸다. 2개의 라인(860, 870)은 공간에서 방향에 대한 확장의 크기를 나타낸다. 2 축(860, 870)은 확장의 주축을 나타낸다. 타원(820)의 편심은 매우 낮으며, 이것은 횡 평면에서 마스크 블랭크의 확장이 거의 균일한 것을 나타낸다.

[0139] 타원(820)이 마스크 블랭크의 모든 가능한 확장을 가시화할 수 없으므로, 사각형은 기본 영역(810)에 레이저 펄스의 배열을 기입하기 전의 마스크 블랭크의 기본 영역(810)을 나타낸다. 기본 영역(810)은 섹션 5.3에 도입된 기본 체적 α 의 2D 투영이다. 이미 타원(820)으로 도시된 바와 같이, 등방성 확장은 마스크 블랭크의 레이저 펄스의 균질한 2D 배열을 기입함으로써, 상기 기본 영역(810)에 도입된다. 상기 기본 영역(810)의 변형은, 기본 영역(810)의 4개의 코너 점의 화살표(830)의 길이와 방향의 8 개의 파라미터에 의해 설명된다. 마스크 블랭크 면에 직교하는 축 주위의 기본 영역(810)의 회전과 마스크 블랭크 면의 변환이 변형을 변경시키지 않으므로, 8개의 파라미터중 5개는 독립적이다. 평행 육면체(840)는 본질적으로 원형의 빔 형상을 갖는 레이저 펄스를 갖는 레이저 펄스의 균질한 2차원 배열에 의해 기본 영역(810)에서 도입된 변형을 나타낸다. 사각형(850)은 이상적인 등방성 확장에 의해 기본 영역(810)의 정규화된 변형을 나타낸다. 도 8은 본질적으로 원형인 레이저 펄스의 등방성 2차원 배열은 기본 영역(810)의 등방성 확장을 본질적으로 가져오는 것을 보여준다.

[0140] 도 9는 레이저 펄스의 균질한 2D 배열이 마스크 블랭크에 기입된 경우의 상황을 도시하며, 레이저 펄스는 기본 영역(910)의 본질적인 1D 확장을 가져 온다. 도 9에 도시된 바와 같이 강한 이방성 확장이 예를 들어 실린더 렌즈에 의해 생성된 것 같이, 슬릿 형상의 빔 형상을 갖는 레이저 빔에 의해 생성될 수 있다. 또는, 기본 영역

(910)의 이방성 확장은, 픽셀들이 일 방향으로 겹치게 하며 이방성 픽셀을 생성하는, 마스크 블랭크에 중첩 펄스를 기입하여 생성 될 수 있다. 도 9에서, 마스크 블랭크의 이방성 확장은 타원(920)을 상징한다. 도 8의 타원(820)과 대조적으로, 타원(920)은 큰 편심을 갖고, 거의 라인으로 퇴화된다. 화살표(930)는 기본 영역(910)의 코너 점에 생긴 변형을 또한 상징한다. 도 9에 도시된 것 같이, 평행 육면체(940)에 의해, 레이저 펄스의 이방성 빔은, 기본 영역(910)의 매우 높은 이방성 또는 거의 1 차원 변형을 가져 온다. 또한, 사각형(950)은 상기 기본 영역(910)의 정규화된 변형을 나타낸다.

[0141] 도 10은 152 mm x 152 mm의 치수를 갖는 마스크 블랭크를 나타낸다. 마스크 블랭크의 중앙에 약 39mm의 폭을 갖는 스트라이프가 레이저 펄스의 2 차원 배열에 의해 덮여있다. 레이저 펄스의 2 차원 배열의 단일 층이 마스크 블랭크의 상면 가까이에 기입되어 얻어진 결과의 해석을 용이하게 한다. 도 10의 왼쪽 치수에 표시된 것 같이, 마스크 블랭크의 광투과율은 수직 스트라이프에서 본질적으로 4.5%만큼 변화(감소)된다. 광학 부품에 픽셀을 기입함으로써 광학 부품에 생긴 광 투과의 변화 또는 광 감쇠의 증가는, 광학 부품에 픽셀을 기입하는 양을 정량화하는 역사적 척도이다. 4.5 %의 감쇠는 레이저 펄스의 2 차원 배열에 의해 커버되는 스트라이프의 픽셀의 공격적인 기입을 의미한다.

[0142] 도 11은 도 8의 균일한 2차원 배열에 의해 생긴 높이의 변화를 나타내며, 레이저 펄스는 본질적으로 등방성 확장을 가져오는 파라미터를 갖는다. 도 12는 도 9의 레이저 펄스의 균일한 2차원 배열에 의해 생긴 빔 방향 또는 z-방향의 변화를 나타내며, 레이저 펄스는 강한 이방성 확장을 가져오는 파라미터를 갖는다. 양 도면의 경우, 높이 변화는 -3000 내지 +3000 nm의 크기이며, 152mm의 길이에 걸쳐 약 6 μm 의 마스크 블랭크의 전체 높이의 변화를 가져 온다. 동시에, 제시된 방법으로 마일당 범위에 부정확성을 가져오는 나노 미터 레벨에서의 표면 형상을 제어할 수 있다. 미리 정해진 형상으로부터 그 3차원 윤곽의 편차가 이미 이 광학 부품의 기능을 상당히 저하시키는 변형을 가져 오면서 나노 미터 범위의 정밀도는 EUV 마스크의 치료에 필수적이다.

[0143] 마지막으로, 도 11과 12의 비교함으로써, 상이한 방향에서 상이한 곡률을 갖는 벤딩을 생성하기 위해 기본 영역(810)에서 등방성 확장(820)을 사용할 수 없다는 가정을 확인한다. 도 11과 12의 예에서, 픽셀은 마스크 블랭크의 표면으로부터 멀리 떨어져 도입되고, 픽셀 기입으로부터의 표면 프로파일 또는 형상의 변화에 대한 기여는 낮다. 논의된 예에서, 표면 프로파일은 1nm 미만만큼 변경된다. 따라서, 벤딩에 대한 표면 변화의 비율이 이 예에서는 1% 미만이다. 따라서, 기본 영역의 등방성 또는 강한 등방성 확장이 광학 소자의 표면 형상의 최소한 효과를 갖는 광학 부품의 등방성 또는 거의 1 차원의 벤딩을 생성하기 위해 적합하다.

[0144] 다음의 응용 예에서, 정의된 방법은, 초기 광학 부품이 회전 대칭성을 가지고 있지 않은 경우라도 회전 대칭성을 갖는 미리 정해진 3차원 형상 또는 미리 정해진 굽힘 프로파일을 생성할 수 있음을 보여준다. 마스크 블랭크는 다시 초기 광학 부품으로 사용된다. 마스크 블랭크는 다시 152mm x 152mm의 치수를 가지고 있다. 도 13은 대상 프로파일의 단면을 나타낸다. x 방향의 단위는 μm 이고, y 방향의 단위는 nm이다. 마스크 블랭크의 중앙부는 거의 평탄하다. 마스크 블랭크의 중앙부의 에지로부터 외측 에지로의 총 벤딩은 약 500 nm 만큼 대칭적으로 상승한다.

[0145] 도 10에서, 벤딩이 마스크 블랭크에 대칭적으로 적용된다. 이 제한은 다음 예에서 제거된다. 이것은 회전 대칭 벤딩이 사각형 마스크 블랭크에 적용된 것을 의미한다. 이 대상은 도 13의 평평한 정상 3차원 윤곽이 x- 및 y-방향에서 상이한 벤딩 곡률의 벤딩 프로파일의 상이한 부분에 갖는 것으로서 선택된다. 이것은 도 13의 3차원 윤곽을 하나의 팽창 특성을 갖는 레이저 펄스의 배열로 얻을 수 없는 것을 의미한다.

[0146] 도 14는 도 13의 3차원 목표 형상을 나타내는 2차원 지도를 나타낸다. 마스크 블랭크의 우측의 눈금으로 나타낸 바와 같이, 전체 높이의 변화는 900 나노 미터에 달한다. 10 x 10 등거리 단계 그리드는 계산에 사용된다. 마스크 블랭크 평면의 프로파일은 29 x 29 위치에서 샘플링된다.

[0147] 레이저 펄스의 2개의 서로 다른 2 차원 배열에서 2개의 확장 기입 모드를 사용함으로써 선택된 3차원 목표 형상에 따른 마스크 블랭크의 후면의 중앙부 또는 하부 면을 구부리는 계획이다. 원하는 방향으로 마스크 블랭크를 변형시키기 위해, 마스크 블랭크의 기하학적 중심 아래에 레이저 펄스의 3차원 배열을 기입 또는 적용하는 것이 필요하다. 논의된 예에서, 레이저 펄스의 3차원 배열은 마스크 블랭크의 하부 면 위에 250 μm 에 기입된다. 하부 면으로부터의 거리는 하부 면의 손상을 방지하기 위해 충분히 크다.

[0148] 2 개의 선택된 기입 모드에 대한 레이저 펄스의 2D 배열은 주지의 2D 모드 시그니처에 관한 정보를 이용하여 계산된다. 중첩하지 않는 레이저 펄스의 2D 배열을 사용하는 경우에, 빔 방향 또는 z-방향의 확장에 레이저 펄스의 2 차원 배열의 기여가 레이저 펄스의 2 차원 배열의 층 당 또는 기입 층 당 약 0.01 nm이기 때문에 이것은

합리적인 가정이다. 이 기여는 무시할 수 있다.

- [0149] 도 15는 x-방향의 마스크 블랭크의 확장을 위해 사용되는 레이저 펄스의 계산된 기입 맵 또는 2 차원 배열을 나타내고, 도 16은 y-방향의 마스크 블랭크의 확장을 위한 대응하는 기입 맵을 나타낸다.
- [0150] 도 15는 x-방향의 확장을 위해 책임이 있는 레이저 펄스의 2 차원 배열 또는 2D 기입 맵이, 결과의 3차원 윤곽이 x-방향에서 최대 벤딩 곡률을 가져야 하는 마스크 블랭크의 영역에서 높은 밀도를 갖는 것을 나타낸다. 이러한 대칭은, y-방향의 확장을 위한 2D 기입 맵을 제시하는 도 16에 또한 반영된다. 또한, 마스크 블랭크 및 2개의 2D 기입 맵의 모드 시그니처가 이 대칭성을 가지고 있기 때문에, 레이저 펄스의 2 차원 배열 또는 2D 기입 맵은 180도 회전 대칭을 나타낸다. 또한, 이러한 대칭 관계로 인해서, 도 15 및 도 16의 2D 기입 모드는 90° 회전 대칭의 종류를 나타낸다. 도 15 및 도 16의 기입 모드 시그니처 사이의 90° 대칭의 부재로 인해서 이 대칭은 완벽하지 않다. 레이저 펄스의 3차원 배열을 형성하는 도 15 및 도 16의 2개의 2D 기입 모드는 약 15 μm 만큼 수직 방향으로 분리된다.
- [0151] 이 마스크 블랭크의 하부면의 3차원 형상에 생긴 결과의 변화가 도 17에 도시되어 있다. 도 15 및 도 16의 2개의 기입 모드의 기입 층을 포함하는 레이저 펄스의 3차원 배열을 기입한 후 마스크 블랭크의 3차원 형상의 변화 범위는, 도 17의 우측에 스케일로 표시된 것과 같이, -800 nm로부터 +1500 nm 또는 2.3 μm까지 연장된다. 이것은 도 13에 나타난 3차원 목표 형상에 대하여 약 2.5의 팩터만큼 상이하다. 이것은 2D로부터 3D표현으로의 모드 시그니처(MS)의 변환에 대한 정상화의 실수에서 생긴다.
- [0152] 측정 데이터는 약 200 nm의 소음 크기를 포함한다. 도 15 및 도 16에 표시된 기입 맵을 포함하는 레이저 펄스의 3차원 배열의 적용 전에 최초의 마스크 블랭크가 측정된다. 3차원 형상의 결과의 변화는 본질적으로 300 nm의 크기의 잡음 성분을 포함한다. 도 13의 3차원 목표 형상과 실험 결과를 비교하면, 300 nm보다 작은 크기를 갖는 데이터의 변화를 제거하는 평활화 박판 스플라인(TPS: smoothing thin plate spline) 피트가 적용된다.
- [0153] 도 18은, 레이저 펄스의 3차원 배열에 의해 생긴 마스크 블랭크의 측정된 벤딩의 TPS 피트를 나타낸다. 도 13의 3차원 목표 형상과 측정된 결과를 비교하면, 수정된 마스크 블랭크에 걸친 2개의 단면 플롯이 라인(1810, 1820)에 의해 표시된 위치에서 제조된다.
- [0154] 도 19는 도 18의 위치에서 2 개의 단면 플롯(1810, 1820)을 가진 3차원 목표 형상(1910) 사이의 비교를 나타낸다. 3차원 목표 형상(1910)은 y-방향에 표시되는 스케일을 사용한다. 2 개의 단면 플롯(1810, 1820)은 y-축의 스케일과 다른 스케일을 갖는 도 19의 우측에 표시된 스케일을 사용한다. 이것은 전술한 정규화 문제에 기인한다.
- [0155] 이 문제 외에, 3차원 목표 형상(1910)과 2개의 측정된 3차원 윤곽(1810, 1820)이 잘 일치한다. 대상 프로필(1910)은 회전 대칭의 중심에 있는 작은 고도를 포함한다. 마스크 몸체의 일 측에 배치되는 확장 기입 모드만이 사용되므로, 픽셀 기입으로부터 생긴 벤딩은 이 고도를 가질 수 없다. 제시된 예로부터, 광학 부품의 체적에서 레이저 펄스의 하나 이상의 3차원 배열을 기입함으로써, 약 1 nm 내지 50 μm의 범위의 높이 변화를 가져오는 곡률이 광학 부품에 도입될 수 있는 것으로 추정된다. 제 1 실시 예로서, 표면 형상의 변화는 다시 1nm 미만이다.
- [0156] 도 20에 개략적으로 도시된 바와 같이, 광학 부품을 벤딩하는 과정은, 초기 평평한 광학 부품(2000)으로부터 매우 큰 초점 길이를 갖는 렌즈(2010)를 제조하는 것을 가능하게 한다. 도 14 내지 18의 문맥에서 논의된 것과 유사하게, 3차원 배열의 레이저 펄스(2020)이 광학 부품(2000)의 후면(2070)에 가깝게 기입되어 회전 대칭으로 굴곡하고, 따라서 평평한 구성 부품(2000)을 큰 초점 길이를 갖는 렌즈(2010)로 변환시킨다. 렌즈(2010)의 전면(2060)에 입사한 평행 광(2040)은 약간 발산 광(2050)으로서 렌즈(2010)의 후면(2070)에 남는다. 역으로, 후면(2070)에 입사한 평행 광은 약간 수렴하여 전면에 남는다(도 20에 도시되지 않음).
- [0157] 다음의 응용 예는 미리 정해진 임의의 형상을 갖는 광학 부품의 생성을 나타낸다. 이것은 다음의 실시 예의 목적이 이 광학 부품에 레이저 펄스의 하나 이상의 3차원 배열을 기입함으로써, 임의의 벤딩 형상을 갖는 3차원 목표 형상을 제조하는 기능을 나타내는 것을 의미한다. 목표는 다른 방향으로 2 개의 서로 다른 사인의 곡률을 갖는 형상으로 선택된다. 이러한 특정 3차원 윤곽은 주로 레이저 펄스의 2 차원 배열의 평면에 확장을 가져오는 레이저 펄스의 단일 평면 2 차원 배열을 사용하여 수행될 수 없다.
- [0158] 상이한 기호의 곡률을 갖는 단일 3차원 윤곽은 2차 다항식으로부터 계산될 수 있다. 다음의 다항식이 선택된다.

$$F(x, y) = a \cdot x^2 + b \cdot x \cdot y + c \cdot y^2 \quad (61)$$

여기서, 상수는 다음의 수치로 주어진다:

$$a = -1.6 \cdot 10^{-10}, \quad b = +1.6 \cdot 10^{-10}, \quad c = +4.0 \cdot 10^{-11} \quad (62)$$

도 21에 도시된 바와 같이, 식 61은 x- 및 y-방향에서 상이한 크기의 곡률을 갖는 새들 형상을 갖는 3차원 윤곽을 기술한다. 3차원 형상의 복잡성을 증가시키기 위하여, 이 용어 $x \cdot y$ 가 새들을 수직축 주위로 약간 회전시키는 식 61에 추가된다.

광학 부품 또는 웨이퍼의 기본 체적 또는 기본 영역의 이방성 확장의 중요한 점을 다시 강조하기 위해 다음 두 문단은 일부 기술적인 용어를 상세하게 정의한다. 픽셀 중첩의 경우에만 또는 임의의 종류의 픽셀 더빙 또는 픽셀리스 기입에 의해, 기본 영역의 이방성 확장을 얻을 수 있다. 더빙 쌍의 경우, 또는 2개 이상의 중첩 픽셀의 그룹에서, 하나 이상의 레이저 펄스가 이미 존재하는 픽셀의 측으로 인가되어 이방성 픽셀을 생성한다. 중첩 픽셀의 전체 복합 그룹이 그 자체로 다시 전체 기입 처리의 요소로 칭해질 수 있다. 중첩 또는 부분 중첩 픽셀의 그룹이 본원에서 기입 모드로 표시된다. 그 다음, 기입 모드(중첩 또는 이방성 픽셀)의 2 차원 배열이 광학 부품 또는 웨이퍼에 대한 원하는 확장 프로필을 생성하기 위해 선택된다.

그러나, 단일 레이저 펄스에 의해 생성되고 특정 기본 확장을 가지는 픽셀이 필요한 변형을 만드는 틀로서 사용므로, 계산 및 주어진 예들은 보다 구체적인 변형에 여전히 기초한다. 이것은 단일 레이저 펄스에 의해 생성된 개별 픽셀들이 그 자신에 의해 기본 체적의 비대칭 또는 이방성 확장을 가져오는 새로운 특징임을 의미한다. 단일 픽셀의 양적 표현은 기입 모드 시그니처이며, 모드 시그니처를 MS로 축약하여, 단일 유형의 픽셀을 사용하는 경우 생기는 확장량을 기술한다(섹션 5.3 참조). 하나의 기입 모드는 1mm x 1 mm의 영역을 균일하게 처리한다.

도 22 및 24는 본질적으로 x-방향의 확장을 가져오는 기입 모드에 대한 레이저 펄스의 계산된 기입 맵 또는 2D 배열을 나타낸다. 유사하게, 도 23 및 25는 주로 y-방향의 확장을 가져오는 기입 모드에 대한 계산된 2D 기입 맵을 나타낸다. 도 22 및 23의 레이저 펄스의 2D 배열은 마스크 블랭크의 후면 또는 하부 면에 가깝게 기입된다. 한편, 도 24 및 25의 2D 기입 모드는 마스크 블랭크의 전면 또는 상부 면에 가깝게 도입된다. 이 예에서, 용어 "가깝게"는 각각의 표면으로부터 100 μm 내지 800 μm 의 범위를 나타낸다. 마스크 블랭크의 각각의 표면에 가까운 2개의 2D 기입 모드는 15 μm 내지 50 μm 의 범위에 의해 빔 방향으로 분리된다. 도 22 내지 25의 4개의 기입 맵은 3차원 목표 형상을 생성하는데 사용되는 레이저 펄스의 3차원 배열을 형성한다.

한편 도 21로부터 취해질 수 있는 것 같이, 다른 한편 도 22 내지 25로부터, 식 61에 대해서 2D 기입 맵과 3차원 윤곽의 상세한 내용 또는 목표 벤딩 프로필을 관련짓는 것은 쉽지 않다. 이것은 3차원 윤곽, 마스크 블랭크의 형상(또는 최초 상태의 광학 부품) 및 3차원 배열의 레이저 펄스를 형성하는 2D 기입 모드 사이의 공변동(covariation)을 없애는 식 61의 3차원 윤곽에 의해 생긴 미소한 회전의 결과이다. 특정 3차원 윤곽, 즉, 수평 및 수직 방향으로 서로 다른 곡률을 가지는 새들(saddle)을, 상이한 기입 모드를 결합한 레이저 펄스의 3차원 배열에 의해 얻을 수 있으며, 각각의 경우에 2개의 상이한 기입 모드가 마스크 블랭크의 각 표면에 가깝게 적용된다.

한편, 마스크 블랭크의 180° 회전 대칭 및 식 61의 새들(도 21)이, 도 22 내지 25에 표시된 레이저 펄스의 2D 배열의 180° 회전 대칭에 여전히 반영된다.

도 22 내지 25로부터, 마스크 블랭크가 분리되는 9 x 9 셀 또는 사각형의 대부분은 레이저 펄스의 2D 배열을 차지하므로 기입 밀도는 마스크 블랭크 영역의 많은 부분에 걸쳐서 수정되는 것을 알 수 있다. 이것은, 마스크 블랭크의 특정 위치 또는 장소마다, 결과의 벤딩은 상이한 가중이 추가된 모든 가능한 기본 변형들의 조합인 것을 의미한다. 기입 모드의 확장 방향의 임의의 배향을 유연하게 용이하게 선택할 수 있으면(도 9 참조), 새들 메인 축을 따른 또는 수직의 확장을 갖는 3차원 배열의 레이저 펄스에 기입 모드를 적용하는 것이 최적화된다. 이로 인해 기입 모드의 양이 현저하게 감소된다. 따라서, 이상적인 경우에, 확장 방향으로의 배향은 지역 단위로 제어될 수 있는 기입 모드를 갖는 것이 가능하다. 이것을 달성하기 어려우면, 레이저 펄스의 3차원 배열을 미리 정의된 기입 모드를 추가함으로써 도 21의 미리 결정된 3차원 윤곽에 가까운 3차원 윤곽이 생성된다.

도 26은 도 22 내지 25의 기입 모드의 배열을 포함하는 레이저 펄스의 3차원 배열에 의해 마스크 블랭크에 도

입된 측정된 3차원 형상을 나타낸다. 식 61의 기능에 대한 유도된 3차원 목표 형상을 확인하기 위해, 이 함수의 계수들이 측정 데이터로부터 도출된다. 계수에 대해서 계산된 수치는 다음과 같다:

$$[0170] \quad a = -1.69 \cdot 10^{-10}, \quad b = +1.61 \cdot 10^{-10}, \quad c = +3.8 \cdot 10^{-11} \quad (63)$$

[0171] 식 62 및 63의 일치는 생성된 3차원 윤곽의 정확한 측정을 위해 위에서 논의된 실험의 어려움을 고려하여 예상된 것보다 더 낮다. 일반적으로, 기입 밀도가 3% 내지 5% 범위에서 광투과율을 변경시킨다. 실험에서, 집속 대물 렌즈(540)는 그 보상 깊이로부터 멀리 사용된다. 이것은 3차원 배열의 레이저 펄스 내에 포함된 기입 모드의 기입 깊이의 결정에 에러를 발생시킬 수 있다. 또한, 여기에 설명된 응용 예는, z 방향으로의 마스크 블랭크의 배치의 반복성에 의존한다. z-방향에서 마스크 블랭크 배치의 변화는 약 50 μm 로 추정된다. 또한, 이 마스크 블랭크의 두께의 편차가 약 50 μm 인 것으로 가정한다. 이러한 요인은 레이저 펄스의 3차원 배열을 형성하는 데 사용되는 기입 모드의 각각에 대해 10% 내지 15%의 기입 재현성 오차를 추가할 수 있다. 따라서, 마스크 블랭크의 생성된 3차원 형상 또는 유도된 벤딩은 상이한 모드의 픽셀들의 모든 2 차원 배열에 의해 유도된 변형들의 조합의 결과이며, 대략 20% 내지 30%의 가능한 벤딩 에러를 가져 온다.

[0172] 다음의 예에서, 본 발명의 방법은 광학 부품에 레이저 펄스의 3차원 배열을 적용함으로써 광학 부품의 표면의 편평도를 개선할 수 있는 능력을 입증하기 위해 적용된다. 현저한 벤딩을 갖는 저하 석영판 또는 마스크 블랭크는 잡음비에 대해 합리적인 신호를 갖기 위해, 이 응용 예에서 사용된다. 예를 들면, 마스크 블랭크의 편평도에 대한 ASAHI의 사양은, 개선된 마스크 블랭크에 대해서 편평도 편차 $\leq 2 \mu\text{m}$ 이고 $\leq 0.5 \mu\text{m}$ 인 것을 정의한다.

[0173] 도 27은 마스크 블랭크의 측정된 3차원 윤곽 또는 3차원 프로필을 나타낸다. 측정된 마스크 블랭크는 ASAHI의 사양을 충족하지 않도록 높이의 총 변화는 8 μm 의 범위(-4000 nm 내지 +4000 nm)를 커버한다. 측정된 3차원 윤곽 또는 표면 곡률은 마스크 블랭크에서의 기호를 변경하지 않는다. 따라서, 마스크 블랭크의 표면은 전면 또는 상부 면에 가깝게 레이저 펄스의 3차원 배열을 적용함으로써 보정될 수 있다. 이것은 2가지 이유로 약 300 nm로 편평도 편차를 저감하도록 구성된다: (a) 약 300 nm의 편평도 편차는 개선된 마스크 블랭크의 ASAHI 사양을 만족하고, (b) 상기 논의된 것 같이, 마스크 블랭크의 3차원 윤곽을 결정하기 위해 사용된 계측 툴의 잡음은 300 nm의 범위에 있다.

[0174] 도 18과 유사하게, 평활 박판 스플라인(TPS: smoothing thin plate spline) 피트는 도 27의 3차원 윤곽에 적용되어 300 nm 미만의 크기를 갖는 3차원 윤곽의 변화를 제거한다. 도 28은 측정된 3차원 윤곽의 TPS 피트를 실행한 후의 도 27의 마스크 블랭크를 나타낸다.

[0175] 도 29 및 30은 3차원 배열의 레이저 펄스에 포함되고 도 28의 3차원 윤곽을 평탄화하기 위해 사용되는 2개의 기입 모드를 도시한다. 3차원 배열의 계산을 위해 9 x 9 x 3 격자는 마스크 블랭크에서 걸쳐서 사용된다. 2개의 기입 모드는 0% 내지 5%의 범위에서 광투과율의 변형을 유도할 수 있다. 레이저 펄스의 양 2 차원 배열은 주로 레이저 빔에 수직인 평면에서의 마스크 블랭크를 확장시킨다. 시뮬레이션은 평활 TPS 피트의 3차원 형상의 94%까지 평탄화하는 것이 가능하다는 것을 보여준다.

[0176] 도 31은 2개의 기입 모드를 포함하는 3차원 배열을 적용한 뒤의 도 27 및 28의 3차원 윤곽을 나타낸다. 편평도 변화는 도 27의 1000 nm의 표준 편차(1σ)를 갖는 6500 nm의 범위로부터 약 250 nm의 표준 편차를 갖는 약 1300 nm의 편평도 편차까지 감소한다. 이것은 도 27의 3차원 형상이 4의 인자에 의해 평탄화 될 수 있음을 의미한다.

[0177] 도 32는 도 31의 측정된 3차원 형상을 나타내며, 높이 스케일이 8 μm (-4000 nm 내지 +4000 nm)로부터 1 μm (-500 nm 내지 +500 nm)로 감소된다. 도 32는 y-방향의 마스크 블랭크의 확장을 책임지는 기입 모드를 일부 볼 수 있으며 개선의 여지가 있는 것을 나타낸다. 한편, x-방향의 마스크 블랭크의 확장이 이 방향의 타겟 확장에 가깝다.

[0178] 또한, 도 32에서 명확하게 알 수 있는 바와 같이, 측정된 3차원 형상은 도 27의 측정 잡음의 큰 기여를 포함한다. 마스크 블랭크의 최초의 3차원 형상은 평활한 곡률을 갖는 것으로 다시 가정한다. 또한, 전면으로부터 (또는 마스크 블랭크의 후면으로부터 350 nm) 6 mm (또는 10^6 nm)까지 멀리 3차원 배열의 레이저 펄스를 적용함으로써 높은 주파수를 갖는 전면 변조를 유도할 수 없다. 이러한 가정에 기초하여, 평활화 TPS 피트가 도 32의 계측 툴의 측정 잡음을 제거하기 위해 도 32의 측정된 3차원 윤곽에 적용된다.

[0179] 도 33은 평활화 TPS 피트 후의 도 32의 잔여 3차원 윤곽을 제공한다. 이 3차원 윤곽은 180 nm의 표준 편차를

갖는 약 700 nm의 높이 변화를 나타낸다. 레이저 펄스의 3차원 배열의 적용의 결과를 비교하는 정확한 방법은 레이저 펄스의 3차원 배열의 적용의 종결 후 초기 3차원 윤곽의 TPS 데이터와 나머지 3차원 윤곽의 TPS 데이터를 비교하는 것이다. 이 접근 방식은 계측 톨(400)의 노이즈를 제거하고 초기 및 잔여 3차원 윤곽의 특성을 추출하는 것을 어느 정도 허용한다.

[0180] 3D 형상의 표준 편차는 1000 nm 내지 180 nm로부터 감소되어 82 %의 개선을 가져 온다. 이것은 초기에 거부된 마스크 블랭크(일반 마스크 블랭크에 대한 ASAHI 사양을 만족하지 않으므로)가 개선된 마스크 블랭크에 대한 ASAHI 사양의 범위에 있게 되는 것을 의미한다.

[0181] 3D 형상의 측정 데이터가 저잡음 기여(예를 들면 그 표준 편차로 표현)를 가지므로 유용하면, 이 서술된 방법은 3차원 윤곽을 1차 이상의 크기만큼 개선시킬 수 있으므로, 미리 정해진 3차원 윤곽에 긴밀하게 따르는 기존 3차원 윤곽을 가져 온다.

[0182] 5.2b 웨이퍼

[0183] 제2 응용 예에서, 레이저 펄스의 하나 이상의 3차원(3D) 배열을 웨이퍼에 기입하기 위해 정의된 방법이 적용된다. 이 섹션의 제1 부분에서, 레이저 펄스의 파라미터는 실리콘 웨이퍼에 픽셀을 작성하는데 사용될 수 있는 것으로 추정된다. 다음의 예에서 실리콘은 인기있는 반도체 재료로서 사용된다. 그러나, 본 출원에서 정의된 방법의 사용은 실리콘(Si) 웨이퍼에 한정되지 않는다. 오히려, 본 방법은 또한 예를 들어 게르마늄(Ge)과 같은 상이한 반도체 재료를 포함하는 웨이퍼들에 또한 사용될 수 있다. 또한, 두 개 이상의 반도체 소자를 갖는 화합물 반도체를 포함하는 웨이퍼에 적용될 수 있다. 이진 화합물 반도체의 예는 단지 몇 가지 명명하면, 갈륨 비소(GaAs), 인화 인듐(InP), 및 질화 갈륨(GaN)이다.

[0184] 다음 설명에서, 용어 "웨이퍼"는 반도체 제조 공정에 입력되는 것, 즉, 일반적으로 반도체 디스크, 및 반도체 제조 공정에서 출력되는 것, 즉, 웨이퍼에서 분리되기 직전의 제조된 구성 부품을 포함하는 의미로 사용된다. 또한, 용어 "웨이퍼"는 반도체 제조 공정에서 웨이퍼의 모든 중간 단계들을 포함한다.

[0185] 도 34는 즉, 파장에 대한 4개의 차수 또는 크기를 커버하는 세미-대수 표현에서, 0.1 μm 내지 100 μm 의 범위의 파장에 대한 실리콘의 투과 스펙트럼의 개요를 나타낸다. 이 스펙트럼은 인터넷: <http://micro.com/technical-notes/bk7-quartz-ge-si>에서 얻어 왔다. 순수 Si의 간접 천이의 밴드 갭 에너지는 300 K에서 약 1.14 eV이며, 이것은 1.09 μm 의 파장에 해당한다. 이 밴드 갭 에너지는 1 μm 주위의 파장 영역에서의 투과율의 형상 증가에 의해 표시된다. 밴드 갭 에너지보다 큰 에너지를 갖는 전자기 방사에 대해서, 실리콘의 흡수 계수는 0.1 μm 내지 1.0 μm 의 파장 범위에서 높다. 실리콘은 자외선 및 가시 광선 방사 사용 검출기 재료로서 사용된다.

[0186] 실리콘은 약 1.1 μm 내지 6.0 μm 및 또한 약 40 μm 내지 100 μm 의 파장 범위의 전자기 방사를 투과한다. 도 34에서 화살표는 순수 실리콘에 픽셀을 기입하는데 사용할 수 있는 1.2 μm 내지 7.0 μm 의 흥미로운 파장 범위를 나타낸다.

[0187] 도 35는 높은 스펙트럼 해상도를 갖는 1 μm 내지 9 μm 의 파장 범위를 나타낸다. 이 곡선은 인터넷: <http://micro.com/technical-notes/bk7-quartz-ge-si>에서 얻어 왔다. 도 35는 온도의 함수로서 투과의 변화를 추가적으로 나타낸다. 이것은 실리콘을 가열할 때 광 투과이 상당히 감소되는 것을 명백하게 보여준다. 이 효과는 더 큰 파장에 대해서 더욱 명백해진다. 약 5 μm 의 파장을 사용하는 것이 유익할 수 있다.

[0188] 도 36은 세미-대수 표현에서 200 nm 내지 1400의 범위의 파장의 함수로서 실리콘의 흡수 계수를 나타낸다. 이 도면은 실리콘이 200 nm 내지 약 1000 nm의 파장 범위의 전자기 방사에 대한 검출기 재료로서 사용될 수 있는 것을 또한 나타낸다. 1000 nm (대략, 300 K에서 순수 Si의 밴드 에지) 내지 1400 μm 의 파장 범위에서, 흡수는 8차의 크기보다 더 많이 떨어진다. 도 36으로부터 알 수 있듯이, 흡수 계수는 1,000 nm에서 대략 $a = 100\text{cm}^{-1}$ 이고, 1100 nm에서 대략 $a = 2\text{cm}^{-1}$ 이고, 1200 nm에서 대략 $a = 0.02\text{cm}^{-1}$ 이다.

[0189] 도 35는 Si가 전자기 방사 또는 실리콘에 픽셀을 도입하는 데 사용되는 레이저 펄스를 투과하는 것이 필요하다는 요건에 대하여 Si 웨이퍼로의 픽셀의 기입에 대해서 5 μm 의 범위의 파장이 바람직하다는 것을 제안한다. 그러나, 도 36에 나타난 Si의 흡수 계수를 검토하면, 레이저 펄스의 파장을 1300 μm 아래로 유지하는게 필요할 것으로 보인다.

표 6

293 K에서 실리콘 재료 파라미터

파라미터	수치	단위	소스
융점	1683	K	a
밀도(결정)	2.336	g/cm ³	a
밀도(비정질)	2.29	g/cm ³	b
비열 용량	703	J/(kg · K)	a
흡수 계수	0.01(3 μm에서)	cm ⁻¹	c
열 전도성	150	W/(m · K)	a

[0191] a: <http://de.wikipedia.org/wiki/Silizium>

[0192] b: P. D'Antonio and J.H. Konnert, Appl. Phys. Lett., Vol. 64, issue 4, p. 437-439, Jan. 1994, ISSN: 0003-6951, Digital Object Identifier: 10.1063/11.111121

[0193] c: M.A. Green, Solar cell research and development in Australia, Solar Cells, Vol. 26, pp. 1-166 (1989)

[0194] Si를 국부적으로 녹이기 위해, 실리콘 웨이퍼 내에 온도 > 1683 K 또는 1410 °C를 국부적으로 생성하는 것이 필요하다. Si 결정이 국부적으로 용융되면, 용융된 체적은 결정질 Si 보다 1.8 % 낮은 밀도를 갖는 비정질 Si로서 고형화되기 쉽다(표 6 참조). 따라서, 로컬 비정질 체적이나 픽셀은 주위의 결정질 Si 보다 1.8 % 높은 체적을 필요로 하므로, Si 결정에 응력을 유발시킨다.

[0195] 융점을 초과하는 로컬 체적의 생성은 매우 짧거나 초단 레이저 펄스를 필요로 한다. 하나 이상의 초단 레이저 펄스 만을 인가함으로써, 생성된 열이 레이저 펄스의 초점 스폿을 둘러싸는 체적으로 대량 방출되지 않도록 충분히 빠르게 되는 생성될 수 있는 소형의 Si 체적의 열이 생성된다. 작가 P.L. Liu, R. Ren 및 N. Bloembergen는, 기사 "피코초 레이저 도입된 Si의 용융 및 형태" Appl. Phys. Lett., vol. 34, pp. 864-866, 1979에서, 10¹⁴ K/s까지의 가열 및 냉각 속도가 피코초 펄스에 대해서 얻어질 수 있다고 보고하였다. 이것은, 1 ps에 Si 결정이 100 K까지 가열 및 냉각될 수 있는 것을 의미한다. 따라서, 1 ps 미만의 펄스 지속 시간을 갖는 적어도 레이저 펄스를 생성할 수 있는 레이저 시스템이 요구된다.

[0196] 다음 설명에서, 레이저 파라미터는 Si 결정 또는 Si 웨이퍼 내의 작은 체적의 국부 용융을 유도하는 것으로 추정된다. 작은 체적은 가우스 빔을 갖는 레이저 펄스에 집중해서 국부적으로 가열되는 것으로 한다. 도 37은 이 상황을 도시한다. 반경 w_0 와 길이 b를 갖는 실린더가 Si의 융점 이상의 온도까지 가열되는 것으로 하며, 여기서 w_0 는 빔 허리(beam waist)이고 b는 초점 심도이다. 가우스 빔에 대한 빔 허리는 다음에 의해 결정된다:

[0197]
$$w_0 = \frac{\lambda}{\pi \cdot \alpha} = \frac{\lambda_0}{\pi \cdot n \cdot \sin \alpha} = \frac{\lambda_0}{\pi \cdot NA} \quad (64)$$

[0198] 여기서, Si 결정 내의 파장 λ 은 진공 파장 또는 공기 중의 파장 λ_0 , 실리콘의 굴절률 n에 의해 대체된다. NA는 도 37의 실린더에 레이저 펄스를 집광시키기 위해 사용되는 광학 시스템의 개구 수를 나타낸다. 또한, 작은 각도 $\sin \alpha \approx \alpha$ 에 대해서 근사가 사용된다. 각도 α 는 전체 각 확산 Θ 또는 가우스 빔의 절반이다.

[0199] 도 37로부터 알 수 있듯이, 초점 깊이는 롤리(Raleigh)의 범위 z_R 의 2배이며, 여기서 롤리의 범위 또는 길이는 다음과 같이 주어진다:

[0200]
$$z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda} \quad (65)$$

[0201] 따라서, 실린더의 길이 b 는 다음과 같다:

$$b = 2 \cdot z_R = 2 \cdot \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot n \cdot w_0^2}{\lambda_0} = 2 \cdot n \cdot \frac{\lambda_0}{\pi \cdot (NA)^2} \quad (66)$$

[0203] 여기서, 식 (64)가 최종 변환을 위해 사용된다.

[0204] 길이 b 와 반경 w_0 을 갖는 실린더는 다음의 체적을 갖는다:

$$V = \pi \cdot w_0^2 \cdot b = \pi \cdot \frac{\lambda_0^2}{\pi^2 \cdot (NA)^2} \cdot 2 \cdot n \cdot \frac{\lambda_0}{\pi \cdot (NA)^2} = 2 \cdot n \cdot \frac{\lambda_0^3}{\pi^2 \cdot (NA)^4} \quad (67)$$

[0206] 비열 용량은 다음과 같이 주어진다:

$$c = \frac{W}{m \cdot \Delta T} \quad (68)$$

[0208] 여기서, 가열 공정이 실온에서 시작할 때, $\Delta T = 1683K - 293K = 1390K$ 이다. Si 결정 $\left(\rho = \frac{m}{V} \right)$ 의 작은 체적 V 를 국부적으로 용융시키기 위해 필요한 에너지는 식 (67) 및 (68)로부터 추정될 수 있다:

$$W = c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T = 2 \cdot n \cdot c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T \cdot \frac{\lambda_0^3}{\pi^2 \cdot (NA)^4} \quad (69)$$

[0210] 가우스 초점, 즉, 실린더의 길이 b 내에 흡수된 에너지는 대략 Lambert-Beer 법칙이다. 도 38은 가우스 초점 내의 강도 손실 $I(z)$ 을 개략적으로 도시한다:

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad (70)$$

[0212] 여기서, α 는 도 36에 표시되는 Si 결정의 흡수 계수를 나타낸다. 강도 손실은 초점 내의 가우스 빔의 에너지 손실과 동일하다:

$$W(b) = W_0 \cdot e^{-\alpha b} \quad (71)$$

[0214] 여기서, W_0 는 가우스 초점에 도달하는 에너지이며, $W(b)$ 는 초점 또는 길이 b 의 실린더를 남기는 에너지이다. 곱 $\alpha \cdot b < 1$, 즉, 레이저 펄스의 에너지의 일부만이 가우스 빔 포커스의 실린더에 흡수된다고 가정하므로,

$$\Delta W = W_0 - W(b) = W_0(1 - e^{-\alpha b}) \approx W_0(1 - (1 - \alpha \cdot b)) = W_0 \cdot \alpha \cdot b \quad (72)$$

[0216] 도 39는 펄스 길이 또는 펄스 폭 Δt_{Pulse} 의 펄스를 갖는 레이저 시스템의 펄스 열을 나타낸다. 2개의 레이저 펄스 사이의 시간 기간 ΔT 은 화살표로 나타낸 바와 같이 2개의 펄스 사이에서 균일하다. 따라서, 링크된 주기적 펄스 열은 $\Delta T = 1/f$ 과 같은 주파수를 갖는다.

[0217] 도 39의 펄스 열의 레이저 시스템에 의해 방사된 평균 파워는 다음과 같이 주어진다:

$$\bar{P} = \frac{1}{\Delta T} \cdot \int_0^{\Delta T} P(t) \cdot dt \approx \frac{1}{\Delta T} \cdot P_{Pulse} \cdot \Delta t_{Pulse} = f \cdot P_{Pulse} \cdot \Delta t_{Pulse} \quad (73)$$

[0219] 여기서, P_{Pulse} 는 펄스 파워이다. 그래서, 펄스 파워는 레이저 시스템의 평균 파워, 그 주파수 및 개별 펄스의 펄스 폭의 함수로 표현될 수 있다:

$$P_{Pulse} = \frac{\bar{P}}{f \cdot \Delta t_{Pulse}} \quad (74)$$

입사 레이저 펄스의 펄스 에너지 W_0 는 펄스 파워와 펄스 폭으로 표현될 수 있다:

$$W_0 = P_{Pulse} \cdot \Delta t_{Pulse} \quad (75)$$

가우스 초점에서 식 (72)에 주어진 것 같이 레이저 빔의 에너지 손실이 포커스 내에서 Si 결정에 의해 흡수되는 것으로 가정한다:

$$\begin{aligned} W_{absorbed} &= \Delta W = W_0 \cdot a \cdot b = P_{Pulse} \cdot \Delta t_{Pulse} \cdot a \cdot b = \frac{\bar{P}}{f} \cdot a \cdot b = \\ &= \frac{\bar{P}}{f} \cdot a \cdot 2 \cdot n \frac{\lambda_0}{\pi \cdot (NA)^2} = \frac{2 \cdot n \cdot a \cdot \bar{P} \cdot \lambda_0}{\pi \cdot f \cdot (NA)^2}, \end{aligned} \quad (76)$$

여기에서, 식 (75)가 사용되었다.

식 (69)는 가우스 초점 내의 온도를 적어도 온도 차이 ΔT 만큼 증가시키기 위해 필요한 힘을 기술한다. 식 (76)은 레이저 펄스에 의해 제공되는 에너지를 나타낸다. 식 (69)가 식 (76)과 같다고 하면:

$$2 \cdot n \cdot c \cdot \rho \cdot \Delta T \cdot \frac{\lambda_0^3}{\pi^2 (NA)^2} = \frac{\bar{P}}{f} \cdot a \cdot 2 \cdot n \frac{\lambda_0}{\pi \cdot (NA)^2} = \frac{2 \cdot n \cdot a \cdot \bar{P} \cdot \lambda_0}{\pi \cdot f \cdot (NA)^2} \quad (77)$$

식 (77)로부터, 온도 차이 ΔT 는 평균 펄스 에너지 $\frac{\bar{P}}{f}$ 의 함수로서 표현될 수 있다:

$$\Delta T = \frac{a(\lambda_0) \cdot \pi \cdot (NA)^2}{c \cdot \rho \cdot \lambda_0^2} \cdot \frac{\bar{P}}{f} \quad (78)$$

또한, 가우스 초점의 Si 결정을 국부적으로 녹이기 위해 필요한 레이저의 요구되는 평균 파워는 요구되는 온도의 차이 ΔT 로부터 추정될 수 있다:

$$\bar{P} = \frac{\Delta T \cdot c \cdot \rho \cdot \lambda_0^2 \cdot f}{a(\lambda_0) \cdot \pi \cdot (NA)^2} \quad (79)$$

식 (78) 및 (79)에서, 도 36으로부터 알 수 있는 바와 같이, 이것은, Si의 흡수 계수가 Si 결정에 픽셀을 도입하기 위해 적용된 레이저 시스템의 파장에 매우 의존하는 것을 나타낸다. Si 결정의 재료 파라미터 $a(\lambda_0)$ 및 ρ 와는 별개로, 식 (78) 및 (79)는 광학 시스템의 파라미터 NA 와 레이저 시스템의 주파수 f 를 더 포함한다. 다음의 설명에서 포커싱 옵틱은 $NA = 0.8$ 을 만족하는 것으로 가정한다. 도 37로부터 알 수 있는 바와 같이, 전파 방향인 z -방향으로, 고 에너지 영역, 즉 가우스 초점을 한정하기 위해, NA 가 2를 초과할 수 있도록 고체 침입 렌즈(SIL: solid immersion lens)를 사용하여 포커싱 옵틱이 이용될 수 있다.

도 40은 밴드 에지의 범위에서 $775 \mu m$ 의 두께를 갖는 순수 Si 웨이퍼의 내부 광 투과의 변화를 나타낸다. 한편, Si 웨이퍼에 픽셀을 기입하는데 사용되는 레이저 펄스의 파장은 레이저 펄스의 광자가 Si 웨이퍼에 특히 가우스 빔 포커스에 흡수되도록 충분히 낮게 선택되어야 한다. 다른 한편, 픽셀이 미리 정해진 위치에 배치될 수 있도록 전체 웨이퍼 두께를 통해 적당한 투과율을 갖기 위해 레이저 펄스의 파장은 충분히 길어야 한다.

도 41은 순수 Si 결정의 밴드 에지 주위의 파장의 함수로서 펄스 에너지를 나타낸다. 도 41에서 알 수 있는 것 같이, 펄스 에너지는 $1050 nm$ 의 파장에 대해서 $0.4 \mu J$ 에 달한다. 펄스 에너지는 약 $1100 nm$ 의 파장을 갖는 레이저 펄스에 대해 약 $1 \mu J$ 까지 상승한다. 따라서, 표 1에 나타난 바와 같이, Si 결정에 픽셀을 기입하기 위한 추정된 에너지 범위는 포토 리소그래픽 마스크의 기관에 픽셀을 도입하기 위한 것과 유사하다. 도 41에서 2개의 점은 Si 결정을 국부적으로 녹이기 위해 충분한 펄스 에너지를 공급할 수 있는 레이저 시스템이 이용가능한

것을 나타낸다.

- [0235] 도 41의 HE1060은 1064 μm 에서 레이저 펄스를 방사하는 Nd-YAG 레이저 시스템이다. 가우스 빔의 초점 내에서 웨이퍼 내의 Si 결정에 국부적으로 녹이기에 충분한 에너지를 공급할 수 있다. 웨이퍼 내의 용융된 Si 체적은 결정질 실리콘보다 1.8% 작은 질량 밀도를 갖는 비정질 실리콘으로서 응고된다(표 6 참조). 따라서, 픽셀은, Si 웨이퍼의 표면 형상을 변경하는데 사용될 수 있는 주위의 Si 결정에 응력을 유도한다.
- [0236] 위에 주어진 레이저 파라미터에 대한 평가는 대략적인 추정일 뿐이다. Si 웨이퍼에 픽셀을 기입하기 위한 레이저 파라미터에 대한 보다 정확한 평가는, 들어온 레이저 펄스가 Si 웨이퍼를 통해 전파하는 방법, 특히, 가우스 초점 내의 온도가 Si 결정의 광학 특성을 동적으로 변경하는 방법의 유한 요소 계산을 행함으로서 얻어질 수 있다. 예를 들면, 도 35에서 알 수 있는 바와 같이, 실리콘의 흡수율은 Si 결정의 온도의 함수로서 증가한다. 또한, 보다 정확한 추정을 위해서, 가우스 빔의 초점에 증착된 에너지가 주위의 결정 재료로 방산하는 방법도 또한 고려한다. 따라서, 상기 제시된 추정은, 픽셀들의 배열이 Si 결정에 또는 더 일반적으로 반도체 결정에 정의된 방식으로 기입될 수도 있는 것을 나타내는 1차 근사이다.
- [0237] 이하에, 웨이퍼의 벤딩 및 그 수정이 논의된다. 도 42의 도해 4200는 웨이퍼의 전면(4420) 상에 집적 회로를 제조하는 프로세스를 시작할 때 웨이퍼(4210)를 통한 단면도를 개략적으로 도시한다. 점선(4250)은 웨이퍼(4210)의 깊이의 절반을 나타내며, 또한 중립면이라고도 칭한다. 웨이퍼(4210)는 척으로, 예를 들면, 진공 척으로, 그 후면(4230)에 고정된다. 도 42에 도시된 예에서, 웨이퍼(4210)는 실리콘 웨이퍼이다.
- [0238] 도 42는 웨이퍼(4210)는 그 전면(4220)에 더 많은 집적 회로(IC)를 제조하는 처리 단계의 시작 이전에 본질적으로 평형한 것을 나타낸다.
- [0239] 도 43은 IC(4360, 4370 및 4380)를 생성하기 위해 일부 처리 단계들이 행해진 후의 상황을 개략적으로 나타낸다. 전면(4320)을 처리하면 웨이퍼(4310)에 응력을 발생시켜서 그 결과 웨이퍼(4310)가 구부러지게 된다.
- [0240] 도 43에 도시된 예에서, IC는 웨이퍼(4310)의 전면(4320) 상에 제조된다. 당업자는 웨이퍼(4310) 상에 임의의 종류의 IC가 제조될 수 있는 것을 알 수 있다. 또한, 본 출원에 정의된 방법은 웨이퍼(4310)에 응력을 발생시키는 임의의 제조 공정에 적용될 수 있다.
- [0241] 벤딩의 크기는 웨이퍼, 그 크기 및 그 웨이퍼에 제조되는 IC에 따라 달라진다. 벤딩은 최대 100 μm 의 범위에 있을 수 있고, 불리한 조건에서는 더 클 수 있다. 예를 들면 3DNand와 같은 진보된 저장 기술에 따라서 벤딩 효과가 증가하는 경향이 있다.
- [0242] 도 4의 장치(400)는 웨이퍼(4310)의 벤딩량을 측정하기 위해 사용될 수 있다. 웨이퍼의 벤딩량을 결정하기 위해 웨이퍼(4310)의 전면(4320)을 사용하는 것이 바람직하다. 웨이퍼가 척에 고정되면 웨이퍼(4310)를 측정할 수 있다. 또 다른 접근 방법에서, 다양한 처리 단계들로 인해서 프로필 또는 윤곽을 갖지 않는, 웨이퍼(4310)의 후면(4330)이 웨이퍼(4310)의 벤딩 효과를 결정하기 위해 또한 사용될 수 있다.
- [0243] 다음 단계에서, 레이저 펄스의 3차원(3D) 배열은 입력 데이터로서 측정된 벤딩 데이터를 이용하여 계산된다. 이 단계는 도 5의 장치(500)의 설명과 관련하여 더욱 상세하게 설명한다.
- [0244] 마지막으로, 레이저 펄스의 계산된 3차원 배열이 웨이퍼(4310)의 상부에 기입되어, 도트(4390)로 표시된 웨이퍼(4310)의 픽셀들의 3차원 배열을 생성한다. 도 43으로부터 알 수 있는 것 같이, 레이저 펄스의 계산된 3차원 배열은 대칭의 문제, 즉, 웨이퍼(4310)의 벤딩을 고려한다.
- [0245] 도 44는 픽셀 기입 처리의 종결 후의 웨이퍼(4410)를 개략적으로 나타낸다. 도 43의 웨이퍼(4310)의 벤딩은 웨이퍼(4410)에 대해서 본질적으로 제거된다. 도 43 및 44에 도시된 예에서, 레이저 시스템이 약 2 μm 의 파장에서 방사되는 초단 레이저 펄스를 생성하기 위해 사용될 수 있다. 이 파장 범위에서 방출하는 레이저는 예를 들면, Ho-YAG 및 Tm-YAG 레이저 시스템이다. 상기 추정된 것 같이, 웨이퍼에서 다이를 절단하기 위해 현재 사용되는 1064 nm의 파장에서 방출하는 Nd-YAG 레이저 시스템을 사용하는 것이 또한 가능하다. 이것은, 웨이퍼(4310)에 3차원 배열의 레이저 펄스를 도입하기 위해 이미 이용가능한 레이저 시스템이 적용될 수 있으므로 유리하다.
- [0246] 픽셀이 Si 결정에 응력을 국부적으로 생기게 하도록 레이저 펄스의 파라미터와 3차원 배열의 레이저 펄스가 선택되어 각종 처리 단계에 의해 생긴 응력을 상쇄하도록 웨이퍼(4410)의 질량 밀도를 감소시키고 벤딩 효과를 가

저 온다.

- [0247] 웨이퍼(4310)의 최소 처리 노력으로 형성될 수 있으므로, 웨이퍼(4310)의 전면(4320)을 통해 레이저 펄스를 도입하는 것이 바람직하다. 이와 같이 하여, 이 처리 공정은 순수 실리콘 웨이퍼(4310)에 대하여 IC(4360, 4370 및 4380)의 재료의 밴드 갭을 변화, 즉, 감소시킬 수 있는 것을 고려해야 한다. 이것은 방사선이 흡수되지 않고 IC(4360, 4370 및 4380)를 본질적으로 투과할 수 있도록 레이저 펄스의 파장을 선택하는 것이 필요하다는 것을 의미한다. 또 다른 접근 방법에 있어서, 후방 기관 표면(4330)을 통해 레이저 펄스의 3차원 배열을 도입할 수 있다.
- [0248] 도 42 및 43으로부터 알 수 있듯이, 픽셀의 3차원 배열이 IC(4360, 4370 및 4380)의 기능 층에 배열되지 않고, 그들의 기관에 배열된다. 따라서, 픽셀 작성 프로세스는 IC(4360, 4370 및 4380)에 어떠한 손상도 유발하지 않는다.
- [0249] 도 45는 본 발명의 방법의 실시 예의 플로우차트(4500)를 도시한다. 이 방법은 블록 4510에서 시작한다. 제1 단계 4520에서, 광학 부품 또는 웨이퍼의 기존 3차원 윤곽이 측정된다. 예를 들면, 도 4에 도시된 계측 틀(400)은 이 단계를 행한다. 제2 단계 4530에서, 미리 정해진 3차원 윤곽으로부터 기존 3차원 윤곽의 편차가 결정된다. 이 방법 단계는 예를 들어 도 5의 컴퓨터(560) 또는 컴퓨터 시스템(560)에 의해 실행될 수 있다. 그 다음, 단계 4540에서, 레이저 펄스의 3차원 배열은 단계 4530에서 결정된 편차로부터 계산된다. 예를 들면, 컴퓨터(560)는 이 계산을 다시 수행할 수 있다. 단계 4550에서, 레이저 펄스의 계산된 3차원 배열이 광학 부품에 적용된다. 예를 들면, 도 5의 레이저 시스템(500)은 이 방법 단계를 실행할 수 있다.
- [0250] 도 45의 플로우차트의 또 다른 단계들은 선택적이다. 단계 4560에서, 레이저 펄스의 3차원 배열의 적용에 의해 생성된 3차원 형상이 측정된다. 이어서, 단계 4570에서, 미리 정해진 3차원 형상으로부터 생성된 3차원 형상의 잔여 편차가 결정된다. 결정 블록 4580에서, 생성된 3차원 형상과 미리 정해진 3차원 형상 간의 잔여 편차가 미리 정해진 스트레스홀드 이하인지 아닌지 결정된다. 이하인 경우에는, 방법은 블록 4590에서 종료한다. 잔여 편차가 미리 정해진 스트레스홀드보다 여전히 큰 경우, 방법은 블록 3740으로 진행하고, 레이저 펄스의 새로운 3차원 배열이 계산되고 미리 정해진 3차원 형상에 밀접하게 관련하여 생성된 3차원 형상을 제공한다.
- [0251] 마지막으로, 도 46a 및 46b의 플로우차트(4600)는, 예를 들면, EUV 마스크의 제조 과정에서 정의된 방법의 적용을 제시한다. 유사한 방식으로, 이 정의된 방법은, 웨이퍼에 IC를 제조하는 공정시, 웨이퍼뿐 아니라 다른 광학 부품에 적용될 수 있다. EUV 마스크 블랭크와 EUV 마스크는 이상적으로 평평해야 한다. EUV 마스크 블랭크의 후면이 1 μm 의 범위 내에서 평평하지 않으면, EUV 마스크의 제조 공정시 기계적 척에 의해 및/또는 조명 공정에서 EUV 마스크의 적용 시 스캐너의 정전 척에 의해 상이하게 파괴된다. EUV 마스크의 상이한 그림으로 인한 상이한 표면 프로파일은, 그 형상이 2개의 장착 원칙에 대해서 다르면, 완전히 보상 될 수 없는 형상 에러를 발생시킨다. 또한, EUV 마스크가 완전하게 평평하지 않으면, 척에 장착될 때마다 구부러져서 입자 생성을 추가적으로 초래할 수 있다. 그러므로, EUV 마스크 제조 공정의 초기에 EUV 마스크 블랭크가 완전하게 평평하며, 제조 공정의 다양한 단계 동안 평탄하게 유지되는 것이 필수적이다. 도 46a 및 46b의 플로우차트(4600)는, 제조 공정에서 들어온 마스크 블랭크가 이상적으로 평평하다고 가정한다.
- [0252] 제조 공정은 도 46a의 블록 4605에서 시작한다. 제1 단계 4610에서, 도 2의 다층 구조물(255)이 마스크 블랭크 또는 기관(210)에 배치된다. 그 다음, 흡수층(290)이 다층 구조물(255) 상에 배치된다. 단계 4615에서, 블록 4610의 제조 공정 단계에 의해 생긴 후방 기관 표면(225)의 편평도의 편차가 결정된다. 결정 블록 4620에서, 후방 기관 표면(225)의 편평도의 편차가 미리 정의된 스트레스홀드 이하인지 아닌지 결정된다. 이하인 경우에, 방법은 단계 4640으로 진행한다. 이 조건이 만족되지 않으면, 이 방법은 블록 4625로 진행하고, 후방 기관 표면(225)을 평탄하게 하는 3차원 배열의 레이저 펄스가 계산된다. 단계 4630에서, 레이저 펄스의 계산된 3차원 배열이 EUV 마스크의 기관(210)에 적용된다. 결정 블록 4635에서, 후방 기관 표면(225)이 편평도 요구 사항을 만족하는지 체크된다. 여전히 그렇지 않은 경우, 단계 4625 및 4830가 반복된다. EUV 마스크 편평도의 결정된 편차가 미리 정해진 스트레스홀드 미만이 될 때까지 방법 단계 4625 및 4630가 반복된다. 그 다음, 이 방법은 블록 4640으로 진행한다.
- [0253] 블록 4640에서, 상기 흡수층이 패터닝되고, 다층 구조물(255)의 주변 부분이 제거된다. 다음, 단계 4645에서, 블록 4640의 처리에 의해 생긴 편평도의 편차가 결정된다. 블록 4640의 각각의 처리에 의해 개별적으로 생긴 편평도 변화를 결정할 수 있는 것은 물론이다. 결정 블록 4645에서, 편평도의 편차의 편평도 변화가 미리 정해진 스트레스홀드 이하인지 아닌지 결정된다. 이 조건이 충족되면, 이 방법은 블록 4655에서 종료한다. 그렇지 않은 경우, 도 46b의 단계 4660에서, 블록 4640의 제조 단계에 의해 생긴 편평도 변화를 제거하거나 또는 적어

도 감소시키기 위한 레이저 펄스의 제2 3차원 배열이 계산된다. 그 다음, 단계 4665에서, 레이저 펄스의 계산된 3차원 배열이 EUV 마스크(200)의 기관(210)에 적용된다. 또한, 결정 블록 4670에서, 후방 기관 표면(225)의 편평도의 편차가 미리 정해진 스트레스홀드 미만인지 아닌지 체크된다. 이것이 사실이면, 방법은 블록 4675에서 종료한다. 이 조건이 충족되지 않으면, 방법은 블록 4660으로 진행하여 단계 4660 및 4665를 반복한다. EUV 마스크의 후방 기관 표면의 결정된 편평도가 미리 정해진 스트레스홀드 아래가 될 때까지 단계 4660, 4665가 반복된다.

[0254] 6. 이론적 배경

[0255] 이하에, 이론적 배경의 일부의 개요를 앞 절에 제시된 본 발명의 방법의 다른 양태를 논의하면서 설명한다.

[0256] 광학 소자 또는 웨이퍼의 미리 정해진 3차원(3D) 형상을 생성하기 위해, 픽셀의 다른 배열들에 배치되는 상이한 종류의 픽셀들이 사용된다. 상이한 종류의 픽셀과 상이한 배열들을 적용함으로써 측정된 또는 결정된 3차원 윤곽을 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼의 미리 정해진 형상에 조정할 수 있다. 용어 3D는 광학 부품 또는 웨이퍼의 z-방향인 레이저 빔의 방향뿐 아니라 폭 치수, 즉 x- 및 y-방향으로 정의된, 입사 레이저 펄스에 직교하는 면에서의, 치수의 변화를 의미한다. 예를 들면, 광학 소자 및/또는 웨이퍼의 횡 방향에 주로 변화를 주거나, 또는 높이를 주로 변화시키기 위해 상기 광학 부품 및/또는 상기 웨이퍼에 상이한 종류의 픽셀을 도입할 수 있다. 모두, 횡 및 z-방향의 변동은 로컬 및/또는 글로벌 변형에 의해 이루어질 수 있다. 용어 광학 부품 및 광학 소자는 본 출원에서 동의어로 사용된다.

[0257] 일반적으로, 이미 앞 절에서 설명된 대로, 광학 소자 재료 또는 웨이퍼 재료의 밀도를 국부적으로 변경함으로써, 픽셀은 광학 소자 또는 웨이퍼에 응력을 준다. 펄스 지속 시간, 펄스 에너지, 빔 형상, 및/또는 반복률 등의, 초단파 레이저 소스의 레이저 빔의 일부 파라미터를 변화시켜서, 확장 픽셀 및 축소 픽셀이 광학 소자에 도입될 수 있거나 광학 소자에 기입될 수 있다. 확장 픽셀을 기입함으로써, 광학 소자 재료 또는 웨이퍼 재료의 밀도가 국부적으로 감소되는 반면, 축소 픽셀을 기입함으로써, 광학 소자 재료 또는 웨이퍼 재료의 밀도가 국부적으로 증가된다.

[0258] 광학 소자 또는 웨이퍼에 픽셀을 기입하는 것은 2 세트의 파라미터에 의한 특징을 갖는다. (a) 제1 세트는 각각의 픽셀의 3차원 치수를 정의한다. (b) 제2 세트는 3차원 배열의 각각의 픽셀의 어셈블리를 정의한다.

[0259] (a) 레이저 빔 파라미터, 기입 모드 또는 기입 모드 시그니처: 상이한 물리적 조건을 갖는 광학 소자 또는 웨이퍼에 각각의 픽셀을 기입한 결과 상이한 특성 및/또는 상이한 형상을 갖는 상이한 종류의 픽셀들이 얻어진다. 각각의 픽셀의 3차원 치수 및 효과를 특징짓는 파라미터는 다음과 같다: (I) 픽셀의 크기를 변경하는 레이저 광원의 광 빔의 펄스 파워. 레이저 펄스 에너지를 감소시켜서 더 작은 픽셀이 얻어진다. 실제로, 픽셀 생성에 있어서, 광학 소자 또는 웨이퍼의 재료의 항복 한계에 의해 최소 펄스 에너지가 제한된다. 픽셀리스 기입을 위한 잘 정의된 스트레스홀드가 존재하지 않는다. 이는 고효율 픽셀리스 기입 처리를 얻기 위해 항복 스트레스홀드 바로 이하의 펄스 에너지를 사용하는 것이 유리하다. (II) 레이저 빔 펄스의 펄스 지속 시간은 각각의 픽셀의 크기에 영향을 미친다. (III) 광학 소자의 단일 위치에 적용된 레이저 펄스의 개수도 픽셀 크기에 또한 영향을 미치고, 따라서 각각의 픽셀의 효과에 영향을 미친다. (IV) 초단파 펄스 빔의 편광은 각각의 픽셀의 횡 방향의 효과에 영향을 미친다. (V) 광빔의 개구수(NA) 및/또는 빔 발산은 광학 소자 또는 웨이퍼의 재료의 항복 스트레스홀드에 영향을 미친다. 따라서, NA는 펄스 에너지와 함께 제어되어야 한다. 또한, NA는 빔 방향(z-방향)의 개별 픽셀의 크기에 매우 중요한 영향을 미친다. (VI) 레이저 광 펄스의 파장은 또한 광학 소자 또는 웨이퍼의 특정 재료에 대한 개별 픽셀의 효과에 영향을 미친다. (VII) 픽셀이 단일 레이저 펄스에 의해 생성되는 경우, 광 펄스의 횡방향 형상은 상기 생성된 픽셀의 횡방향 형상을 가져 오고, 따라서 광학 소자 또는 웨이퍼의 픽셀에 의해 유발되는 변형에 영향을 미친다.

[0260] (b) 픽셀의 3차원 배열: (레이저 빔 파라미터에 의해 결정된) 개별 픽셀 외에도, 광학 소자 또는 웨이퍼의 픽셀의 어셈블리는 픽셀의 3차원 배열에 의해 생성된 3차원 윤곽의 변화를 정의한다. 일반적으로, 픽셀의 3차원 배열은 6개의 파라미터에 의해 특징이 주어진다. 3개의 파라미터는 x-, y-, 및 z-방향의 픽셀 배열의 치수를 결정한다. 또한, 3개의 파라미터는 x-, y-, 및 z-방향의 선형 어셈블리를 특정하므로, 선형 픽셀 밀도를 특정한다. 광학 소자 또는 웨이퍼의 표면에 평행한 다른 방향으로 다른 선형 픽셀 밀도를 기입하는 것은 특히 중첩 또는 부분적 중첩 픽셀의 경우에 광학 소자 또는 웨이퍼의 비대칭 확장을 가져 온다.

[0261] 많은 애플리케이션의 경우, 픽셀의 크기는 인접한 픽셀과의 거리의 절반보다 작다. 한편, 픽셀은 레이저 광으로 또한 기입될 수 있고, 인접한 픽셀 간의 거리가 개별 픽셀 크기보다 훨씬 작다. 따라서, 준-연속(quasi-

continuous) 구조물이 광학 소자에 기입된다. 이런 종류의 픽셀에 대해서, 바람직하게는 매우 낮은 레이저 펄스 파워를 사용한다. 이러한 종류의 픽셀을 사용하는 장점은 광 산란을 유발하지 않는 동시에, 광학 소자의 광 투과율만을 변경시킨다는 것이다. 가시 스펙트럼 영역에서 가시 픽셀을 갖지 않는 이 구조는, 서로 다른 물리적 특성을 갖는 광학 소자의 재료의 대부분의 층에 더 유사하다. 이 층이 충분히 균일하면, UV 또는 DUV 빔 특성에 거의 영향을 미치지 않으며, 산란이 발생하지 않고, 이 층은 인공 주기성을 도입하지 않고, 그러므로 어떠한 회절 효과를 생성하지 않는다. 이러한 레이저 빔 파라미터를 갖는 광학 소자에 레이저 빔을 지향하는 것을 픽셀리스 기입이라고 칭한다.

[0262] 기입 모드 및 기입 모드 밀도의 2개의 파라미터 세트 또는 간단히 기입 밀도는 서로 독립적이지 않다. 예를 들면, 더 작은 픽셀의 영향은 픽셀 밀도를 증가시킴으로써 보상될 수 있다. 또한, 픽셀 배열은, 레이저 빔 파라미터들의 단일 세트 또는 하나의 기입 모드로 기입된 픽셀을 포함하는 것이 가능하다. 또한, 기입 모드는 2 개 이상의 레이저 빔 파라미터를 갖고 생성된 2개 이상의 픽셀을 포함할 수 있다. 마지막으로, 가능한 한 미리 정해진 3차원 윤곽에 가까운 광학 소자의 결정된 3차원 윤곽을 얻기 위해, 2개 이상의 픽셀 배열이 광학 소자에 도입될 수 있다. 다양한 픽셀 배열은 광학 소자 내의 다른 위치를 가질 수 있고, 부분적으로 중첩되거나 완전히 중첩될 수 있다.

[0263] 광학 소자의 미리 정해진 3차원 윤곽을 확실하게 생성하기 위해, 광학 소자에 미치는 상이한 파라미터를 갖는 극단 광 펄스들의 효과가 주지되어야 한다. 이를 위해, 상이한 파라미터 및/또는 기입 모드를 갖는 극단 광 펄스를 전체 광학 소자에 대해 결정해야 한다. 계산을 더 행하기 위해서, 광학 소자의 체적이 기본 체적 요소들 또는 기본 셀들로 분할된다. 기본 체적은 임의로 선택될 수 있지만, 에지가 직선이고 면 또는 형면이 평면인 기본 체적을 사용하는 것이 바람직하다. 기본 체적의 코너 점들은 광학 소자의 체적에 걸친 3차원 그리드 점을 형성한다. 바람직한 기본 체적은 평행육면체, 직육면체 또는 사면체이다. 하나의 기본 체적 내에, 단일 기입 모드와 기입 모드 밀도를 갖는 픽셀이 기입된다.

[0264] 직접 문제의 해결책은 레이저 빔의 작용으로부터 기본 체적의 변형을 계산하는 것, 즉, 기입 모드 또는 레이저 빔 파라미터 및 기입 모드 밀도 또는 기입 밀도의 함수로서 기본 체적의 체적 변형을 계산하는 것이다. 인가되는 레이저 펄스들의 배열(들)을 결정하기 위해, 역 문제가 해결되어야 한다. 이것은, 광학 소자의 결정된 3차원 윤곽을 그 미리 정해진 3차원 윤곽으로 변환하는, 기입 모드 또는 레이저 빔 파라미터 및 기입 모드 밀도 또는 기입 밀도의 3차원 맵을 계산하는 문제임을 의미한다.

[0265] 일반적으로 광학 소자는 매우 단단한 재료로 만들어진다. 예를 들면, 광학 시스템의 렌즈와 포토 리소그래피 조명 시스템용 포토 마스크는 바람직하게는 석영으로 만들어진다. 미리 정해진 3차원 윤곽으로부터 편차를 정정하기 위해 필요한 변형은 진폭이 매우 작고, 일반적으로 광학 소자의 재료의 탄성 한계를 초과하지 않는다.

[0266] 3가지 다른 그룹의 식들이 다음의 접근 방법에 대해 중요하다: 정적 식, 기하학 식 및 물리 식. 정적 식에서, 표면 힘의 상태 평형, 대부분의 힘과 응력은, 예를 들면, 정적 뉴턴의 법칙으로서, 광학 소자의 임의의 기본 체적에 작용한다. 기하학 식인 코시(Cauchy) 수식을 사용하여 변위 필드로부터 스트레인 텐서를 도출할 수 있다. 모든 스트레인 필드가 변위 필드에서 생길 수 있는 것은 아니기 때문에, 호환성의 조건을 고려할 필요가 있다. 열 평형 및 단열 근사에서, 일반화된 후크의 법칙(물리 식)은, 탄성체에 대해서 스트레인과 응력 텐서 사이에 선형 관련성이 있음을 나타낸다.

[0267] 위에 이미 설명한 것 같이, 일반성의 손실없이, 완전한 광학 소자가 직육면체의 시스템으로 설명될 수 있으며, 모든 직육면체는 일정한 기입 모드 및 기입 모드 밀도를 갖는다. 직육면체는 영률(Young's modulus), 포아송비(Poisson's ratio) 등의 광학 소자의 새로운 혹은 수정된 물리적 파라미터를 갖는 새로운 또는 수정된 평형 형상에 의해 특징이 주어진다. 직육면체에 유도된 변화는 양호한 근사에서, 기입 로드, 즉, 광학 소자의 물리적 파라미터에 비례한다.

[0268] 레이저 빔 파라미터 및/또는 기입 모드(즉, 직접 문제)의 함수로서 결과의 변위 필드를 계산하기 위해, 다음의 두 가지 방법 중 하나가 사용될 수 있다:

[0269] 1. 기본 체적의 경계에 작용하는 모든 내부 힘/응력을 균일화하는 스트레인 필드의 계산, 또는

[0270] 2. 전체 광학 소자에 대한 최소 포텐셜 에너지를 구함으로서 스트레인 필드의 계산을 행하는 것

[0271] 두 접근법은 기입 모드의 주어진 분포의 기입 모드 밀도의 변위의 선형 의존성을 제공한다. 두 접근법은 기입 모드와 기입 모드 밀도의 지식에 기초하여 상기 레이저 빔에 의해 유도된 기본 체적의 수정의 계산을 허용한다.

[0272] 역 문제는 일반적인 경우에 공식화될 수 있다. 기입 모드용 3차원 맵이, 그 미리 정해진 3차원 윤곽과 일치하여 광학 소자 또는 웨이퍼의 결정된 3차원 윤곽을 제공하는 기본 체적의 대상 변형을 가져오는 것으로 이해되어야 한다. 일반적으로, 상기 정의된 것같이, 기입 모드에서, 한 개 또는 수 개의 중첩 또는 부분 중첩 레이저 필스에 의해 특정 픽셀이 생성되고, 이 픽셀 들은 레이저 빔의 개별 파라미터 세트를 갖고 생성되며, 이 문제는 최적화 문제로서 공식화되어야 한다. 소망의 변위 필드에서 최소(또는 상한) 값을 갖는 목표 함수가 구성되어야 하며, 이것은 광학 소자 또는 웨이퍼의 결정된 3차원 윤곽을 미리 정해진 3차원 윤곽으로 변환한다. 최적화된 기입 모드 또는 최적화된 레이저 빔 파라미터 및 기입 모드 밀도는 목표 함수를 최소화하는 변위 필드를 생성하므로, 광학 소자 또는 웨이퍼의 미리 정해진 3차원 윤곽을 생성한다.

[0273] 역 문제를 해결하는, 즉, 광학 소자 또는 웨이퍼의 소망의 미리 정해진 3차원 윤곽을 제공하는 기입 모드의 3차원 맵을 계산하는 가능한 방법은 다음과 같다:

[0274] 1. 기입 모드의 최적화는 MLS(Moving Least Squares) 접근 방법을 사용하여 실행될 수 있다; 그러나 작은 기본 직육면체의 경우에 개별 기입 모드 맵의 완전한 계산은 매우 어려울 수 있다.

[0275] 2. 하나의 기본 직육면체는 상이한 기입 모드 밀도를 갖는 상이한 기입 모드의 중첩을 가질 수 있다는 가정과 함께, 3차원 모드 맵의 이산 파라미터는 연속 아날로그로 변환될 수 있다. 기본 직육면체의 모든 물리적 및 형태 특성 변화가 해당 기입 모드의 기여도에 비례하는 경우, 이 목표 함수는 미리 정해진 3차원 윤곽으로부터 결정된 3차원 윤곽의 잔여 편차의 제곱이다. 그 다음, 변경된 형식으로 인해서 선형 문제가 발생한다.

[0276] 이하에서, 제2 접근 방법이 사용된다. 다음의 접근 방법에서, 기본 직육면체가 예시된다. 그러나, 직육면체에 제한되는 것은 아니며, 예를 들면, 정사면체 또는 평행육면체가 또한 사용될 수 있다.

[0277] 광학 소자 또는 선형 탄성을 갖는 웨이퍼에 대해서 일반화된 후크의 법칙은 다음과 같이 3차원 형태로 제공될 수 있다:

$$\sigma_{ij}(x, y, z) = \sum_{k=1, l=1}^{3,3} H_{ijkl}(x, y, z) \epsilon_{kl}(x, y, z) \quad (1)$$

[0279] 여기서, 3차원 미소 변형 텐서(미소 스트레인 텐서) $\epsilon(x, y, z)$ 는 성분 $\epsilon_{ij}(x, y, z)$ 을 갖고, 응력 텐서 $\sigma(x, y, z)$ 는 성분 $\sigma_{ij}(x, y, z)$ 를 갖는다. 탄성 텐서 $\mathbf{H}(x, y, z)$ 는 4차 텐서 필드이다.

[0280] 다음 식을 단순화하기 위해,

$$\epsilon_0 = \epsilon_{xx}, \epsilon_1 = \epsilon_{yy}, \epsilon_2 = \epsilon_{zz}, \epsilon_3 = 2 \cdot \epsilon_{xy}, \epsilon_4 = 2 \cdot \epsilon_{xz}, \epsilon_5 = 2 \cdot \epsilon_{yz}$$

[0282] 로 정의하여, 응력 텐서 $\epsilon(x, y, z)$ 의 성분에 대해서 공학 표기가 사용된다.

[0283] 응력 텐서 $\sigma(x, y, z)$ 에 대해서 동일하게 행해진다:

$$\sigma_0 = \sigma_{xx}, \sigma_1 = \sigma_{yy}, \sigma_2 = \sigma_{zz}, \sigma_3 = 2 \cdot \sigma_{xy}, \sigma_4 = 2 \cdot \sigma_{xz}, \sigma_5 = 2 \cdot \sigma_{yz}$$

[0285] 변환의 관점에서, ϵ_i 및 σ_i 는 벡터가 아니다. 정의된 표기를 사용하여, 식 (1)에 대한 후크의 법칙이 다음의 형태로 다시 표기될 수 있다:

$$\sigma_i(x, y, z) = \sum_{k=0}^5 H_{ik}(x, y, z) \epsilon_k(x, y, z) \quad \text{또는} \quad (2)$$

$$\sigma = \mathbf{H} \epsilon$$

[0288] 4차 탄성 텐서 $\mathbf{H}(x, y, z)$ 는 2차 텐서 H_{ij} 로 감소된다.

[0289] 예를 들면, 석영 렌즈 또는 포토마스크의 기관과 같은 등방성 재료에 대해서, 탄성 텐서는 2 개의 독립적인 구

성 요소 $E(x, y, z)$ 및 $\mu(x, y, z)$ 를 가지고 있으며, 다음의 형태를 가진다:

$$\mathbf{H} = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 1-\mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & 1-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}-\mu \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, $E(x, y, z)$ 는 영률을 나타내고, $\mu(x, y, z)$ 는 포아송 비이다.

광학 소자 또는 웨이퍼에 픽셀을 기입함으로써 유도된 광학 소자 또는 웨이퍼의 변위 벡터 필드는 벡터 필드이고, 다음과 같이 표현된다:

$$\vec{u}(\vec{x}) = \vec{u}(x, y, z) = \begin{bmatrix} \Delta x(x, y, z) \\ \Delta y(x, y, z) \\ \Delta z(x, y, z) \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 4에서, $\Delta x(x, y, z)$ 는 레이저 펄스를 인가하기 전에 광학 소자 또는 웨이퍼 내의 점의 위치에 대해서 x-좌표의 변화를 나타낸다.

미소 스트레인 텐서 필드 ϵ_{ij} 는 Cauchy 식에 의해 변위 벡터 필드 $\vec{u}(x, y, z)$ 로부터 도출될 수 있다. 미소 스트레인은 다음과 같이 작성될 수 있다:

$$\vec{\epsilon}(x, y, z) = \mathbf{A} \vec{u}(x, y, z) \quad (5)$$

여기서, 행렬 연산자 \mathbf{A} 는 편미분 요소로 구성된다:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \\ \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \\ 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \end{bmatrix} \quad (6)$$

미소 스트레인은 2차 텐서이고, 사용된 공학 표기로 인한 벡터처럼 보인다.

이미 상술한 바와 같이, 라그랑주 변분 원리(Lagrange variational principle)가 광학 소자 또는 웨이퍼의 포텐셜 에너지로부터 기입 모드 및 기입 모드 밀도의 결정을 위해 사용된다. 광학 소자 또는 웨이퍼에 픽셀을 도입함으로써 생긴 변형의 전체적인 포텐셜 에너지 P는 포텐셜 에너지 밀도 $P(x, y, z)$ 의 체적 적분의 형태로 표현될 수 있다:

$$P = \int_V P(x, y, z) dV \quad (7)$$

[0302] 스트레인 텐서 필드 $\varepsilon_i(x, y, z)$ 에 의해 생긴 응력 텐서 필드 $\sigma_i(x, y, z)$ 로부터 발생된 포텐셜 에너지 밀도는 벡터 성분 모두의 양의 스칼라 곱의 적분에 비례한다. 스트레인 벡터 필드 $\varepsilon_i(x, y, z)$ 로부터 발생된 응력 벡터 필드 $\sigma_i(x, y, z)$ 에 의해 생긴 포텐셜 에너지 밀도 $P(x, y, z)$ 는 다음과 같이 주어진다:

$$P(x, y, z) = 1/2(\sigma_0\varepsilon_0 + \sigma_1\varepsilon_1 + \sigma_2\varepsilon_2 + \sigma_3\varepsilon_3 + \sigma_4\varepsilon_4 + \sigma_5\varepsilon_5) = 1/2(\vec{\sigma}, \vec{\varepsilon}) \quad (8)$$

[0303] 스트레인 텐서 필드 $\sigma_i(x, y, z)$ 를 후크의 법칙을 사용하여 식 2의 형태로 치환하고, 스트레인 벡터 필드 $\varepsilon_i(x, y, z)$ 를 식 5의 변위 필드로 대체함으로써, 포텐셜 에너지 분포 또는 포텐셜 에너지 밀도는 다음의 형태를 갖는다:

$$P(x, y, z) = \frac{1}{2}(\mathbf{H}\vec{\varepsilon}, \vec{\varepsilon}) = \frac{1}{2}(\mathbf{H}(x, y, z)\mathbf{A}\vec{u}(x, y, z), \mathbf{A}\vec{u}(x, y, z)) \quad (9)$$

[0305] 포텐셜의 최소 기준을 만족하는 변위 벡터 필드 $\vec{u}(x, y, z)$ 를 정의하는 이상적인(그러나, 유일하지 않은) 방법은 유한 요소와 같은 접근 방법이다. 일반성의 손실없이 전체의 광학 소자가 한 세트의 $K_x \cdot L_y \cdot M_z$ 기본 체적으로 표현될 수 있다. 다음 계산을 용이하게 하므로, 기본 체적이 평행 육면체, 직육면체, 큐브 또는 기본 정사면체인 것이 바람직하다. K_x 는 x-방향의 기본 체적(예를 들면, 직육면체와 같은)의 수이고, L_y 및 M_z 는 각각 y- 및 z-방향의 기본 체적(또는, 예를 들면, 직육면체)의 수이다.

[0306] 다음의 포텐셜 에너지 P의 예시된 계산에 대해서, 광학 소자는 동일한 크기의 기본 직육면체 $K_x \cdot L_y \cdot M_z$ 로 분할된다. 총 포텐셜 에너지의 P는 각각 직육면체 α 의 포텐셜 에너지 P^α 의 합이다.

$$P = \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} P^\alpha \quad (10)$$

[0308] 기본 체적 또는 기본 직육면체 α 의 포텐셜 에너지 P^α 는 기본 직육면체 α 의 체적 V^α 에 걸친 포텐셜 에너지 밀도를 적분함으로써 얻어진다.

$$P^\alpha = \int_{V^\alpha} P^\alpha(x, y, z) dV \quad (11)$$

[0310] 포텐셜 에너지 밀도 $P^\alpha(x, y, z)$ 는 식 9로부터 획득된다:

$$P^\alpha(x, y, z) = \frac{1}{2}(\mathbf{H}^\alpha \mathbf{A}\vec{u}^\alpha(x, y, z), \mathbf{A}\vec{u}^\alpha(x, y, z)) \quad (12)$$

[0312] 지표 α 는 광학 소자가 분할된 모든 기본 직육면체 α 의 수이다. 각각의 직육면체 또는 각각의 기본 체적 α 이 매우 작으므로 탄성 텐서의 2차 텐서 필드 $\mathbf{H}(x, y, z)$ 는 개별 기본 체적 또는 직육면체 α 내의 일정 텐서 \mathbf{H}^α 에 의해 대체될 수 있는 것으로 가정한다.

[0313] 도 47의 도해 4700는 기본 직육면체 α 를 도시한다.

[0314] 이 직육면체는 0부터 7까지 번호가 매겨진 8개의 코너 점을 갖는다. 도 47의 직육면체의 측면 길이는 각각 $2 \cdot m_x$, $2 \cdot m_y$ 및 $2 \cdot m_z$ 로 정의되어 있다.

[0315] 기본 직육면체 α 가 광학 소자 또는 웨이퍼의 치수에 비해 작은 것을 다시 전체로 하여, 벡터 필드 $\vec{u}(x, y, z)$ 가 그 선형 근사에 의해 치환될 수 있다. 모든 기본 체적 α 에 대해서, 벡터 필드 $\vec{u}(x, y, z)$ 는 기본 체적의 코너 점의 변위들 간의 선형 간섭에 의해 표현된다.

$$[0316] \quad \vec{u}(x, y, z) = \sum_{i=0}^7 N_i^\alpha(x, y, z) \cdot \vec{u}_i^\alpha = \sum_{i=0}^7 N_i^\alpha(x, y, z) \cdot \vec{u}_i^\alpha(x, y, z) \quad (13)$$

[0317] 이를 위해, 코너 점 N_i^α ($i = 0, \dots, 7$)의 선형 함수가 도입되고, 여기서, 지표 α 는 광학 소자가 분리되는 기본 체적을 나타낸다. 이하에서, 지표 g 는 비섭동(non-perturbed) 큐브 코너 좌표 N_i^α 또는 3차원 그리드 노드, 즉, 광학 소자에 광 펄스 또는 레이저 펄스를 인가하기 전의 위치를 나타낸다:

$$[0318] \quad \begin{array}{cc} N_6^\alpha & N_7^\alpha \\ N_4^\alpha & N_5^\alpha \end{array} \quad \begin{array}{cc} x_6^{g\alpha}, y_6^{g\alpha}, z_6^{g\alpha} & x_7^{g\alpha}, y_7^{g\alpha}, z_7^{g\alpha} \\ x_4^{g\alpha}, y_4^{g\alpha}, z_4^{g\alpha} & x_5^{g\alpha}, y_5^{g\alpha}, z_5^{g\alpha} \end{array}$$

$$\begin{array}{cc} N_2^\alpha & N_3^\alpha \\ N_0^\alpha & N_1^\alpha \end{array} \quad \begin{array}{cc} x_2^{g\alpha}, y_2^{g\alpha}, z_2^{g\alpha} & x_3^{g\alpha}, y_3^{g\alpha}, z_3^{g\alpha} \\ x_0^{g\alpha}, y_0^{g\alpha}, z_0^{g\alpha} & x_1^{g\alpha}, y_1^{g\alpha}, z_1^{g\alpha} \end{array} \quad (14)$$

$$[0319] \quad \text{여기서, } u_i^\alpha = u(x_i^{g\alpha}, y_i^{g\alpha}, z_i^{g\alpha}) \text{ 및 } i = (0, \dots, 7) \quad (15)$$

[0320] 광학 소자에 픽셀을 기입하여 생긴 코너 점의 좌표의 변위는 다음과 같이 정의된다:

$$[0321] \quad N_0^\alpha(x, y, z) = \frac{(x_1^{g\alpha} - x)}{(x_1^{g\alpha} - x_0^{g\alpha})} \frac{(y_1^{g\alpha} - y)}{(y_1^{g\alpha} - y_0^{g\alpha})} \frac{(z_1^{g\alpha} - z)}{(z_1^{g\alpha} - z_0^{g\alpha})}$$

$$N_1^\alpha(x, y, z) = \frac{(x - x_0^{g\alpha})}{(x_1^{g\alpha} - x_0^{g\alpha})} \frac{(y_1^{g\alpha} - y)}{(y_1^{g\alpha} - y_0^{g\alpha})} \frac{(z_1^{g\alpha} - z)}{(z_1^{g\alpha} - z_0^{g\alpha})}$$

$$[0322] \quad N_2^\alpha(x, y, z) = \frac{(x_1^{g\alpha} - x)}{(x_1^{g\alpha} - x_0^{g\alpha})} \frac{(y - y_0^{g\alpha})}{(y_1^{g\alpha} - y_0^{g\alpha})} \frac{(z_1^{g\alpha} - z)}{(z_1^{g\alpha} - z_0^{g\alpha})}$$

$$N_3^\alpha(x, y, z) = \frac{(x - x_0^{g\alpha})}{(x_1^{g\alpha} - x_0^{g\alpha})} \frac{(y - y_0^{g\alpha})}{(y_1^{g\alpha} - y_0^{g\alpha})} \frac{(z_1^{g\alpha} - z)}{(z_1^{g\alpha} - z_0^{g\alpha})} \quad (16)$$

$$N_4^\alpha(x, y, z) = \frac{(x_1^{g\alpha} - x)}{(x_1^{g\alpha} - x_0^{g\alpha})} \frac{(y_1^{g\alpha} - y)}{(y_1^{g\alpha} - y_0^{g\alpha})} \frac{(z - z_0^{g\alpha})}{(z_1^{g\alpha} - z_0^{g\alpha})}$$

$$N_5^\alpha(x, y, z) = \frac{(x - x_0^{g\alpha})}{(x_1^{g\alpha} - x_0^{g\alpha})} \frac{(y_1^{g\alpha} - y)}{(y_1^{g\alpha} - y_0^{g\alpha})} \frac{(z - z_0^{g\alpha})}{(z_1^{g\alpha} - z_0^{g\alpha})}$$

[0323]

$$N_6^\alpha(x, y, z) = \frac{(x_1^{g\alpha} - x)}{(x_1^{g\alpha} - x_0^{g\alpha})} \frac{(y - y_0^{g\alpha})}{(y_1^{g\alpha} - y_0^{g\alpha})} \frac{(z - z_0^{g\alpha})}{(z_1^{g\alpha} - z_0^{g\alpha})}$$

$$N_7^\alpha(x, y, z) = \frac{(x - x_0^{g\alpha})}{(x_1^{g\alpha} - x_0^{g\alpha})} \frac{(y - y_0^{g\alpha})}{(y_1^{g\alpha} - y_0^{g\alpha})} \frac{(z - z_0^{g\alpha})}{(z_1^{g\alpha} - z_0^{g\alpha})}$$

[0324]

[0325] 이 접근 방법은 실제 변위 벡터 필드 $\vec{u}(x, y, z)$ 의 양호한 연속적인 근사를 가져 온다.

[0326] 기본 체적 α 의 포텐셜 에너지 P^α 는 직육면체 α 의 코너 변위의 함수로서 표현된다. 식 12에서 직육면체 α 의 변위 벡터 필드 $\vec{u}(x, y, z)$ 를 직육면체 α 내의 식 14의 근사에 의해 대체함으로써 직육면체 α 내의 식 12는 제작성될 수 있다.

$$P^\alpha(x, y, z) = \frac{1}{2} (H^\alpha \sum_{i=0}^7 AN_i^\alpha(x, y, z) u_i^\alpha, \sum_{k=0}^7 AN_k^\alpha(x, y, z) u_k^\alpha) \quad (17)$$

[0327]

[0328] 직교 좌표 x, y, z 에 대한 형태 함수 N_i^α 의 제1 도함수는 다음과 같이 주어진다:

$$\frac{\partial N_0^\alpha}{\partial x} = -\frac{\partial N_1^\alpha}{\partial x} = -N^\alpha (y_1^{g\alpha} - y)(z_1^{g\alpha} - z)$$

$$\frac{\partial N_2^\alpha}{\partial x} = -\frac{\partial N_3^\alpha}{\partial x} = -N^\alpha (y - y_0^{g\alpha})(z_1^{g\alpha} - z)$$

$$\frac{\partial N_4^\alpha}{\partial x} = -\frac{\partial N_5^\alpha}{\partial x} = -N^\alpha (y_1^{g\alpha} - y)(z - z_0^{g\alpha})$$

$$\frac{\partial N_6^\alpha}{\partial x} = -\frac{\partial N_7^\alpha}{\partial x} = -N^\alpha (y - y_0^{g\alpha})(z - z_0^{g\alpha})$$

$$\frac{\partial N_0^\alpha}{\partial y} = -\frac{\partial N_2^\alpha}{\partial y} = -N^\alpha (x_1^{g\alpha} - x)(z_1^{g\alpha} - z)$$

$$\frac{\partial N_1^\alpha}{\partial y} = -\frac{\partial N_3^\alpha}{\partial y} = -N^\alpha (x - x_0^{g\alpha})(z_1^{g\alpha} - z)$$

[0329]

$$\frac{\partial N_4^\alpha}{\partial y} = -\frac{\partial N_6^\alpha}{\partial y} = -N^\alpha (x_1^{g\alpha} - x)(z - z_0^{g\alpha})$$

$$\frac{\partial N_5^\alpha}{\partial y} = -\frac{\partial N_7^\alpha}{\partial y} = -N^\alpha (x - x_0^{g\alpha})(z - z_0^{g\alpha})$$

$$\frac{\partial N_0^\alpha}{\partial z} = -\frac{\partial N_4^\alpha}{\partial z} = -N^\alpha (x_1^{g\alpha} - x)(y_1^{g\alpha} - y)$$

$$\frac{\partial N_1^\alpha}{\partial z} = -\frac{\partial N_5^\alpha}{\partial z} = -N^\alpha (x - x_0^{g\alpha})(y_1^{g\alpha} - y)$$

$$\frac{\partial N_2^\alpha}{\partial z} = -\frac{\partial N_6^\alpha}{\partial z} = -N^\alpha (x_1^{g\alpha} - x)(y - y_0^{g\alpha})$$

$$\frac{\partial N_3^\alpha}{\partial z} = -\frac{\partial N_7^\alpha}{\partial z} = -N^\alpha (x - x_0^{g\alpha})(y - y_0^{g\alpha})$$

[0330]

(18)

[0331] 여기서, $N^\alpha = 1/(8 \cdot m_x^\alpha \cdot m_y^\alpha \cdot m_z^\alpha)$, 이고 m_l^α 는 기본 체적 α 의 측면 길이 x , y , 또는 z (즉, $l = (x, y, z)$) 중 하나의 절반이다.

[0332] 현재 직교 좌표가 모든 기본 체적 α 에 대해서 도입되고, 여기서, 좌표 시스템의 원점은 기본 체적 α 의 중앙에 있다.

[0333] 즉:

$$x^\alpha = x - (x_0^{g\alpha} + x_1^{g\alpha})/2$$

$$y^\alpha = y - (y_0^{g\alpha} + y_1^{g\alpha})/2$$

$$z^\alpha = z - (z_0^{g\alpha} + z_1^{g\alpha})/2$$

[0334] (19)

[0335] 그 다음, 식 (18)의 부분 도함수는 다음과 같이 변환된다:

$$\frac{\partial N_o^\alpha}{\partial x} = -\frac{\partial N_1^\alpha}{\partial x} = -N^\alpha (m_y^\alpha - y^\alpha)(m_z^\alpha - z^\alpha)$$

$$\frac{\partial N_2^\alpha}{\partial x} = -\frac{\partial N_3^\alpha}{\partial x} = -N^\alpha (m_y^\alpha + y^\alpha)(m_z^\alpha - z^\alpha)$$

[0336]

$$\frac{\partial N_4^\alpha}{\partial x} = -\frac{\partial N_5^\alpha}{\partial x} = -N^\alpha (m_y^\alpha - y^\alpha)(m_z^\alpha + z^\alpha)$$

$$\frac{\partial N_6^\alpha}{\partial x} = -\frac{\partial N_7^\alpha}{\partial x} = -N^\alpha (m_y^\alpha + y^\alpha)(m_z^\alpha + z^\alpha)$$

$$\frac{\partial N_o^\alpha}{\partial y} = -\frac{\partial N_2^\alpha}{\partial y} = -N^\alpha (m_x^\alpha - x^\alpha)(m_z^\alpha - z^\alpha)$$

[0337] (20)

$$\frac{\partial N_1^\alpha}{\partial x} = -\frac{\partial N_3^\alpha}{\partial x} = -N^\alpha (m_x^\alpha + x^\alpha)(m_z^\alpha - z^\alpha)$$

$$\frac{\partial N_4^\alpha}{\partial y} = -\frac{\partial N_6^\alpha}{\partial y} = -N^\alpha (m_x^\alpha - x^\alpha)(m_z^\alpha + z^\alpha)$$

$$\frac{\partial N_5^\alpha}{\partial y} = -\frac{\partial N_7^\alpha}{\partial y} = -N^\alpha (m_x^\alpha + x^\alpha)(m_z^\alpha + z^\alpha)$$

[0338]

$$\frac{\partial N_o^\alpha}{\partial z} = -\frac{\partial N_4^\alpha}{\partial z} = -N^\alpha (m_x^\alpha - x^\alpha)(m_y^\alpha - y^\alpha)$$

[0339]

$$\frac{\partial N_1^\alpha}{\partial z} = -\frac{\partial N_5^\alpha}{\partial z} = -N^\alpha (m_x^\alpha + x^\alpha)(m_y^\alpha - y^\alpha)$$

$$\frac{\partial N_2^\alpha}{\partial z} = -\frac{\partial N_6^\alpha}{\partial z} = -N^\alpha (m_x^\alpha - x^\alpha)(m_y^\alpha + y^\alpha)$$

$$\frac{\partial N_3^\alpha}{\partial z} = -\frac{\partial N_7^\alpha}{\partial z} = -N^\alpha (m_x^\alpha + x^\alpha)(m_y^\alpha + y^\alpha)$$

[0340]

[0341] 변위 벡터 필드 $\vec{u}(x, y, z)$ 에 행렬 연산자 \mathbf{A} 를 적용한 결과 다음이 얻어진다:

$$\mathbf{A} \vec{u}^\alpha(x, y, z) = \sum_{k=0}^7 \begin{bmatrix} \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial x} u_{kx}^\alpha \\ \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial y} u_{ky}^\alpha \\ \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial z} u_{kz}^\alpha \\ \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial y} u_{kx}^\alpha + \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial x} u_{ky}^\alpha \\ \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial z} u_{kx}^\alpha + \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial x} u_{kz}^\alpha \\ \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial z} u_{ky}^\alpha + \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial y} u_{kz}^\alpha \end{bmatrix} \quad (21)$$

[0342]

[0343] 식 21과 식 3의 탄성 텐서 \mathbf{H} 를 승산하여 식 22가 구해진다:

$$HA\vec{u}^\alpha(\bar{x}) = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \sum_{k=0}^7 \begin{bmatrix} (1-\mu) \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial x} u_{kx}^\alpha + \mu \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial y} u_{ky}^\alpha + \mu \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial z} u_{kz}^\alpha \\ \mu \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial x} u_{kx}^\alpha + (1-\mu) \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial y} u_{ky}^\alpha + \mu \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial z} u_{kz}^\alpha \\ \mu \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial x} u_{kx}^\alpha + \mu \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial y} u_{ky}^\alpha + (1-\mu) \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial z} u_{kz}^\alpha \\ (1/2-\mu) \left(\frac{\partial N_k^\alpha}{\partial y} u_{kx}^\alpha + \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial x} u_{ky}^\alpha \right) \\ (1/2-\mu) \left(\frac{\partial N_k^\alpha}{\partial z} u_{kx}^\alpha + \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial x} u_{kz}^\alpha \right) \\ (1/2-\mu) \left(\frac{\partial N_k^\alpha}{\partial z} u_{ky}^\alpha + \frac{\partial N_k^\alpha}{\partial y} u_{kz}^\alpha \right) \end{bmatrix} \quad (22)$$

[0344]

[0345] 이제 다음의 약어가 도입된다:

$$\frac{\partial N_k^\alpha}{\partial s} = \mathbf{N}_{ks}^\alpha$$

[0346]

$$\mathbf{N}_{ks}^{\alpha} = q_k^s \mathbf{N}^{\alpha} \frac{(m_x^{\alpha} + q_k^x x^{\alpha})(m_y^{\alpha} + q_k^y y^{\alpha})(m_z^{\alpha} + q_k^z z^{\alpha})}{(m_s^{\alpha} + q_k^s s^{\alpha})} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} q_k^x &= q(k/1); \\ q_k^y &= q(k/2); \quad q(x) = (-1)^{\lfloor x \rfloor + 1}; \\ q_k^z &= q(k/4); \end{aligned}$$

그 다음, 식 21 및 22는, 각각 다음과 같다:

$$\mathbf{A} \vec{u}^{\alpha}(x, y, z) = \sum_{k=0}^7 \begin{bmatrix} \mathbf{N}_{kx}^{\alpha} u_{kx}^{\alpha} \\ \mathbf{N}_{ky}^{\alpha} u_{ky}^{\alpha} \\ \mathbf{N}_{kz}^{\alpha} u_{kz}^{\alpha} \\ \mathbf{N}_{ky}^{\alpha} u_{kx}^{\alpha} + \mathbf{N}_{kx}^{\alpha} u_{ky}^{\alpha} \\ \mathbf{N}_{kz}^{\alpha} u_{kx}^{\alpha} + \mathbf{N}_{kx}^{\alpha} u_{kz}^{\alpha} \\ \mathbf{N}_{kz}^{\alpha} u_{ky}^{\alpha} + \mathbf{N}_{ky}^{\alpha} u_{kz}^{\alpha} \end{bmatrix} \quad (24)$$

및

$$HA \vec{u}^{\alpha}(\bar{x}) = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \sum_{k=0}^7 \begin{bmatrix} (1-\mu)\mathbf{N}_{kx}^{\alpha} u_{kx}^{\alpha} + \mu\mathbf{N}_{ky}^{\alpha} u_{ky}^{\alpha} + \mu\mathbf{N}_{kz}^{\alpha} u_{kz}^{\alpha} \\ \mu\mathbf{N}_{kx}^{\alpha} u_{kx}^{\alpha} + (1-\mu)\mathbf{N}_{ky}^{\alpha} u_{ky}^{\alpha} + \mu\mathbf{N}_{kz}^{\alpha} u_{kz}^{\alpha} \\ \mu\mathbf{N}_{kx}^{\alpha} u_{kx}^{\alpha} + \mu\mathbf{N}_{ky}^{\alpha} u_{ky}^{\alpha} + (1-\mu)\mathbf{N}_{kz}^{\alpha} u_{kz}^{\alpha} \\ (1/2-\mu)(\mathbf{N}_{ky}^{\alpha} u_{kx}^{\alpha} + \mathbf{N}_{kx}^{\alpha} u_{ky}^{\alpha}) \\ (1/2-\mu)(\mathbf{N}_{kz}^{\alpha} u_{kx}^{\alpha} + \mathbf{N}_{kx}^{\alpha} u_{kz}^{\alpha}) \\ (1/2-\mu)(\mathbf{N}_{kz}^{\alpha} u_{ky}^{\alpha} + \mathbf{N}_{ky}^{\alpha} u_{kz}^{\alpha}) \end{bmatrix} \quad (25)$$

이다.

식 24 및 25에서, 식 16의 기본 체적 α 의 포텐셜 에너지 밀도 $P^{\alpha}(x, y, z)$ 는 다음의 형태이다:

$$\begin{aligned} P^{\alpha}(x, y, z) &= \frac{1}{2} (\mathbf{H}^{\alpha} \mathbf{A} \vec{u}(x, y, z), \mathbf{A} \vec{u}(x, y, z)) = \\ &= \frac{E}{2(1+\mu)(1-2\mu)} \sum_{k,l=0}^{7,7} \{ \\ &\quad ((1-\mu)\mathbf{N}_{kx}^{\alpha} u_{kx}^{\alpha} + \mu\mathbf{N}_{ky}^{\alpha} u_{ky}^{\alpha} + \mu\mathbf{N}_{kz}^{\alpha} u_{kz}^{\alpha}) \mathbf{N}_{lx}^{\alpha} u_{lx}^{\alpha} + \\ &\quad (\mu\mathbf{N}_{kx}^{\alpha} u_{kx}^{\alpha} + (1-\mu)\mathbf{N}_{ky}^{\alpha} u_{ky}^{\alpha} + \mu\mathbf{N}_{kz}^{\alpha} u_{kz}^{\alpha}) \mathbf{N}_{ly}^{\alpha} u_{ly}^{\alpha} + \\ &\quad (\mu\mathbf{N}_{kx}^{\alpha} u_{kx}^{\alpha} + \mu\mathbf{N}_{ky}^{\alpha} u_{ky}^{\alpha} + (1-\mu)\mathbf{N}_{kz}^{\alpha} u_{kz}^{\alpha}) \mathbf{N}_{lz}^{\alpha} u_{lz}^{\alpha} + \\ &\quad (1/2-\mu)(\mathbf{N}_{ky}^{\alpha} u_{kx}^{\alpha} + \mathbf{N}_{kx}^{\alpha} u_{ky}^{\alpha})(\mathbf{N}_{ly}^{\alpha} u_{lx}^{\alpha} + \mathbf{N}_{lx}^{\alpha} u_{ly}^{\alpha}) + \\ &\quad (1/2-\mu)(\mathbf{N}_{kz}^{\alpha} u_{kx}^{\alpha} + \mathbf{N}_{kx}^{\alpha} u_{kz}^{\alpha})(\mathbf{N}_{lz}^{\alpha} u_{lx}^{\alpha} + \mathbf{N}_{lx}^{\alpha} u_{lz}^{\alpha}) + \\ &\quad (1/2-\mu)(\mathbf{N}_{kz}^{\alpha} u_{ky}^{\alpha} + \mathbf{N}_{ky}^{\alpha} u_{kz}^{\alpha})(\mathbf{N}_{lz}^{\alpha} u_{ly}^{\alpha} + \mathbf{N}_{ly}^{\alpha} u_{lz}^{\alpha}) \} \end{aligned} \quad (26)$$

[0356] 기본 체적 α 의 연속적인 포텐셜 에너지 밀도 $P^\alpha(x, y, z)$ 는 식 26을 간단화하기 위해 기본 체적 α 의 코너 점 p_{kl}^α 의 변위에 의해 근사된다:

$$P^\alpha(x, y, z) = \sum_{k=0, l=0}^{7,7} \sum_{s=0, t=0}^{2,2} u_{ks}^\alpha p_{ks,lt}^{s,\alpha} u_{lt}^\alpha \quad (27)$$

[0357]

[0358] 여기서, 지표 $s = (0,1,2)$ 및 $t = (0,1,2)$ 는 직교 좌표 x, y and z이다. 포텐셜 에너지 행렬 p_{kl}^α 의 성분은 다음의 행렬 형태를 갖는다 (식 28):

$$p_{kl}^{s,\alpha} = \frac{E}{2(1+\mu)(1-2\mu)} \cdot \begin{bmatrix} \mu_1 N_{kx}^\alpha N_{lx}^\alpha + \mu_2 N_{ky}^\alpha N_{ly}^\alpha + \mu_2 N_{kz}^\alpha N_{lz}^\alpha & \mu N_{ky}^\alpha N_{lx}^\alpha + \mu_2 N_{kx}^\alpha N_{ly}^\alpha & \mu N_{kz}^\alpha N_{lx}^\alpha + \mu_2 N_{kx}^\alpha N_{lz}^\alpha \\ \mu N_{kx}^\alpha N_{ly}^\alpha + \mu_2 N_{ky}^\alpha N_{lx}^\alpha & \mu_2 N_{kx}^\alpha N_{lx}^\alpha + \mu_1 N_{ky}^\alpha N_{ly}^\alpha + \mu_2 N_{kz}^\alpha N_{lz}^\alpha & \mu N_{kz}^\alpha N_{ly}^\alpha + \mu_2 N_{ky}^\alpha N_{lz}^\alpha \\ \mu N_{kx}^\alpha N_{lz}^\alpha + \mu_2 N_{kz}^\alpha N_{lx}^\alpha & \mu N_{ky}^\alpha N_{lz}^\alpha + \mu_2 N_{kz}^\alpha N_{ly}^\alpha & \mu_2 N_{kx}^\alpha N_{lx}^\alpha + \mu_2 N_{ky}^\alpha N_{ly}^\alpha + \mu_1 N_{kz}^\alpha N_{lz}^\alpha \end{bmatrix}$$

[0359]

[0360] 여기서, $\mu_1 = (1-\mu)$ 이고, $\mu_2 = (1/2-\mu)$ 이다.

[0361] 식 28의 행렬에서 모든 피가수(summand)는 형태의 곱 $N_{ks}^\alpha N_{lt}^\alpha$ 을 포함한다. 식 23을 사용하여, 직육면체 α 의 하나의 예지에 따른 이들 항의 적분은 다음과 같이 표현될 수 있다:

$$\int_{-m_s^\alpha}^{m_s^\alpha} (m_s^\alpha + q_k^s s^\alpha) ds^\alpha = 2m_s^{\alpha^2} \quad (29)$$

[0362]

$$\int_{-m_s^\alpha}^{m_s^\alpha} (m_s^\alpha + q_k^s s^\alpha)(m_s^\alpha + q_l^s s^\alpha) ds^\alpha = 2m_s^{\alpha^3} (1 + q_k^s q_l^s / 3) = 2m_s^{\alpha^3} q_{kl}^s \quad (30)$$

[0363]

[0364] 여기서,

$$q_{kl} = q_{kl}^x q_{kl}^y q_{kl}^z \quad (31)$$

[0365]

[0366] 및

$$q_{kl}^s = (1 + q_k^s q_l^s / 3) \quad (32)$$

[0367]

[0368] 식 29 내지 32의 결과, $s=t$ 의 경우에 기본 체적 α 의 체적에 걸친 코너 점의 좌표의 부분 도함수가 적분된다 (식 33):

$$\int_{V^\alpha} N_{ks}^\alpha N_{ls}^\alpha dx^\alpha dy^\alpha dz^\alpha = 8N^{\alpha^2} q_k^s q_l^s \frac{(m_x^\alpha m_y^\alpha m_z^\alpha)^3}{m_s^{\alpha^2}} \frac{q_{kl}}{q_{kl}^s} = \frac{m_x^\alpha m_y^\alpha m_z^\alpha}{8m_s^{\alpha^2}} q_k^s q_l^s \frac{q_{kl}}{q_{kl}^s}$$

[0369]

[0370] 및 $s \neq t$ 에 대해서 (식 34):

$$\int_{V^\alpha} N_{ks}^\alpha N_{lt}^\alpha dx^\alpha dy^\alpha dz^\alpha = 8N^{\alpha^2} q_k^s q_l^t \frac{(m_x^\alpha m_y^\alpha m_z^\alpha)^3}{m_s^\alpha m_t^\alpha} \frac{q_{kl}}{q_{kl}^s q_{kl}^t} = \frac{m_x^\alpha m_y^\alpha m_z^\alpha}{8m_s^\alpha m_t^\alpha} q_k^s q_l^t \frac{q_{kl}}{q_{kl}^s q_{kl}^t}$$

[0371]

[0372] 기본 체적 α 에 기입된 픽셀이 차지하는 체적이 무시될 수 있고 픽셀은 광학 소자 또는 웨이퍼의 강성에 현저한

영향을 미치지 않는 것으로 가정한다. 따라서, 영률 $E(x, y, z)$ 및 포아송 비 $\mu(x, y, z)$ 는 기본 체적 α 내의 위치에 의존하지 않는다. 광학 소자 또는 웨이퍼에 픽셀을 도입한 후의 포텐셜 에너지 분포는 기본 체적 α 의 코너 점들의 변위 값에 대한 제곱의 형태로서 제시될 수 있다. 식 29 내지 34를 이용하여 기본 체적 α 에 대한 포텐셜 에너지 분포를 적분하면 식 34가 얻어진다:

$$P_{ks,lt}^{g,\alpha} = \frac{Em_x^\alpha m_y^\alpha m_z^\alpha q_{kl}}{16(1+\mu)(1-2\mu)} \cdot \left(\mu_2 \left(\frac{q_k^x q_l^x}{m_x^\alpha m_x^\alpha q_{kl}^x} + \frac{q_k^y q_l^y}{m_y^\alpha m_y^\alpha q_{kl}^y} + \frac{q_k^z q_l^z}{m_z^\alpha m_z^\alpha q_{kl}^z} \right) \delta_{st} + \frac{q_k^s q_l^t}{m_s^\alpha m_t^\alpha} \left((\mu_1 - \mu_2) \delta_{st} + \frac{(\mu + \mu_2)}{q_{kl}^s} (1 - \delta_{st}) \right) \right)$$

상술한 가정에 따르면, 포텐셜 행렬 $P_{ks,lt}^{g,\alpha}$ 의 요소는 기본 체적 α 에서 기입 픽셀의 양 및 유형에 의존하지 않는다.

광학 소자 또는 웨이퍼에 픽셀이 기입된 후에 모든 기본 체적 α 은 단독으로 새로운 평형 상태를 가지는 것으로 가정한다. 이 가정은 본 출원에서 제시되는 단순화된 접근 방법의 핵심 문장이다. 식 16 및 27은, 기본 체적 α 의 변형이 방해받지 않는 상태에서 시작한다는 가정에서 도출된다. 광학 소자 또는 웨이퍼에 픽셀을 도입한 뒤 기본 체적 α 의 코너 점의 평형 좌표는 w_{ki}^α 로 불린다. 대칭의 이유에서, 기본 체적 α 의 원래의 또는 변형되지 않은 상태로부터 체적 변형 u_{ki}^α 에 의해 표현된 새로운 평형 상태 w_{ki}^α 로의 변형의 결과 생긴 포텐셜 에너지의 변화는, 새로운 평형 상태 w_{ki}^α 로부터 원래의 또는 변형되지 않은 상태로의 변형에 기인하는 수정과 반대인 것이 분명하다.

모든 기본 체적 α 이 광학 소자에 픽셀을 기입한 후 새로운 평형 형상을 갖는다는 사실로부터, 포텐셜 에너지에 대한 표현에서, 원래의 또는 변형되지 않은 상태로부터 기본 체적 α 의 체적 변형을 카운트하는 것이 필요하다. 원래의 또는 변형되지 않은 상태로부터 새로운 평형 위치로의 변형의 정의, 혹은 그 반대를 위해서, 포텐셜 에

$$P^\alpha(x, y, z) = \sum_{k,l=0}^{7,7} \sum_{s,t=0}^{2,2} (u_{ks}^\alpha - w_{ks}^\alpha) P_{ks,lt}^{g,\alpha} (u_{lt}^\alpha - w_{lt}^\alpha)$$

너지 밀도의 식 27은 다음과 같이 변환된다:

(35)

전체 광학 소자의 포텐셜 에너지는 모든 기본 체적 α 의 합이다:

$$P = \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} P^\alpha(x, y, z) = \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{k=0, l=0}^{7,7} \sum_{s=0, t=0}^{2,2} (u_{ks}^\alpha - w_{ks}^\alpha) P_{ks,lt}^{g,\alpha} (u_{lt}^\alpha - w_{lt}^\alpha)$$

상기 라그랑주 변분 원리(Lagrange variational principle)는 물체의 평형 위치에서의 포텐셜 에너지가 최소인 것을 서술한다. 또한, 모든 변위를 통한 임의의 부분 변화가 제로와 같다. 이 결과, 식 36에 대해서 선형 식의 시스템에서:

$$\delta P / \delta \xi_i = 0$$

노드들 ξ_i 의 모든 좌표에 대해서, 식 12에 따르면, 각각의 내부 노드 좌표 ξ_i 는 모든 인접 노드들에 구성 요소에서 8번 제시된다. 이하에서, 노드들은 왼쪽에서 오른쪽으로(x-방향), 그 다음 아래에서 위로 로우로(y-방

향) 및 마지막으로 아래에서 위로 면으로(z-방향) 계산된다. 또한, 기본 체적 α 의 코너 점의 좌표가 다음의 방식으로 계수된다:

$$\xi_{3\alpha+0} = u_{0x}^\alpha, \xi_{3\alpha+1} = u_{0y}^\alpha, \xi_{3\alpha+2} = u_{0z}^\alpha \quad (38), \text{ 그리고, 다음 식은 노드 아이덴티티(identity) 또는 스티칭 조건(stitching condition)을 제시한다.}$$

식 39:

$$\begin{aligned} u_{0x}^\alpha &= -u_{1x}^{\alpha-1} = u_{2x}^{\alpha-K_x} = -u_{3x}^{\alpha-K_x-1} = u_{4x}^{\alpha-K_x \cdot M_y} = -u_{5x}^{\alpha-K_x L_y-1} = u_{6x}^{\alpha-K_x L_y-L_x} = -u_{7x}^{\alpha-K_x L_y-K_x-1} \\ u_{0y}^\alpha &= u_{1y}^{\alpha-1} = -u_{2y}^{\alpha-L_y} = -u_{3y}^{\alpha-L_y-1} = u_{4y}^{\alpha-L_y M_z} = u_{5y}^{\alpha-L_y M_z-1} = -u_{6y}^{\alpha-L_y M_z-L_y} = -u_{7y}^{\alpha-L_y M_z-L_y-1} \\ u_{0z}^\alpha &= -u_{1z}^{\alpha-1} = u_{2z}^{\alpha-M_z} = -u_{3z}^{\alpha-M_z-1} = u_{4z}^{\alpha-M_z K_x} = -u_{5z}^{\alpha-M_z K_x-1} = u_{6z}^{\alpha-M_z K_x-M_z} = -u_{7z}^{\alpha-M_z K_x-M_z-1} \end{aligned}$$

K_x , L_y 및 M_z 은 각각 x-방향(로우), y-방향(칼럼) 및 z-방향(면)으로 광학 소자에서 기본 체적 α 의 최대 수이다.

내부 노드 ξ_i 의 좌표와 기본 체적 α 의 코너 점의 변위를 연결시키는 계산 행렬 $Q_{ks,i}^\alpha$ 이 도입된다:

$$u_{ks}^\alpha = \sum_{i=1}^{3 \cdot (K_x+1) \cdot (L_y+1) \cdot (M_z+1)} Q_{ks,i}^\alpha \xi_i \quad (40)$$

식 40의 계산을 사용하여, 식 36의 선형 시스템의 모든 구성 요소가 표현될 수 있다:

$$\sum_m^{3 \cdot (K_x+1) \cdot (L_y+1) \cdot (M_z+1)} P_{nm}^g \xi_m - \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{l=0}^7 \sum_{t=0}^2 P_{nl\alpha}^w w_{lt}^\alpha = 0 \quad (41)$$

여기서, P_{nm}^g 는 다음과 같다:

$$P_{nm}^g = \sum_{k=0, l=0}^{7,7} \sum_{s=0, t=0}^{2,2} \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} Q_{ks,n}^\alpha P_{ks,lt}^{g,\alpha} Q_{lt,m}^\alpha \quad (42)$$

그리고, 새로운 셀 평형 위치 $P_{nl\alpha}^w$ 와 관련된 포텐셜 행렬의 일부는 다음과 같다:

$$P_{nl\alpha}^w = \sum_{k=0}^7 \sum_{s=0}^2 Q_{ks,n}^\alpha P_{ks,lt}^{g,\alpha} \quad (43)$$

식 41은 이전 섹션에서 설명된 본 발명의 원리의 모든 다른 양태의 설명에 대한 시작점이다. 회전 및 병진 운동 대 전체 광학 소자 또는 웨이퍼의 포텐셜 에너지의 불변성으로 인해서 행렬 P_{ij}^g 의 계수가 제로인 것에 유의하는 것이 중요하다. 광학 소자 또는 웨이퍼의 병진 운동 및 회전에 대해서 조건을 추가함으로써 이 조건은 자

동적으로 만족된다. 이것은, 정규화된 행렬 P_{ij}^g 의 역행렬(2차 텐서) $(P_{ij}^g)^{-1}$ 을 계산하는 것이 항상 가능한 것을 의미한다. 따라서, 식 41을 이용해서, 기본 체적 α 의 주지의 평형 변형을 위해서 광학 소자 또는 웨이퍼의 일부에 레이저 빔을 국부적으로 지향시킴으로서 생긴 변형을 계산할 수 있다. 이 관계는 다음과 같이

표현된다:

$$\xi = (P^g)^{-1} P^w w \quad (44)$$

생성된 변형을 원인이 되는 레이저 빔, 또는 보다 상세하게는, 레이저 빔의 레이저 빔 파라미터 및 기입 모드를 연결시키기 위해서, 생성된 체적 변형이 기입 모드 시그니처(또는 레이저 빔 파라미터) 및 기입 모드 밀도에 대해서 정확한 용어로 표현된다. 균일 기입은, 기본 체적 α 에서 x-, y-, 및 z-방향의 각각에서 기입 밀도가 일정한 것을 의미한다. 이미 전술한 바와 같이, 기입 밀도는 개별적으로 수정될 수 있는 3 개의 선형 밀도를 포함한다.

기본 체적 α 의 기입 밀도는 기입 모드 밀도 a^α 로도 칭한다. 통합 기입 밀도에 대해서 기본 체적 α 의 코너 점들의 좌표의 변화가 e_{li}^α 로 표시된다. 여기서, 광학 소자의 모든 기본 체적 α 에 대해서 단일 기입 모드가 사용되고 기입 밀도 a^α 만을 변화시키는 것으로 가정한다. 이것은 모든 기본 체적 α 에 대해서 동일한 레이저 빔 파라미터가 사용되고, 기입 밀도 또는 픽셀 밀도만이 변경되는 것을 의미한다. 식 44는 다음의 형태로 재작성될 수 있다:

$$\xi_n = \sum_{m=0, l=0, t=0, \alpha=1}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z, 7, 2, K_x \cdot L_y \cdot M_z} (P_{nm}^g)^{-1} P_{mlt\alpha}^w a^\alpha e_{li} \quad (45)$$

여기서, e_{li}^α 는 기본 체적 α 의 8개의 코너 점들의 24개 변위를 나타낸다.

l 과 t 에 대해서 합계를 구하고 $A_{n\alpha} = \sum_{l=0, t=0}^{7, 2} P_{mlt\alpha}^w e_{li}$ 로 표시함으로써, 식 45는 다음의 형태를 갖는다:

$$\xi_n = \sum_{m=0}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} (P_{nm}^g)^{-1} A_{m\alpha} a^\alpha \quad (46)$$

이 식은 내부 노드 ξ_i 에서의 변형이 고정 기입 모드에 대한 모든 기본 체적 α 의 기입 밀도 a^α 의 선형 조합인 것을 의미한다.

식 46은 레이저 빔의 기입이 고정 기입 모드 또는 고정 세트의 레이저 빔 파라미터 및 고정 기입 모드 밀도 a^α 로 행해지는 것으로 가정한다. 기입 모드의 변형 특성은, 통합 기입, 즉, 단일 기입 밀도 a^α 에 대해서 평형 체적 변형 e_{li} 에서 부호화된다. 실제로, 기본 체적 α 의 8개의 코너 점들에서 체적 변형의 24개 구성 성분은 18개의 독립적인 구성 성분의 함수이다. 3개의 독립 좌표를 중심으로 한 광학 소자의 기본 체적 α 의 3개의 회전뿐만 아니라, 광학 소자의 기본 체적 α 의 3개의 가상 변환은 포텐셜 에너지에 기여하지 않는다. 18개의 독립 구성 요소를 사용하여, 24개의 평형 체적 변형 e_{li} 으로부터 18 통합 벡터 n^i 의 직교 세트를 구성할 수 있다.

$$n^i = \sum_{j=1}^{24} N_{ij}^{-1} e^j N_{ij}^{-1} e^j \quad (47)$$

여기서,

$$e^j = \{e_k^j\}, \quad e_k^j = \delta_{kj} \quad (48) \text{이고,}$$

$N_{ij}^{-1} = (n^i, e^j)$ 는 기준 e^j 을 기준 n^i 으로 변환하는 행렬이다. 통합 벡터 n^i 의 직교 세트는 다음 식들을 이 행한다:

$$(n^i, n^j) = \delta_{ij} \quad (49)$$

$$(n^i, \sum_{k=0}^7 e^{3 \cdot k}) = 0, (n^i, \sum_{k=0}^7 e^{3 \cdot k+1}) = 0, (n^i, \sum_{k=0}^7 e^{3 \cdot k+2}) = 0,$$

$$(n^i, \sum_{k=0}^7 (e^{3 \cdot k+1} - e^{3 \cdot k+2})) = 0, (n^i, \sum_{k=0}^7 (e^{3 \cdot k} - e^{3 \cdot k+2})) = 0,$$

$$(n^i, \sum_{k=0}^7 (e^{3 \cdot k+1} - e^{3 \cdot k})) = 0 \quad (50)$$

이 세트의 통합 벡터에 대한 투영이 기입 모드 시그니처로 표시되고, MS로 약칭되는 기입 모드의 표시로서 사용된다. 기입 모드 시그니처는, 선택된 유형의 기입에 대해서 또한 미리 정해진 세트의 물리적 및 기하학적 특성을 갖는 레이저 빔 세트에 대해서 레이저 시스템의 기입 도구의 특성을 나타낸다.

식 37 내지 50 및 식 51의 표기를 사용하여,

$$e_{ks} = \sum_{i=0}^{17} \eta_{3 \cdot k+s,i} MS_i \quad (51)$$

식 45가 재작성될 수 있다:

$$\begin{aligned} \xi_n &= \sum_{o=0}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{k=0}^7 \sum_{s=0}^2 \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{i=0}^{17} (P_{no}^g)^{-1} P_{oks\alpha}^w a^\alpha \eta_{3k+s,i} MS_i = \\ &= \sum_{o=0}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{i=0}^{17} (P_{no}^g)^{-1} E_{oi} MS_i \end{aligned} \quad (52)$$

여기서, E_{oi} 는 다음과 같다:

$$E_{oi} = \sum_{k=0}^7 \sum_{s=0}^2 \sum_{\alpha=1}^{K_x \cdot L_y \cdot M_z} P_{oks\alpha}^w a^\alpha \eta_{3k+s,i} \quad (53)$$

식 52는 실험 데이터에서 모드 시그니처 MS_i 를 결정하는 방법을 명확히 지시한다: 선택된 기입 모드 또는 레이저 빔의 파라미터 세트를 갖는 광학 소자에 픽셀이 기입된다. 그 다음, 결과의 변위 ξ_n 가 결정된다. 마지막으로, 식 53의 역행렬이 결정된 변위 ξ_n 에 승산된다. 다음 식은 마지막 단계를 나타낸다:

$$MS_i = \sum_{o=0}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z} \sum_{n=1}^{17} (E_{io})^{-1} P_{on}^g \xi_n \quad (54)$$

이 섹션에서 이론적 개념에 대한 설명이 제공된다. 또한, 실험 데이터로부터 기입 모드 시그니처 및 기입 밀도를 결정하는 이론 또는 개념을 설명한다.

그러나, 현재 변위 ξ_n 는 제한된 정밀도로만 측정된다. 이로 인해, 역행렬 $(E_{oi})^{-1}$ 의 승산은 행렬 E_{oi} 의 제로 고

유치로 인해서 문제가 된다. 따라서, 현재, 기입 모드와 기입 모드 밀도를 결정하기 위한 변형된 접근 방법이 사용된다. 이것은 상기 제시된 이론의 제한이지만, 시간적 실험 제한이 아니다.

개념의 도출 시, 상이한 기입 모드로 인해서 광학 소자의 기본 체적 α 에 도입된 체적 변형이 추가된다. 그래서, 상이한 선택된 기입 모드가 광학 소자 또는 웨이퍼에 도입되고, 그 결합된 변위 ξ_n 가 결정된다. 결과의 변위 또는 변형 ξ_n 이, 사용된 기입 모드 m 의 합으로서 식 46으로부터 도출된다:

$$\xi_n = \sum_{o=1, \alpha=1, m=1}^{8 \cdot K_x \cdot L_y \cdot M_z, K_x \cdot L_y \cdot M_z, R} (P_{no}^g)^{-1} A_{o\alpha} a_m^\alpha \quad (55)$$

여기서, R은 식 55에서 고려되는 상이한 기입 모드의 수이다.

그래서, 모드 시그니처 MS_i 가 모든 기입 모드에 대해서 주지이면, 임의의 세트의 기입 맵 또는 기입 밀도 a_m^α 에 대해서 가져오는 변위 ξ_n 가 식 55로부터 결정될 수 있다.

광학 소자 $\phi_j^{det.}$ 의 3차원 윤곽이 위치 세트 $X_j, Y_j, Z_j, j=1, \dots, L$ 에서 결정되는 것으로 한다. 예를 들면, 3차원 윤곽이 한 세트의 위치에서 측정될 수 있다. 광학 소자의 미리 정해진 $\phi_j^{predet.}$ 위치로부터 한 세트의 위치의 편차 $\Delta\phi_j$ 가 다음에 따라서 결정될 수 있다:

$$\Delta\phi_j = \phi_j^{predet.} - \phi_j^{det.} \quad (56)$$

광학 소자에 레이저 빔을 국부적으로 지향하여 편차 $\Delta\phi_j$ 가 보정되어야 한다. 상술된 근사치에서, 광학 소자의 기본 체적 α 에 도입된 체적 변형이 모든 편차 $\Delta\phi_j$ 에 추가된다. 그러나, 변위는 광학 소자의 기본 체적 α 의 노드 ξ_i 에서만 알려져 있다. 기본 체적 α 내의 변형이 선형 동작을 나타낸다는 가정하에서, 노드 ξ_i 의 변위의 크기를 광학 소자의 3차원 윤곽의 소망의 위치 ζ_i 에서의 크기로 변환하는 매트릭스가 생성될 수 있다. 이 변환은 식 40을 사용하여 실행될 수 있다 :

$$\zeta_i = \sum_{j=1}^{3 \cdot (K_x+1) \cdot (L_y+1) \cdot (M_z+1)} M_{ij} \xi_j \quad (57)$$

여기서, ζ_i 는 위치 X_i, Y_i, Z_i 의 계산된 변위 ξ_i 의 선형 보간 또는 선형 조합의 결과이다. 매트릭스 M_{ij} 는 $L \times 3 \cdot (K_x+1) \cdot (L_y+1) \cdot (M_z+1)$ 의 차원을 가진다. 실제로, 이미 논의된 기본 체적 α 의 8개의 코너 점만을 사용하여 모든 위치가 보간되므로, 이 매트릭스는 24개의 대각 요소만을 갖는다.

따라서, 매우 짧은 레이저 펄스를 인가한 후 광학 소자 또는 웨이퍼의 선택된 위치 i 의 결과의 3차원 윤곽은 다음과 같다:

$$\Delta\phi_i + \zeta_i \quad (58)$$

미리 정해진 위치 $\phi_j^{predet.}$ 에 따라서 광학 소자 또는 웨이퍼의 결정된 위치 $\phi_j^{det.}$ 를 가져오기 위해, 기입 모드

의 파라미터가 선택되고, 목표 함수 Φ 를 최소화시키는 기입 모드 밀도/기본 체적 α 의 밀도가 식별되고, 즉, 이것을 해결되어야 한다:

[0433]
$$\min \{ \Phi(\Delta\varphi + \zeta) \} \quad (59)$$

[0434] 목표 함수 Φ 를 최소화하기 위해, 광학 소자의 미리 정해진 3차원 윤곽 $\varphi_j^{predet.}$ 에 따라서 변위 ζ_i 가 변화하여 3차원 윤곽 $\varphi_j^{det.}$ 을 결정하도록 한다.

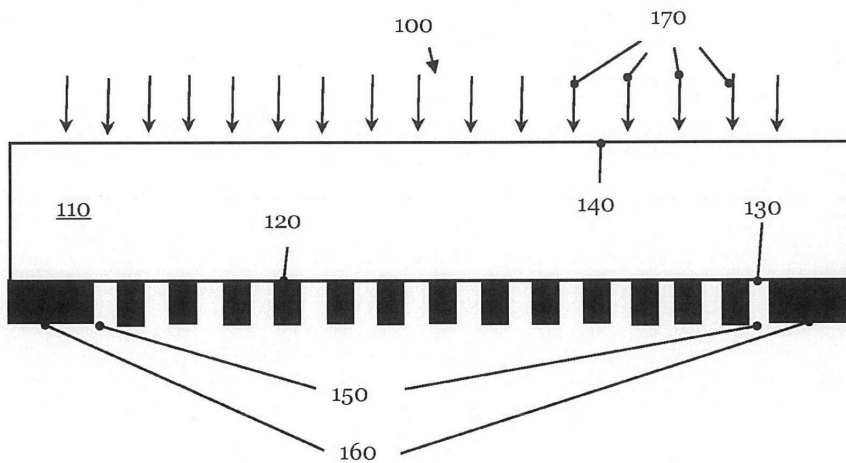
[0435] 계산 관점으로부터, 잔류 변위의 평균 제곱으로 목표 함수를 선택하는 것이 편리하며, 식 59가 다음과 같이 변환된다:

[0436]
$$\min \left\{ \sum_{i=1}^L (\Delta\varphi_i + \zeta_i)^2 + \sum_{m=1, j=1}^{R, K_x \cdot L_y \cdot M_z} \lambda_m^a a_j^{m2} \right\} \quad (60)$$

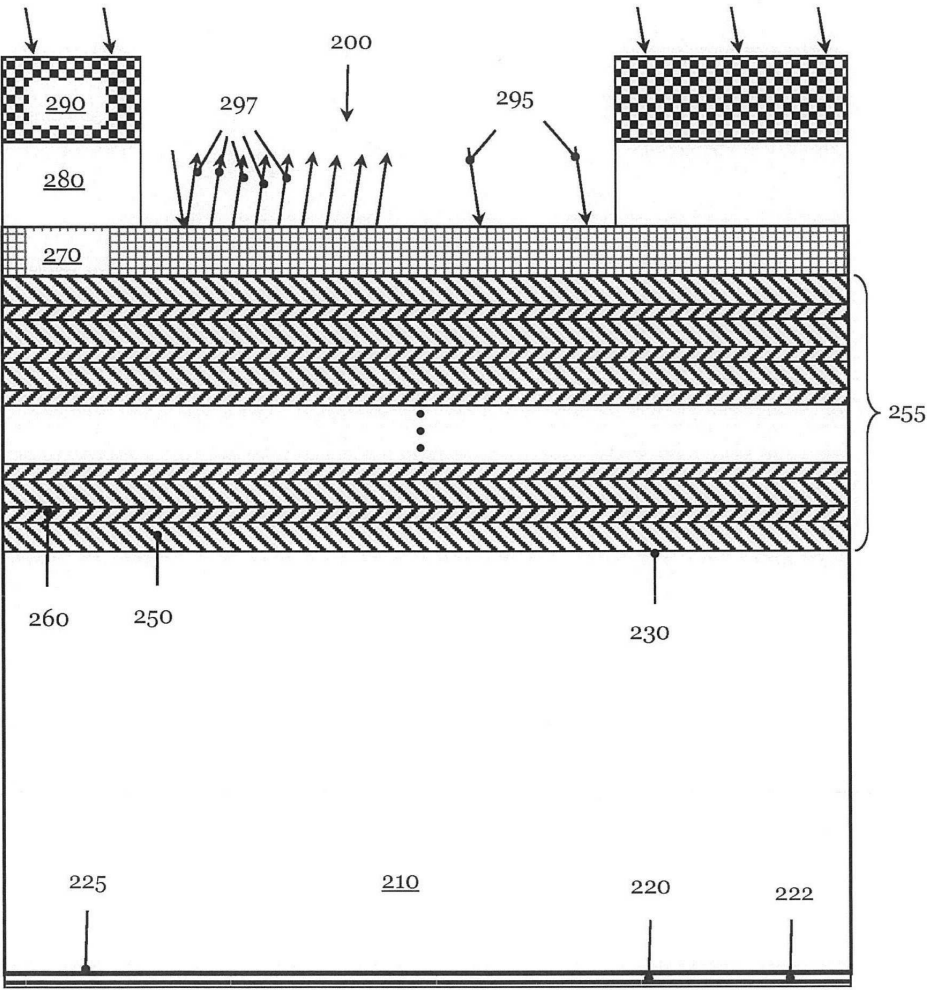
[0437] 티호 노프(Tikhonov) 정규화는, 결과가 물리적으로 합리적인 솔루션을 정의하는 것을 확인하기 위해 목표 함수 (식 60의 마지막 항)에 추가된다. 정규화 계수 λ 는 충분히 작게 선택되므로, 솔루션에 상당한 변화를 주지 않는다.

도면

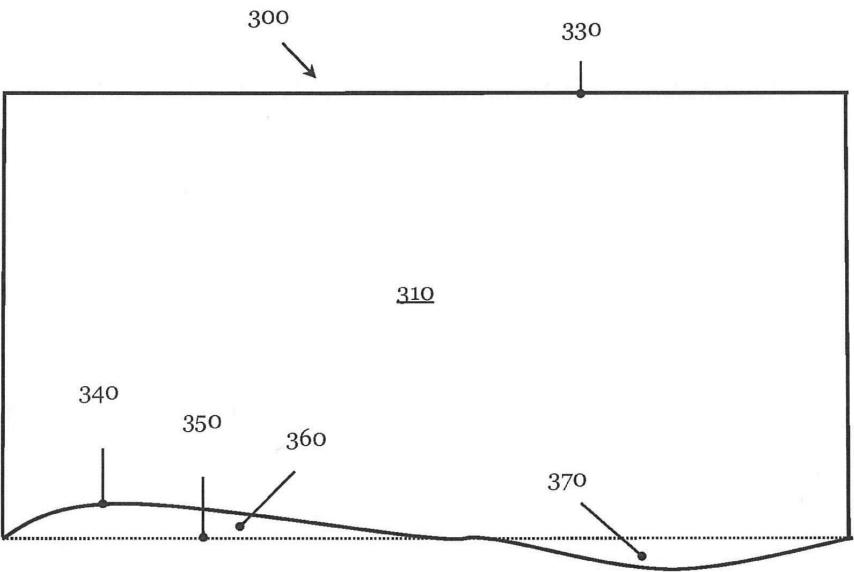
도면1



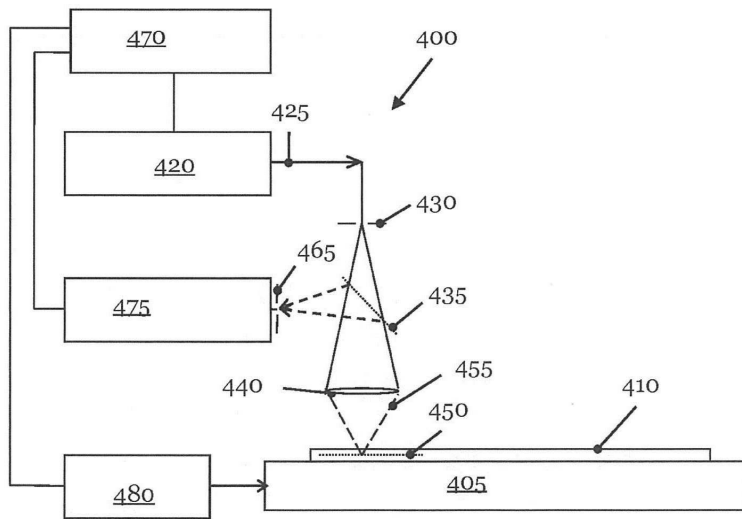
도면2



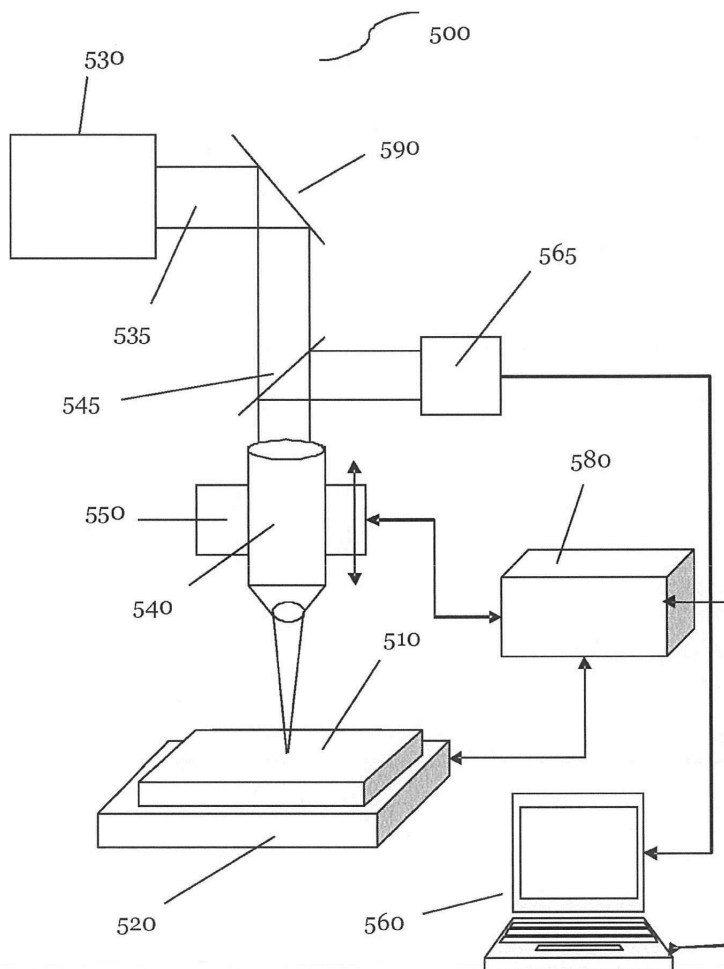
도면3



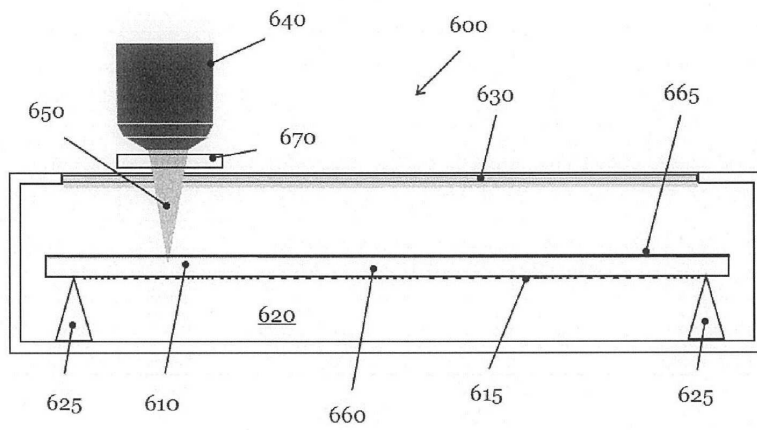
도면4



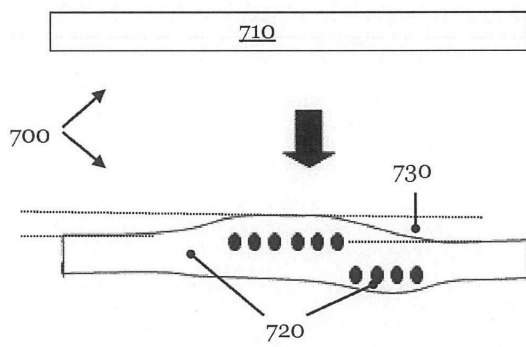
도면5



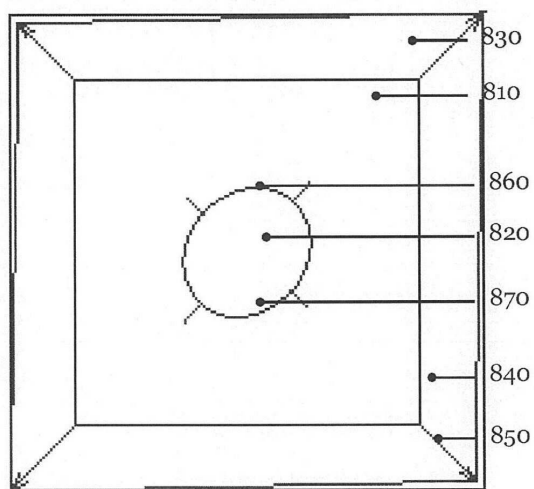
도면6



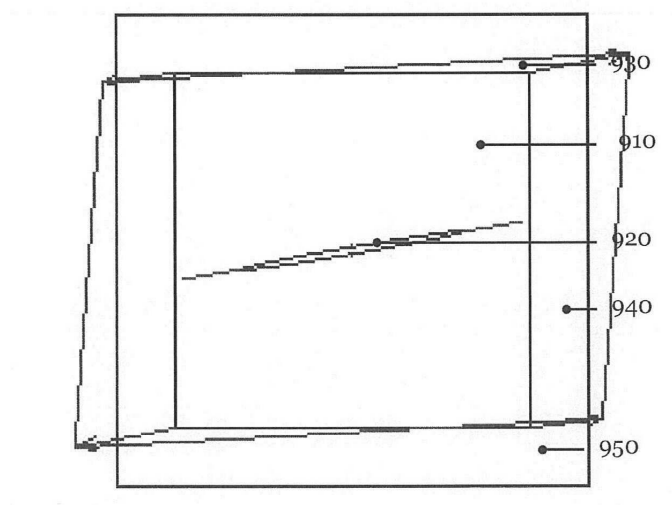
도면7



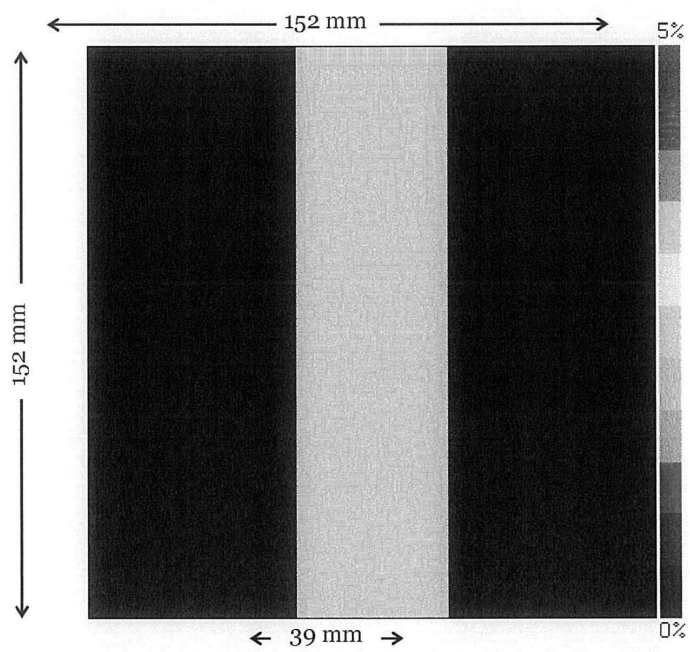
도면8



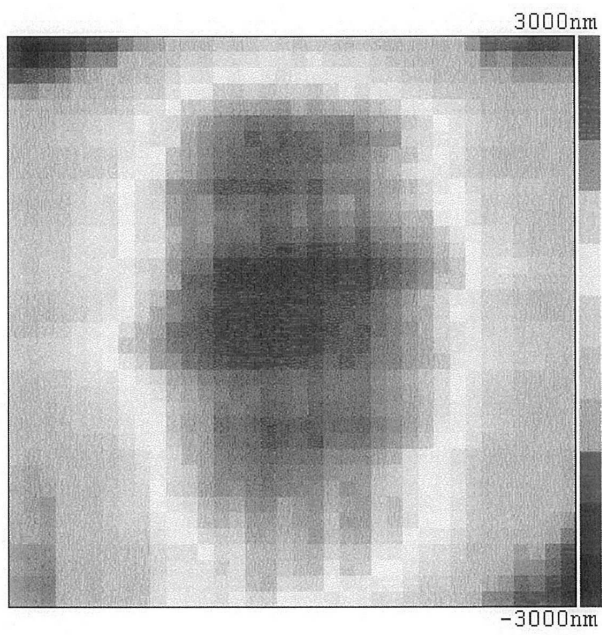
도면9



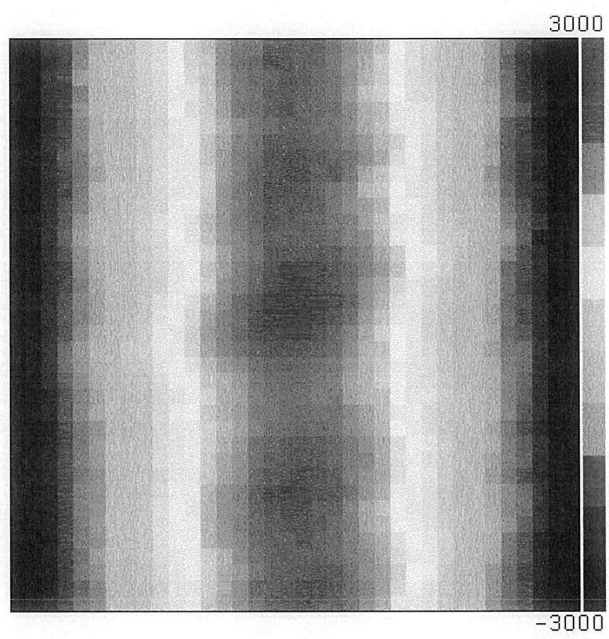
도면10



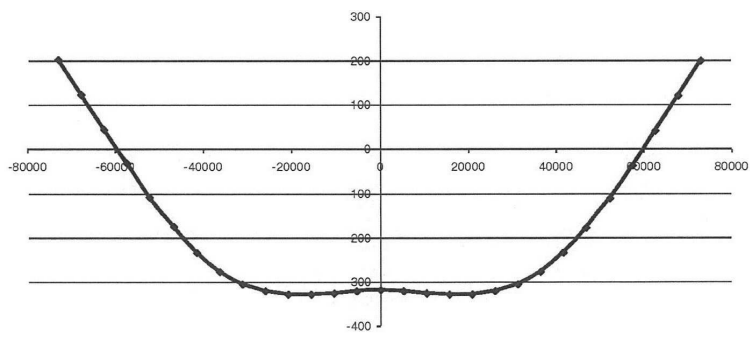
도면11



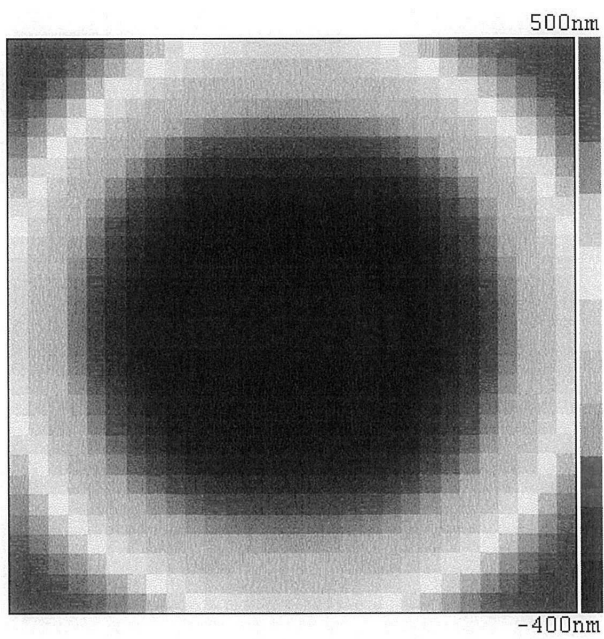
도면12



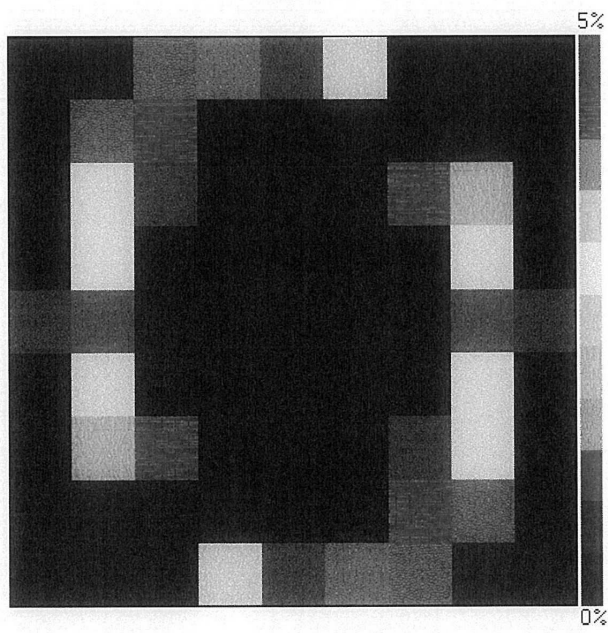
도면13



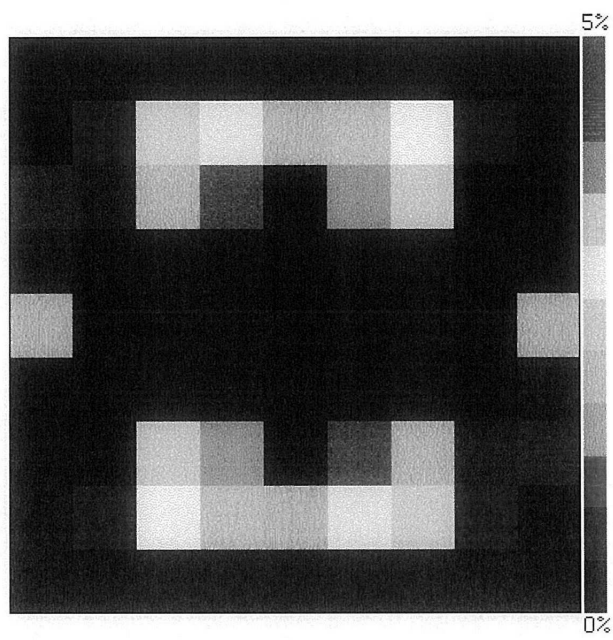
도면14



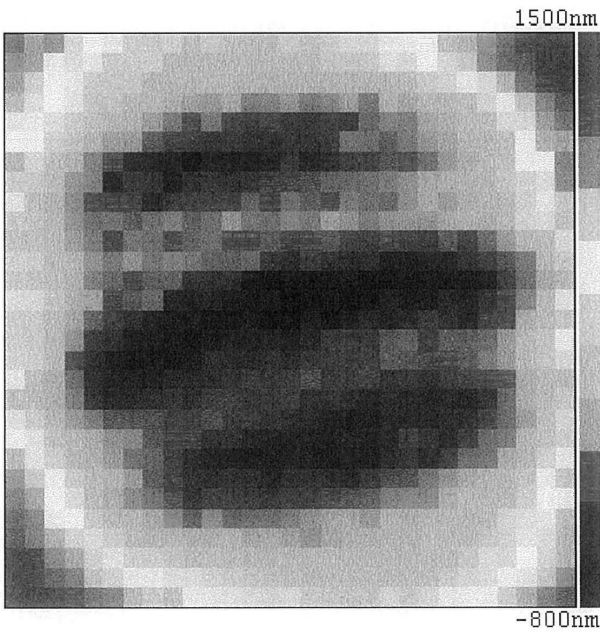
도면15



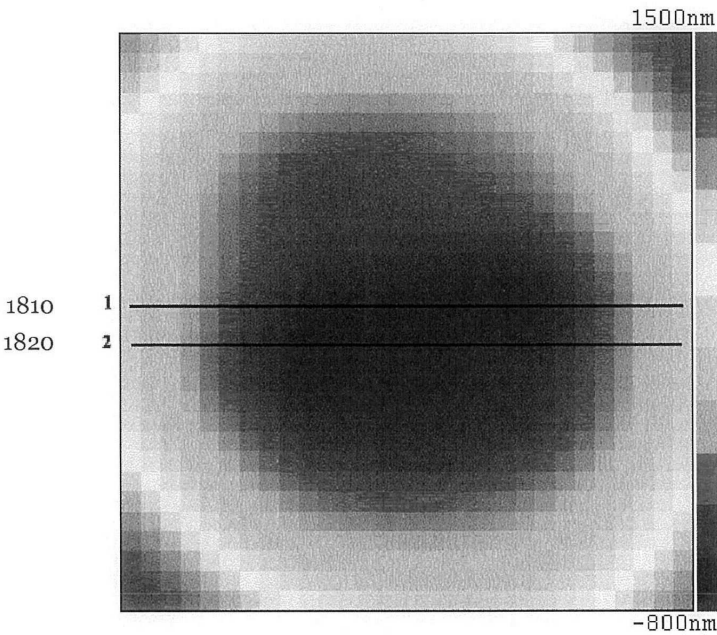
도면16



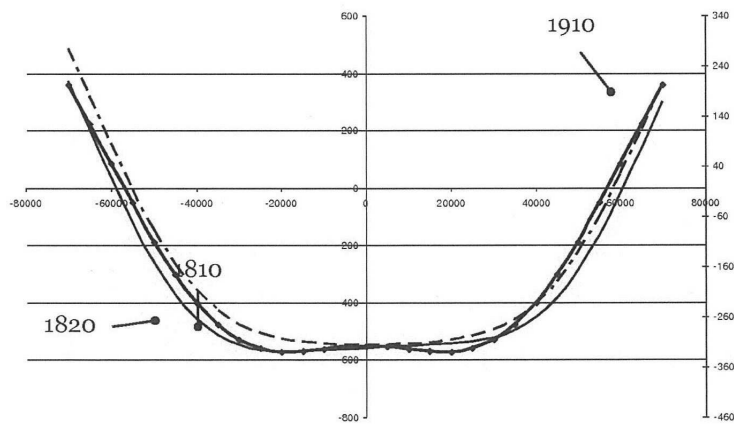
도면17



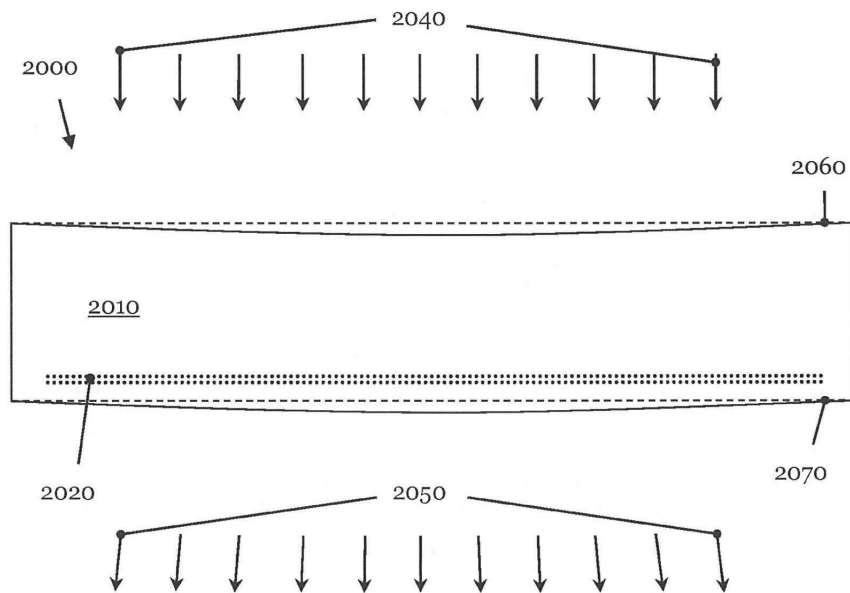
도면18



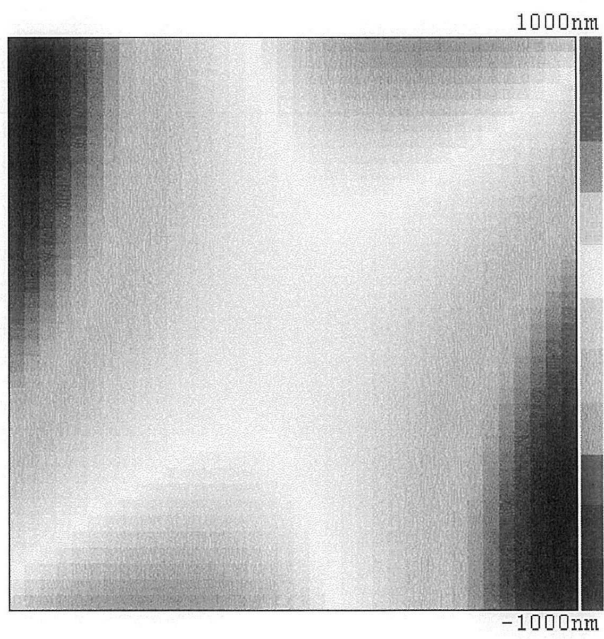
도면19



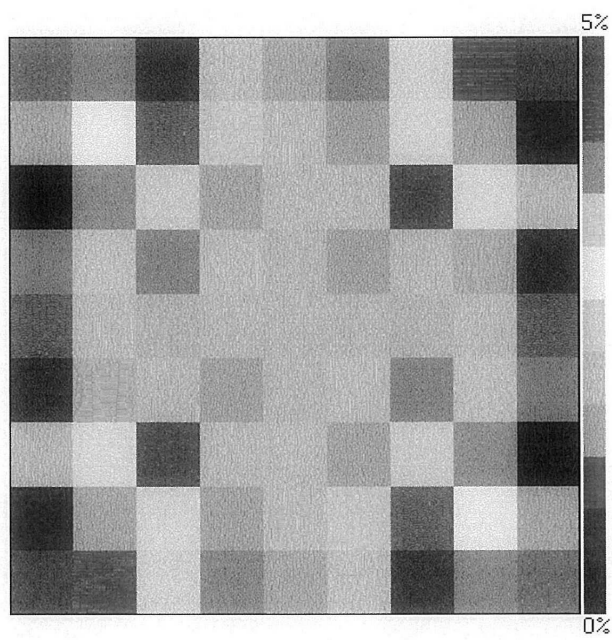
도면20



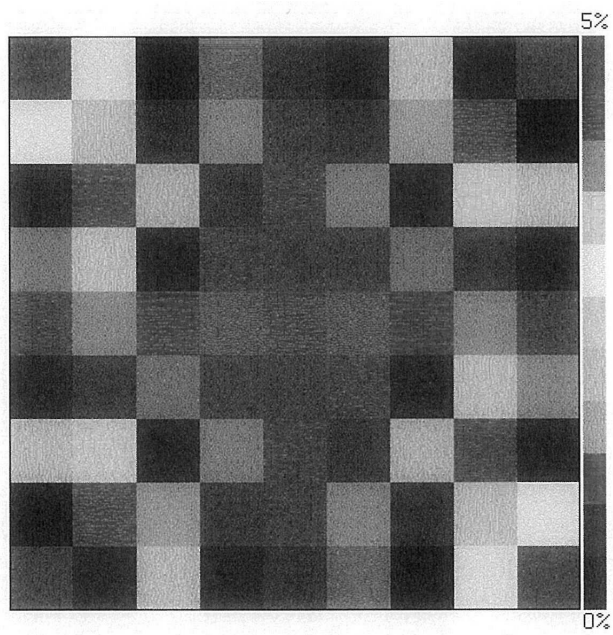
도면21



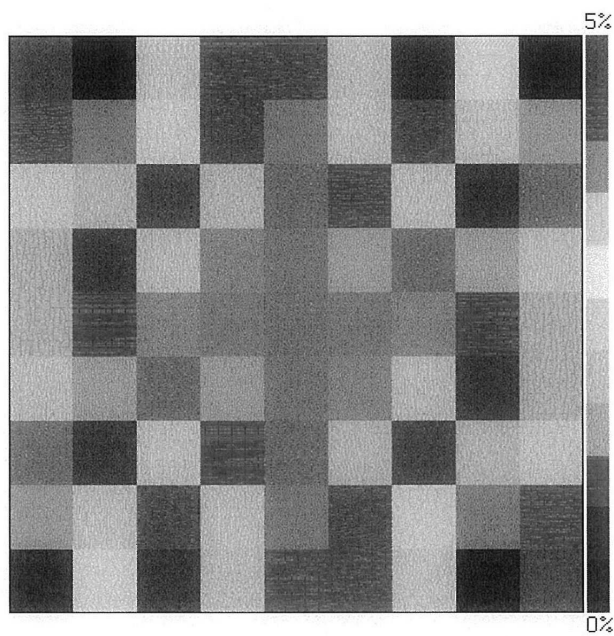
도면22



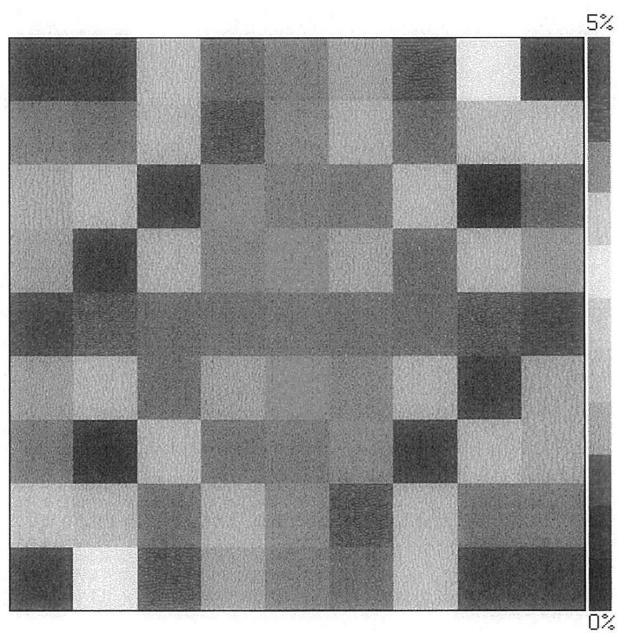
도면23



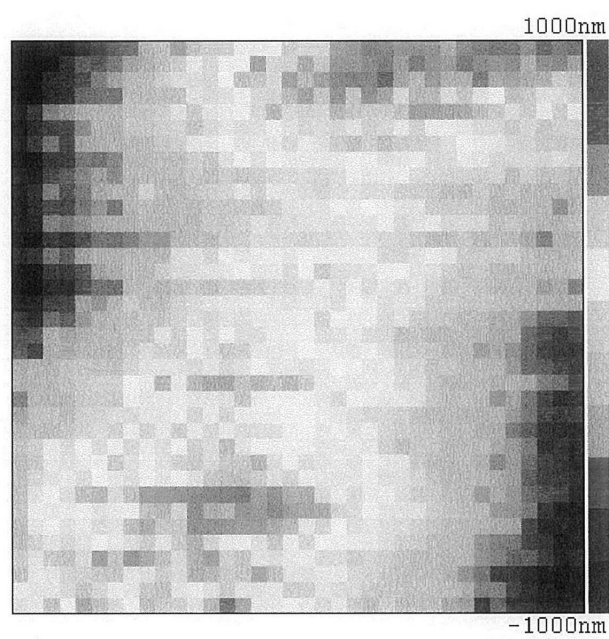
도면24



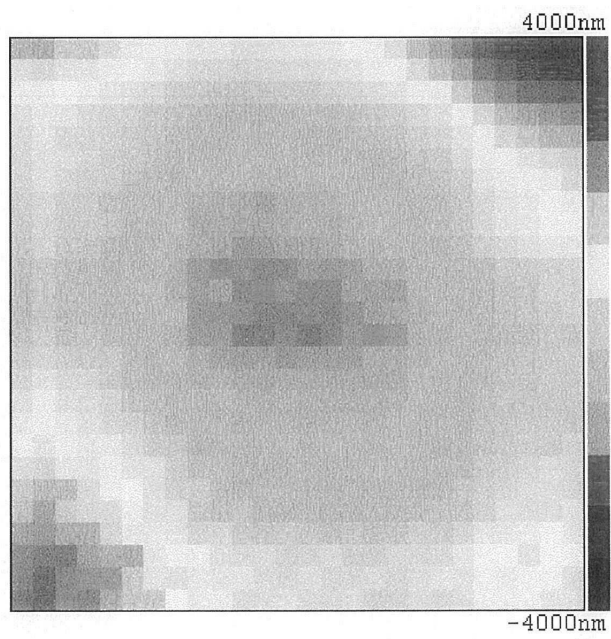
도면25



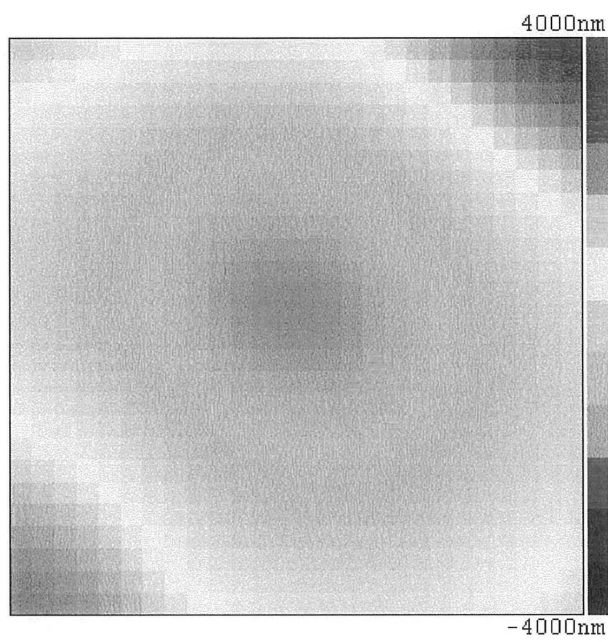
도면26



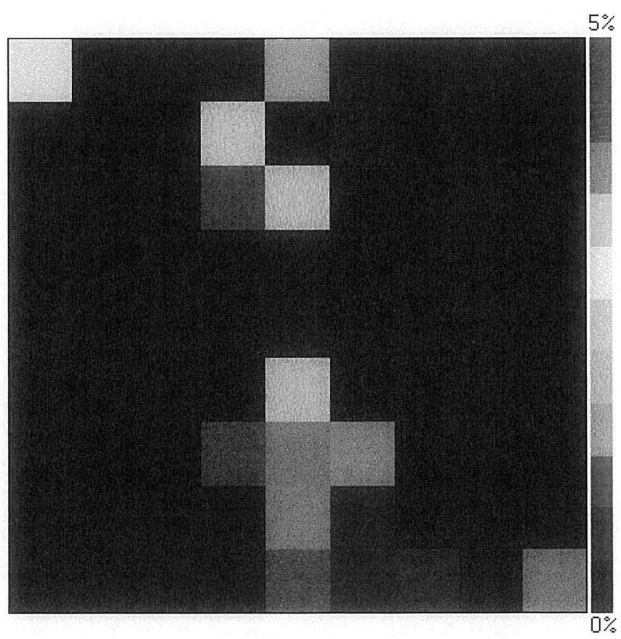
도면27



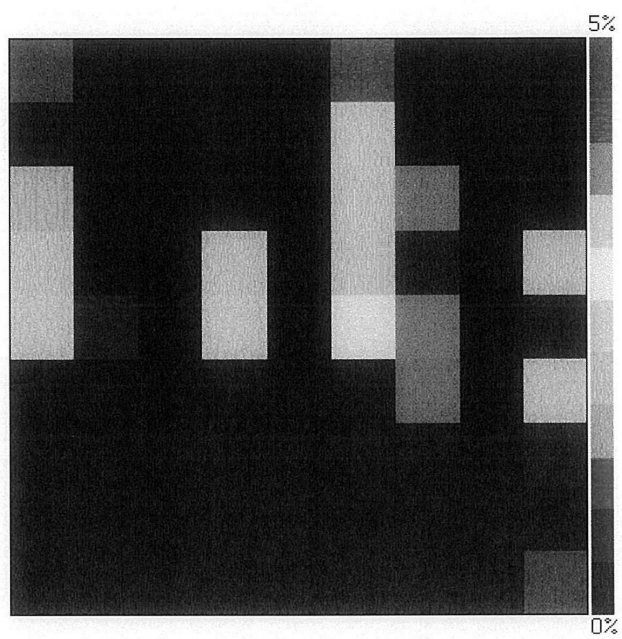
도면28



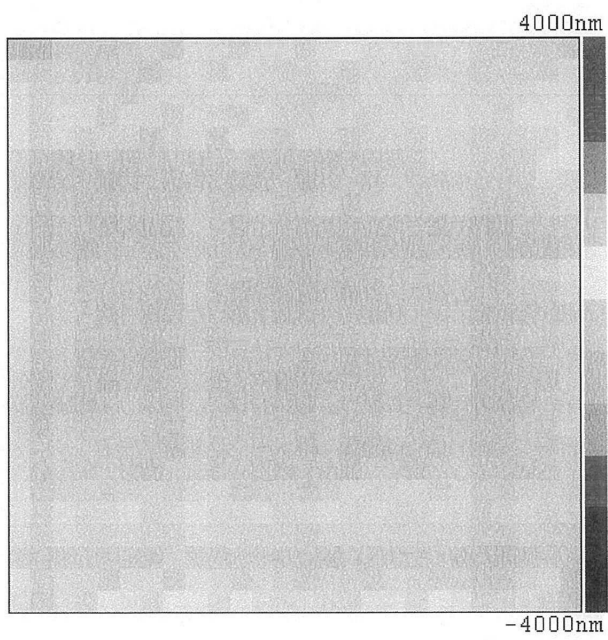
도면29



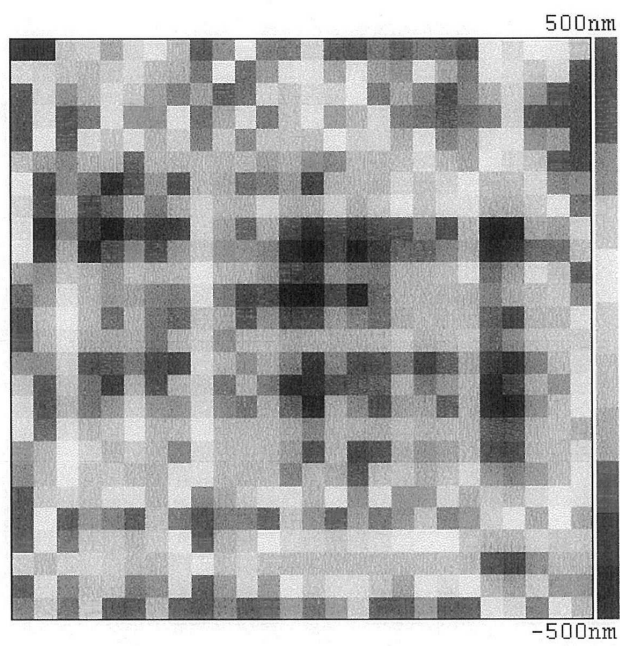
도면30



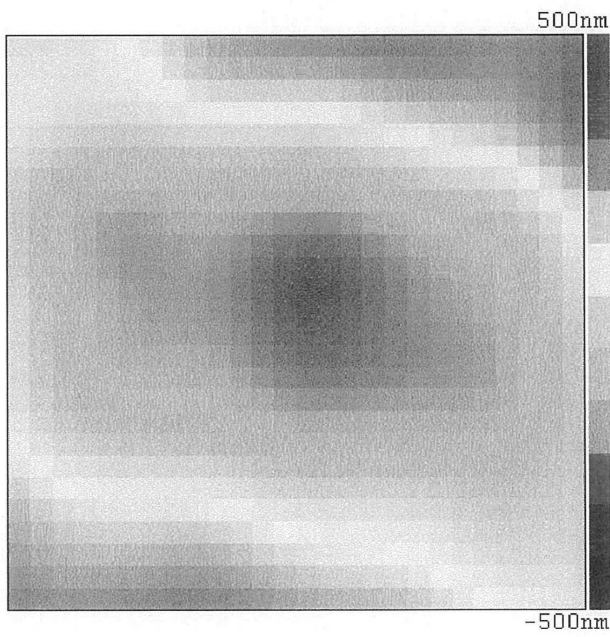
도면31



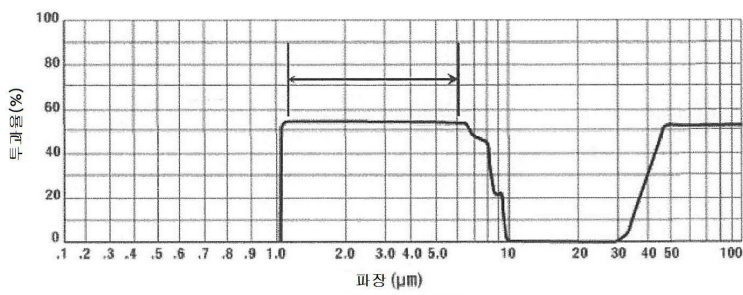
도면32



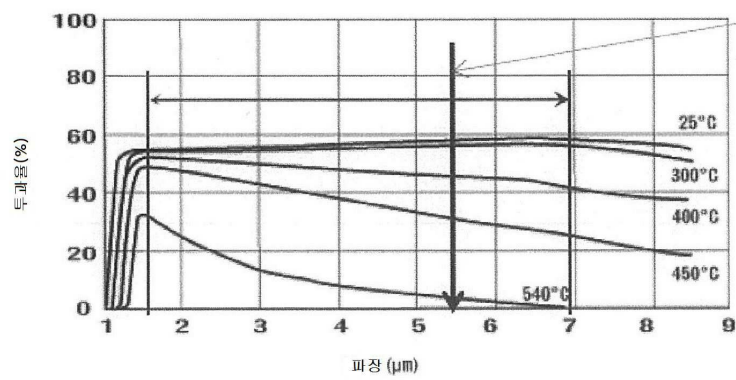
도면33



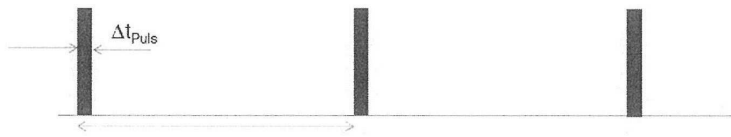
도면34



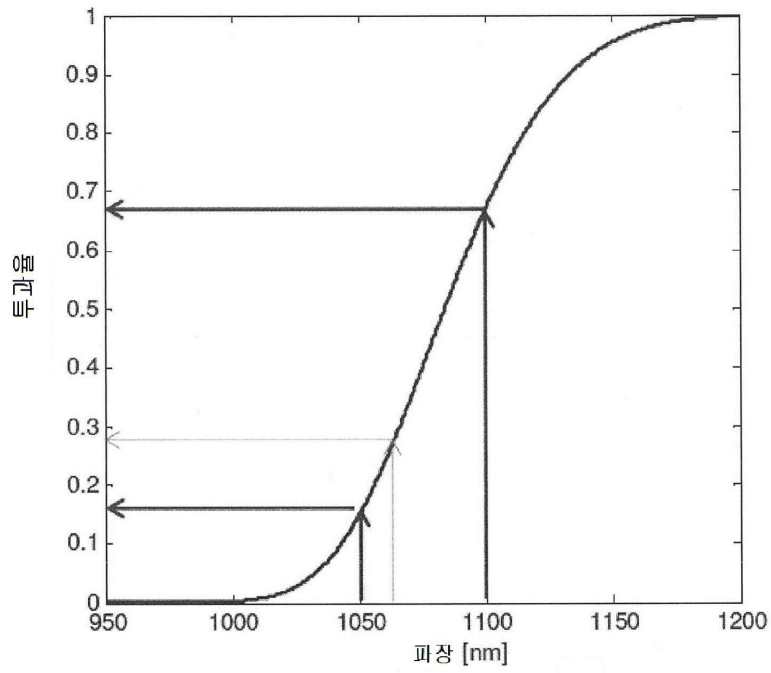
도면35



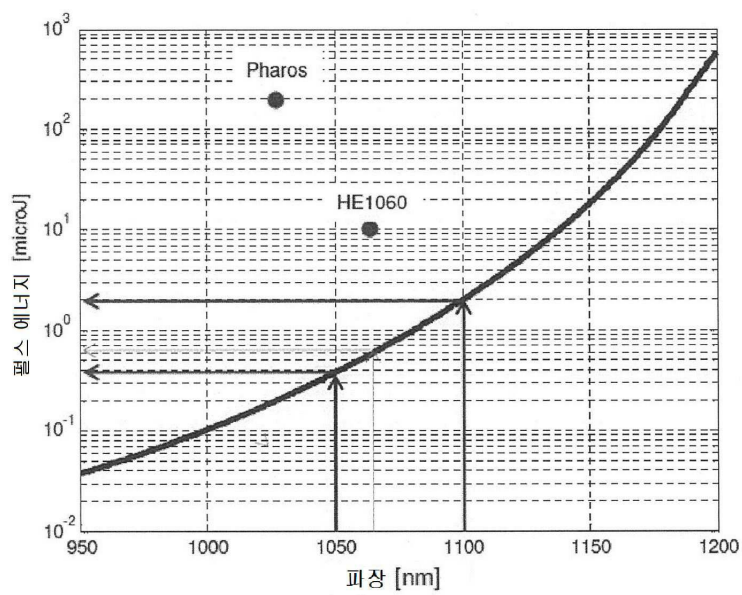
도면39



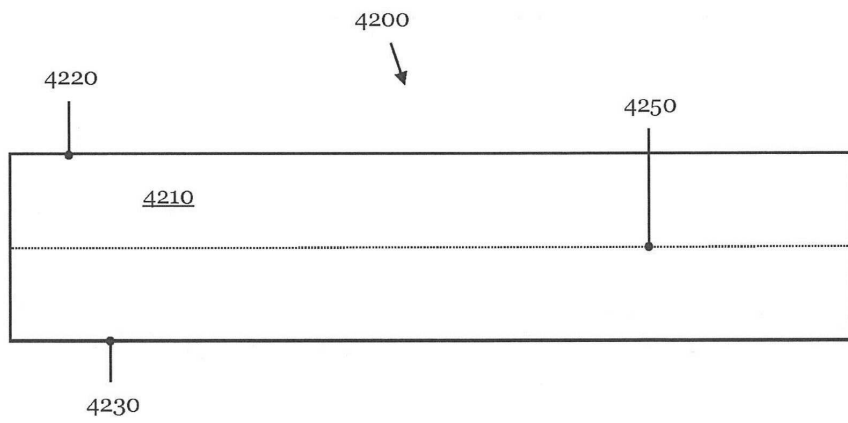
도면40



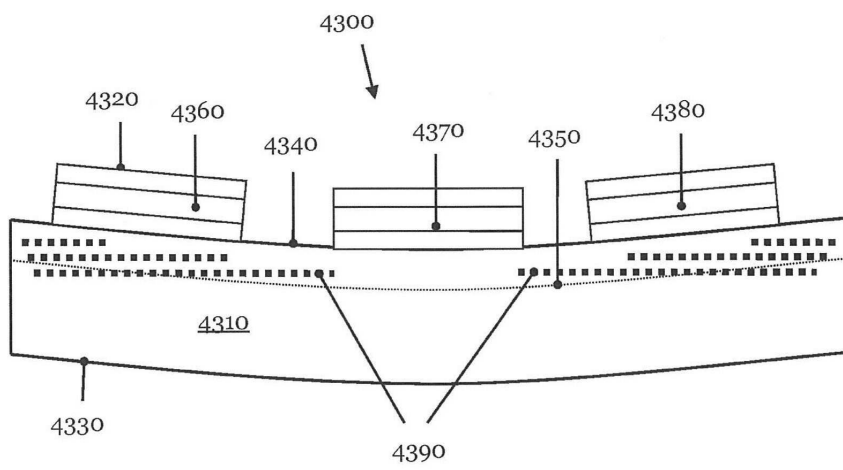
도면41



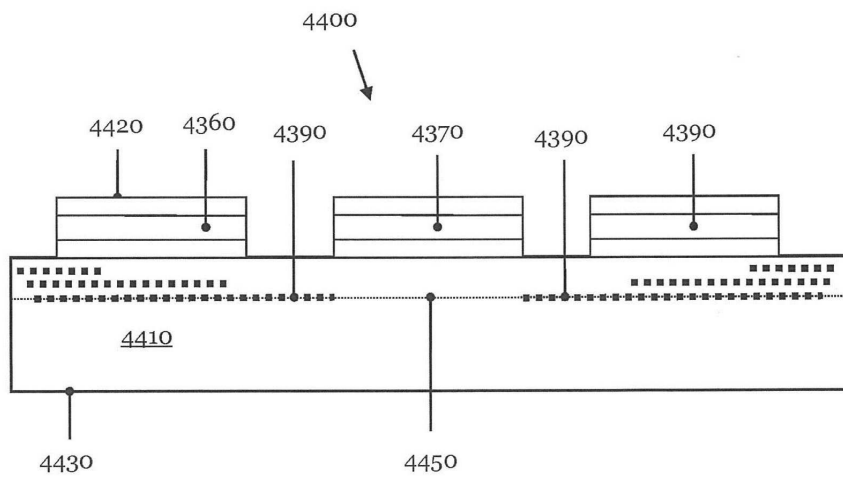
도면42



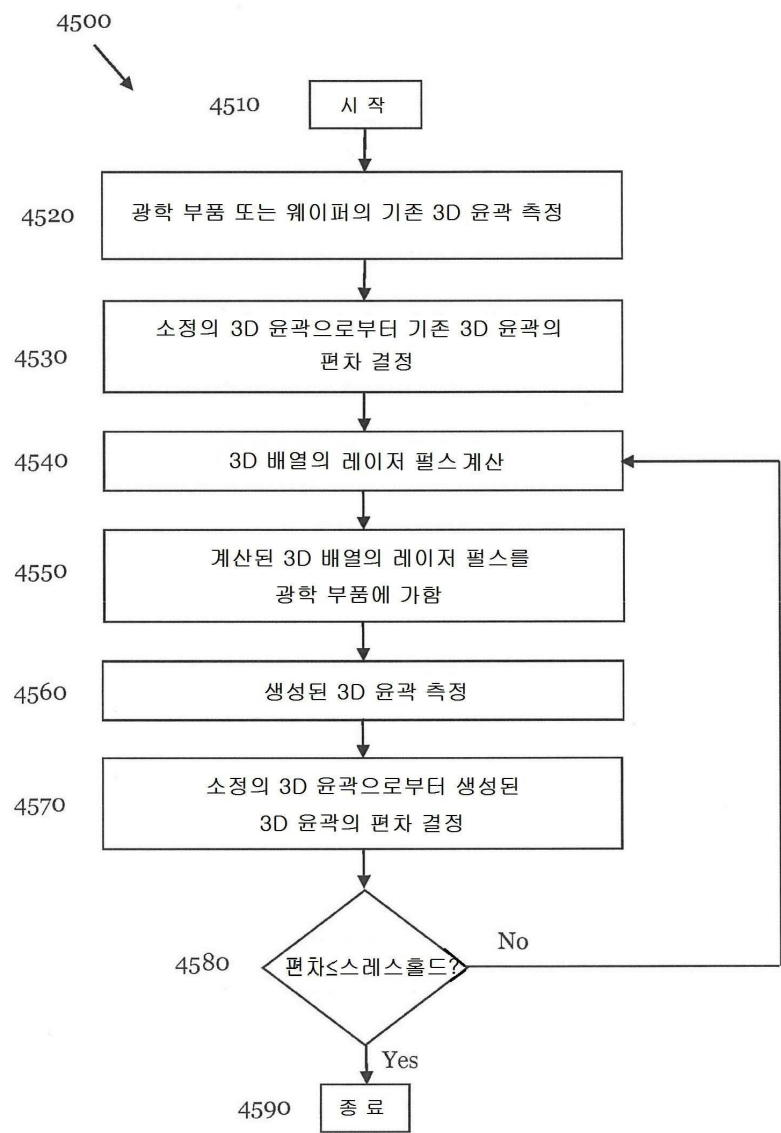
도면43



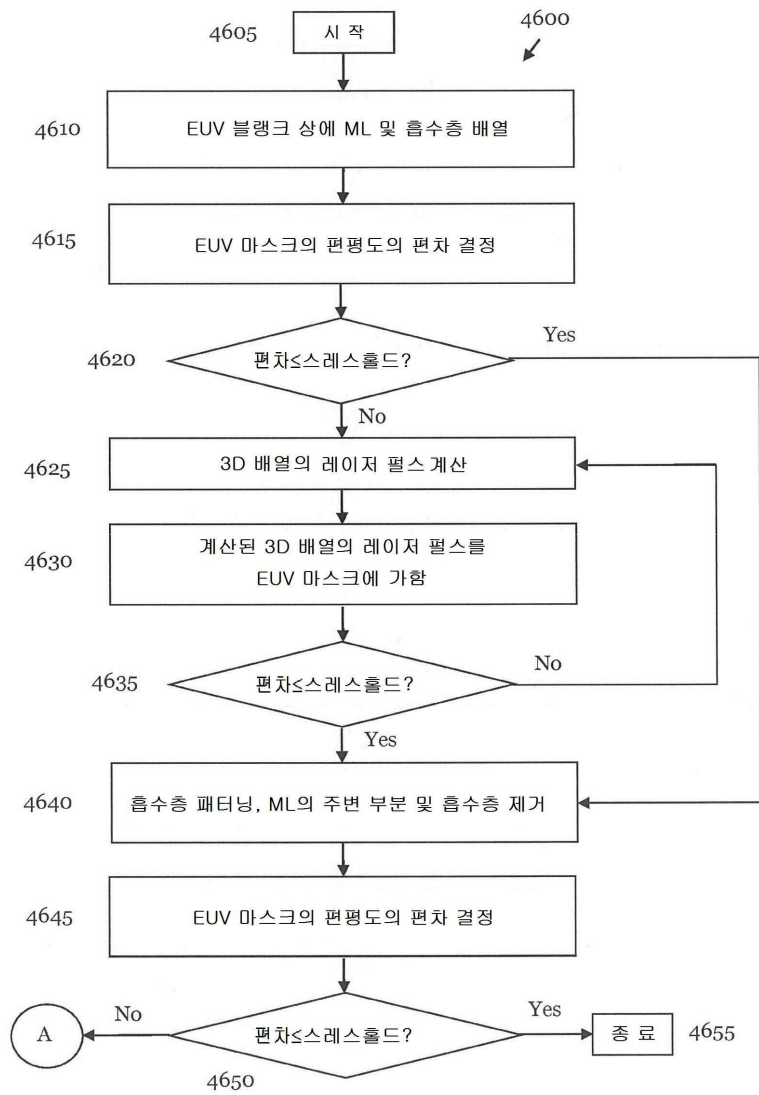
도면44



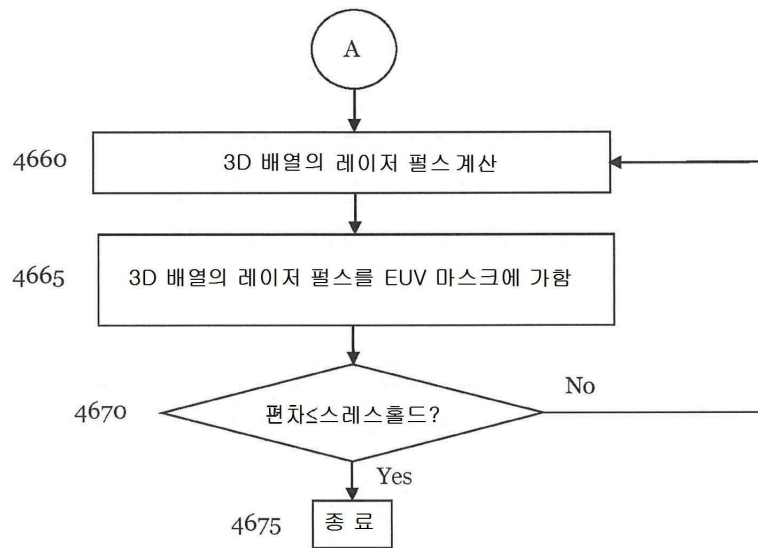
도면45



도면46a



도면46b



도면47

