



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0090967
(43) 공개일자 2020년07월29일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G02B 27/09 (2006.01) B23K 26/06 (2014.01)
B23K 26/53 (2014.01) G02B 5/18 (2006.01)
- (52) CPC특허분류
G02B 27/0944 (2013.01)
B23K 26/06 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2020-7021247(분할)
- (22) 출원일자(국제) 2015년11월19일
심사청구일자 없음
- (62) 원출원 특허 10-2017-7016685
원출원일자(국제) 2015년11월19일
심사청구일자 2017년12월13일
- (85) 번역문제출일자 2020년07월21일
- (86) 국제출원번호 PCT/EP2015/077172
- (87) 국제공개번호 WO 2016/079275
국제공개일자 2016년05월26일
- (30) 우선권주장
10 2014 116 957.3 2014년11월19일 독일(DE)
10 2014 116 958.1 2014년11월19일 독일(DE)

- (71) 출원인
트롬프 레이저-운트 시스템테크닉 게엠베하
독일 디트진겐 테-71254 요한 마우스 슈트라체 2
- (72) 발명자
쿵카르 말테
독일 99425 바이마르 암 벨드첸 10
클라이너 요나스
독일 70469 슈투트가르트 부르겐란트슈트라체 94
(뒷면에 계속)
- (74) 대리인
김태홍, 김진희

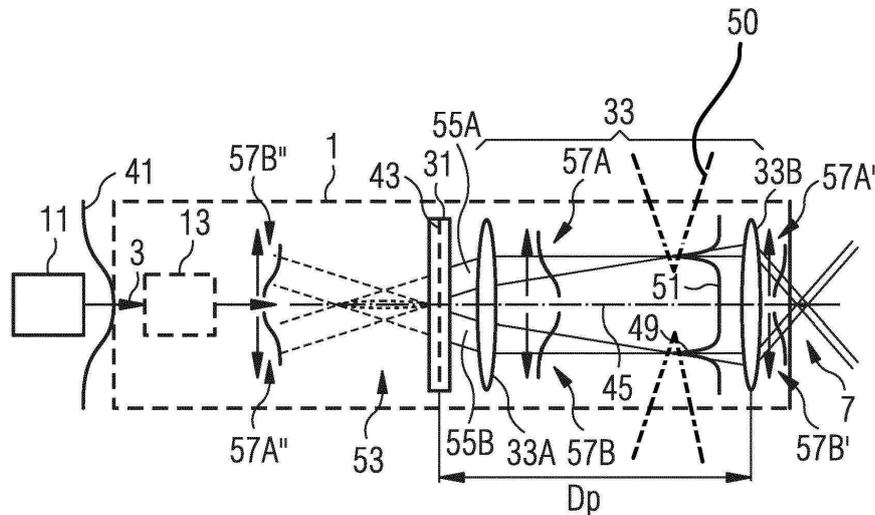
전체 청구항 수 : 총 25 항

(54) 발명의 명칭 비대칭 광학 빔 정형을 위한 시스템

(57) 요약

특히 상기 레이저 빔에 대해 상당히 투과성인 재료(9)를 재료 가공하기 위해, 비대칭 형상의 개질부가 레이저 빔의 전파 방향(5)에 대해 횡방향으로 생성된다. 이에 의해서, 레이저 빔(3)은 상기 재료(9) 내에 세장형 초점 구역(7)을 형성하도록 정형되며, 초점 구역(7)은 평탄화 방향으로 횡방향으로 평탄화되는 적어도 하나의 강도 최대값, 또는 열 방향으로 평탄화되는 비대칭 강도 최대값의 횡방향 및/또는 축방향 열을 포함하도록 구성된다. 상기 재료(9) 내에 초점 구역(7)을 위치시킨 후에, 개질부가 생성되고, 상기 재료(9) 및 초점 구역(7)은 유도된 바람직한 방향을 따라 균열을 형성하기 위해 평탄화 방향으로 또는 그것을 가로질러, 또는 열 방향으로 또는 그것을 가로질러 서로에 대해 상대 이동된다.

대표도 - 도3



(52) CPC특허분류

B23K 26/53 (2018.08)

G02B 5/1871 (2013.01)

(72) 발명자

그로스만 다니엘

독일 73079 쉬센 로젠슈트라쎄 3

플람 다니엘

독일 70469 슈투트가르트 마이바흐슈트라쎄 19

카이저 미리암

독일 71254 디쨥겐 탈슈트라쎄 17

명세서

청구범위

청구항 1

펄스형 레이저 빔(3)에 의해, 상기 레이저 빔의 전파 방향(5)에 대해 횡방향으로 비대칭 방식으로 형성되는 개질부를 생성함으로써, 상기 레이저 빔에 대해 상당히 투과성인 재료(9)를 재료 가공하기 위한 재료 가공 방법으로서,

상기 재료(9) 내에 세장형 초점 구역(7)을 형성하기 위해 상기 레이저 빔(3)을 빔 정형하는 단계로서, 상기 초점 구역(7)은 평탄화 방향으로 횡방향으로 평탄화되고, 열(sequence) 방향으로 비대칭 강도 최대값의 횡방향 열을 형성하는 복수의 강도 최대값을 포함하도록 구성되는, 단계;

상기 재료(9) 내에 상기 초점 구역(7)을 위치시키는 단계;

상기 개질부를 생성하는 단계; 및

상기 평탄화 방향으로 또는 이 평탄화 방향을 가로질러, 또는 상기 열 방향으로 또는 이 열 방향을 가로질러 상기 재료(9) 및 상기 초점 구역(7)을 서로에 대해 이동시키는 단계

를 포함하는 재료 가공 방법.

청구항 2

제1항에 있어서, 적어도 부분적으로 곡선형인 가공 경로를 따르도록, 상기 열 방향은 상기 레이저 빔의 전파 방향에 대해 횡방향인 평면 내에서의 상대 이동 동안에 변화되는 것인 재료 가공 방법.

청구항 3

제1항 또는 제2항에 있어서, 복수의 평탄화된 강도 최대값은 상기 레이저 빔의 전파 방향에 대해 횡방향인 평면 내에서 비대칭이 되도록 구성되는 것인 재료 가공 방법.

청구항 4

제1항 또는 제2항에 있어서, 비대칭 초점 구역은, 빔 축에 대해 비회전 대칭인 위상 분포를 갖는 회절성 광학 빔 정형 요소(31)를 통해, 비회전 대칭의 위상 분포를 부여함으로써 형성되는 것인 재료 가공 방법.

청구항 5

제1항 또는 제2항에 있어서, 비대칭 초점 구역은

- 빔 전파 방향에 대해 회전 대칭인 위상 분포를 상기 레이저 빔(3)의 횡방향 입력 강도 프로파일(31) 상에 부여 - 부여된 빔 정형 위상 분포(43)는 역 또는 보통 베셀 빔형(inverse or regular Bessel beam-like)의 가상 또는 실제 광학 이미지(53)가 상기 레이저 빔(3)에 할당되도록 함 - 하는 것;

- 상기 레이저 빔(3)을 빔 정형 거리(D_p)에 걸쳐서 전파하고, 그 후에 상기 빔 정형 위상 분포(43)는 상기 횡방향 입력 강도 프로파일(41)을 횡방향 출력 강도 프로파일(51)로 변환하고, 이에 의해 상기 횡방향 출력 강도 프로파일(51)은, 상기 입력 강도 프로파일(41)과 비교하여, 빔 축(45)의 외측에 위치되는 적어도 하나의 회전 대칭 극대값(local maximum)(49)을 포함하는 것;

- 상기 회전 대칭 극대값(49)의 각도 범위를 차단하는 것; 및

- 상기 회전 대칭 극대값(49)의 비차단 부분을, 상기 비대칭 초점 구역을 형성하도록 포커싱하는 것

에 의해 형성되는 것인 재료 가공 방법.

청구항 6

제5항에 있어서, 차단된 상기 각도 범위는 상기 초점 구역의 포락선(envelope)의 길이 범위와, 상기 길이 범위

에 대해 횡방향인 강도 극대값의 폭 범위를, 공급 경로의 곡률에 따라 설정하도록 조정되는 것인 재료 가공 방법.

청구항 7

제6항에 있어서, 차단된 상기 각도 범위의 방위각 위치는 상기 강도 극대값의 열 방향을 설정하도록 조정되는 것인 재료 가공 방법.

청구항 8

제1항에 있어서, 상기 강도 최대값은 전과 방향으로 비대칭 강도 최대값의 축방향 열을 더 형성하는 것인 재료 가공 방법.

청구항 9

제1항 또는 제2항에 있어서, 상기 세장형 초점 구역은

복수의 빔 정형 위상 분포(43)를 상기 레이저 빔(3) 상의 횡방향 입력 강도 프로파일(31)에 대해 부여 - 적어도 하나의 부여된 빔 정형 위상 분포(43)는 세장형 초점 구역(7)의 가상 또는 실제 광학 이미지(53)가 상기 레이저 빔(3)에 할당되도록 함 - 하는 것;

상기 레이저 빔(3)을 빔 정형 거리(Dp)에 걸쳐서 전파하고, 그 후에 복수의 부여된 빔 정형 위상 분포(43)가 상기 횡방향 입력 강도 프로파일(41)을 횡방향 출력 강도 프로파일(51)로 변환하고, 이에 의해 상기 횡방향 출력 강도 프로파일(51)이, 상기 입력 강도 프로파일(41)과 비교하여, 빔 축(45)의 외측에 위치된 적어도 하나의 극대값(49)을 포함하는 것; 및

상기 가상 또는 실제 광학 이미지(53)에 할당된 상기 세장형 초점 구역(7)을 상기 복수의 빔 정형 위상 분포(43) 중 적어도 하나의 다른 위상 분포에 기초하는 적어도 하나의 다른 초점 구역(1007A, 1007B)과 중첩, 부가 또는 간섭시키면서, 상기 출력 강도 프로파일(51)에 기초하는 근거리장(near field)을 형성하도록 상기 레이저 빔(3)을 상기 초점 구역(7) 내에 포커싱하고, 이에 의해 상기 재료의 가공 동안에 미리 예정된 방향에 대하여 정렬되는 비대칭 횡방향 강도 분포를 형성하는 것

에 의해 형성되는 것인 재료 가공 방법.

청구항 10

제1항 또는 제2항에 있어서,

상기 재료(9)를 분리하거나 상기 재료(9)의 분리를 준비하기 위한 균열을 유도하는 단계

를 더 포함하고, 연속적인 개질부는 레이저 빔 전과 방향(5)과 상기 재료(9) 간의 상대 이동 방향을 따라 서로에 대해 변위되고, 각각의 개질부는, 개질부의 최대 횡방향 범위에 관련된 길이 축을 가로지르거나 이 길이 축에 대해 종방향인 재료 또는 레이저 빔 파라미터에 따라 균열 형성의 미리 예정된 방향을 포함하고, 상기 상대 이동 방향 및 상기 미리 예정된 방향은 서로에 대해 조정되는 것인 재료 가공 방법.

청구항 11

제10항에 있어서,

공급 방향으로, 강도가 열의 후방측보다 열의 공급측에서 더 낮은 강도 최대값의 열을 생성하는 단계; 및

상기 공급 방향으로 상대 이동을 수행하고, 이에 의해 균열 형성 방향의 보다 강한 전개가 전방측보다 상기 후방측에 존재하게 하여, 이미 생성된 개질부로 향하는 균열 형성이 개시되지만 진행되는 균열 형성이 억제되도록 함으로써, 이미 생성된 개질부에 대한 균열 형성이 상기 개질부의 생성에 의해 이미 개시되도록 하는 단계

를 더 포함하는 재료 가공 방법.

청구항 12

전과 방향(5)으로 그리고 상기 전과 방향에 대해 횡방향인 다른 방향으로 세장형인 초점 구역(7) 내의 레이저 빔(3)에 대해 상당히 투과성인 재료(9)를 개질함으로써, 상기 재료(9)를 가공하기 위한 상기 레이저 빔(3)을 빔

정형하기 위한 광학 시스템(1)으로서,

상기 전파 방향(5)으로 상기 초점 구역을 형성하도록 구성되는 광학 요소

를 포함하며, 상기 전파 방향(5)으로 상기 초점 구역을 형성하도록 구성되는 광학 요소는 상기 전파 방향에 대해 횡방향인 다른 방향으로 상기 초점 구역을 추가적으로 형성하거나, 또는 상기 전파 방향에 대해 횡방향인 다른 방향으로 초점 구역을 형성하도록 구성되는 다른 광학 요소(50)가 상기 전파 방향으로 상기 초점 구역을 형성하도록 구성되는 광학 요소의 하류에 위치되고, 이에 의해 상기 초점 구역은, 평탄화 방향으로 횡방향으로 평탄화되고, 열 방향으로 비대칭 강도 최대값의 횡방향 열을 형성하는 복수의 강도 최대값을 포함하는 것인 광학 시스템.

청구항 13

제12항에 있어서, 상기 전파 방향에 대해 횡방향인 다른 방향으로 상기 초점 구역을 형성하도록 구성되는 광학 요소는 빔 축을 중심으로 회전가능하게 배열되거나,

상기 광학 시스템은 각각의 초점 평면에서 출력 강도 분포를 형성하기 위해 레이저 빔에 대해 초점 작용을 수행하도록 구성된 별개의 원거리장 광학기기(far field optics)를 더 포함하는 것인 광학 시스템.

청구항 14

제12항에 있어서,

상기 전파 방향으로 초점 구역을 형성하도록 구성된 상기 광학 요소는 하나 이상의 위상 분포(43)를 상기 레이저 빔 상에 부여하기 위한 회절성 광학 빔 정형 요소(31, 73)이고,

상기 전파 방향에 대해 횡방향인 다른 방향으로 초점 구역을 형성하도록 구성된 광학 요소는 빔 개구(50)로서 구성되며,

상기 광학 시스템은 상기 회절성 광학 빔 정형 요소(31)의 하류에 빔 정형 거리(Dp)로 배열되고, 상기 레이저 빔(3)을 상기 초점 구역(7) 내로 포커싱하도록 구성되는 근거리장 광학기기(33B)를 더 포함하고,

적어도 하나의 부여된 위상 분포(43)는 세장형 초점 구역(7)의 가상 광학 이미지(53)가 상기 레이저 빔(3)에 할당되도록 하고, 상기 가상 광학 이미지는 상기 회절성 광학 빔 정형 요소(31)의 상류에 위치되거나, 또는 세장형 초점 구역(7)의 실제 광학 이미지(71)가 상기 레이저 빔(3)에 할당되고, 상기 실제 광학 이미지는 상기 회절성 광학 빔 정형 요소(73) 이후에 위치되고,

상기 빔 정형 거리(Dp)는, 상기 하나 이상의 위상 분포가 상기 횡방향 입력 강도 프로파일(41)을 상기 근거리장 광학기기(33B)의 영역에서의 횡방향 출력 강도 프로파일(51)로 변환하는 상기 레이저 빔(3)의 전파 길이에 대응하고, 상기 횡방향 출력 강도 프로파일(51)은, 상기 입력 강도 프로파일(41)과 비교하여, 빔 축(45)의 외측에 놓이는 적어도 하나의 극대값(49)을 가지며,

상기 빔 개구(50)는, 할당된 광학 이미지(53)의 이미징이, 복수의 강도 최대값을 포함하는 상기 세장형 초점 구역(7) 내의 비대칭 횡방향 강도 분포를 초래하도록 상기 레이저 빔을 한정하는 것인 광학 시스템.

청구항 15

제14항에 있어서, 상기 회절성 광학 빔 정형 요소(31)는 위상 마스크를 포함하며, 상기 위상 마스크는 상기 위상 마스크 상에 입사하는 상기 레이저 빔(3) 상에 하나 이상의 위상 분포를 부여하도록 구성되고, 가상 광학 이미지(53)가 복수의 빔 정형 위상 분포(43) 중 적어도 하나에 할당되고, 상기 가상 광학 이미지는 가공될 상기 재료(9) 내에 개질부를 형성하기 위한 적어도 하나의 세장형 초점 구역(7) 내에 이미징가능한 것인 광학 시스템.

청구항 16

제14항에 있어서, 상기 복수의 빔 정형 위상 분포(43) 중 적어도 하나는, 링 구조(949A, 949B)가 빔 개구(50) 상류에서 횡방향 출력 강도 분포(51)에 형성되도록 구성되는 것인 광학 시스템.

청구항 17

제12항에 있어서,

상기 전과 방향으로 그리고 상기 전과 방향에 대해 횡방향인 다른 방향으로 추가로 초점 구역을 형성하도록 구성된 상기 광학 요소는 복수의 위상 분포(43)를 상기 레이저 빔 상에 부여하기 위한 회절성 광학 빔 정형 요소(31, 73)로서 구성되고,

상기 광학 시스템(1)은, 상기 회절성 광학 빔 정형 요소(31)의 하류에 빔 정형 거리(Dp)로 배열되고, 상기 레이저 빔(3)을 상기 초점 구역(7) 내에 포커싱하도록 구성되는 근거리장 광학기기(33B)를 더 포함하며,

적어도 하나의 부여된 위상 분포(43)는, 세장형 초점 구역(7)의 가상 광학 이미지(53)가 상기 레이저 빔(3)에 할당되도록 하고, 상기 가상 광학 이미지는 상기 회절성 광학 빔 정형 요소(31)의 상류에 위치되거나, 또는 세장형 초점 구역(7)의 실제 광학 이미지(71)가 상기 레이저 빔(3)에 할당되고, 상기 실제 광학 이미지는 상기 회절성 광학 빔 정형 요소(73) 이후에 위치되고,

상기 빔 정형 거리(Dp)는, 상기 복수의 위상 분포가 상기 횡방향 입력 강도 프로파일(41)을 상기 근거리장 광학기기(33B)의 영역에서의 횡방향 출력 강도 프로파일(51)로 변환하는 상기 레이저 빔(3)의 전과 길이에 대응하고, 상기 횡방향 출력 강도 프로파일(51)은, 상기 입력 강도 프로파일(41)과 비교하여, 빔 축(45)의 외측에 놓이는 적어도 하나의 극대값(49)을 갖는 것인 광학 시스템.

청구항 18

제17항에 있어서,

상기 복수의 빔 정형 위상 분포(43) 중 세그먼트-특정 위상 분포는, 할당된 광학 이미지(53)의 이미지가, 복수의 강도 최대값을 포함하는, 가공될 상기 재료(9) 내의 비대칭 횡방향 강도 분포를 초래하도록 구성되고,

상기 비대칭 횡방향 강도 분포는 공급 방향으로의 공급 강도 분포 및 공급 방향에 대해 횡방향인 분리 강도 분포를 포함하고, 상기 공급 강도 분포는 상기 분리 강도 분포보다 더 횡방향으로 연장되거나, 상기 분리 강도 분포는 강도 최대값들 사이에서 상기 재료(9)를 분리하기 위한 2개의 강도 최대값을 포함하는 것인 광학 시스템.

청구항 19

제17항에 있어서, 상기 회절성 광학 빔 정형 요소(31)는 위상 마스크를 포함하며, 상기 위상 마스크는 복수의 빔 정형 위상 분포(43)를 상기 위상 마스크 상에 입사하는 상기 레이저 빔(3) 상에 부여하도록 구성되고, 가상 광학 이미지(53)가 복수의 빔 정형 위상 분포(43) 중 적어도 하나에 할당되고, 상기 가상 광학 이미지는 가공될 상기 재료(9) 내에 개질부를 형성하기 위한 적어도 하나의 세장형 초점 구역(7) 내에 이미징가능한 것인 광학 시스템.

청구항 20

제17항에 있어서, 상기 복수의 빔 정형 위상 분포(43) 중 적어도 하나는, 방위각 범위로 제한된 링 세그먼트 구조(972A, 972B) 또는 극대값이 횡방향 출력 강도 분포(51)에 형성되도록 구성되는 것인 광학 시스템.

청구항 21

제17항에 있어서,

복수의 빔 정형 위상 분포 중 다수의 위상 분포에 가상 광학 이미지(53)가 각각 할당되고, 상기 광학 이미지(53)는 가공될 상기 재료(9)에 개질부를 함께 형성하기 위해 각각의 초점 구역(1007A, 1007B)에 이미징되도록 구성되는 것인 광학 시스템.

청구항 22

제19항에 있어서,

별도의 원거리장 광학기기(33B); 및

상기 위상 마스크 내에 통합되는 위상 부여 원거리장 광학기기

중 적어도 하나를 더 포함하고, 상기 원거리장 광학기기 및 상기 위상 부여 원거리장 광학기기 중 적어도 하나는, 각각의 초점 평면(340)에 적어도 하나의 가상 광학 이미지(53)를 위한 출력 강도 분포를 형성하기 위해 상

기 레이저 빔(3)에 대해 포커싱 작용을 수행하도록 구성되는 것인 광학 시스템.

청구항 23

제17항에 있어서, 상기 광학 시스템은, 상기 회절성 광학 빔 정형 요소(31, 73)를 회전시킴으로써, 바람직한 방향에 대하여 그 배향이 설정될 수 있는 비대칭 횡방향 강도 분포를 워크피스(9)에 형성하도록 구성되는 것인 광학 시스템.

청구항 24

레이저 빔(3)의 전파 방향(5)으로 세장형인 공통의 초점 구역(7) 내의 레이저 빔에 대해 상당히 투과성인 재료(9)를 개질함으로써, 상기 레이저 빔(3)으로 상기 재료(9)를 가공하기 위한 레이저 가공 기계로서,

레이저 빔 소스(11);

회절성 광학 빔 정형 요소(31) 및 빔 개구(50)를 포함하는 제14항에 따른 광학 시스템(1); 및

횡방향 비대칭 강도 분포를 바람직한 방향에 대해 배향하기 위한 작동 파라미터를 설정하기 위한 제어 유닛

을 포함하고, 상기 제어 유닛은 입사 레이저 빔의 빔 축에 대한 빔 개구의 회전 각도를 설정하도록 구성되거나,

상기 제어 유닛은, 비대칭 빔 프로파일에 의해 주어지는 워크피스 가공의 바람직한 방향이 공급 방향으로 조정될 수 있도록 상기 광학 시스템과 상기 워크피스를 정렬하도록 구성되는 것인 레이저 가공 기계.

청구항 25

레이저 빔(3)의 전파 방향(5)으로 세장형인 공통의 초점 구역(7) 내의 레이저 빔에 대해 상당히 투과성인 재료(9)를 개질함으로써, 상기 레이저 빔(3)으로 상기 재료(9)를 가공하기 위한 레이저 가공 기계로서,

레이저 빔 소스(11);

회절성 광학 빔 정형 요소(31) 및 빔 개구(50)를 포함하는 제17항에 따른 광학 시스템(1); 및

횡방향 비대칭 강도 분포를 바람직한 방향에 대해 배향하기 위한 작동 파라미터를 설정하기 위한 제어 유닛

을 포함하고, 상기 제어 유닛은 입사 레이저 빔의 빔 축에 대한 회절성 광학 빔 정형 요소(31)의 회전 각도를 설정하도록 구성되거나,

상기 제어 유닛은, 비대칭 빔 프로파일에 의해 주어지는 워크피스 가공의 바람직한 방향이 공급 방향으로 조정될 수 있도록 상기 광학 시스템과 상기 워크피스를 정렬하도록 구성되는 것인 레이저 가공 기계.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 레이저 빔을 빔 정형하기 위한, 특히 레이저 빔에 대해 본질적으로 투과성인 재료를 가공하기 위한 레이저 빔을 빔 정형하기 위한 광학 시스템에 사용되는 회절성 광학 요소(diffraction optical element)에 관한 것이다. 또한, 본 발명은 레이저 재료 가공을 위한 시스템 및 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 특히 국소적인 개질(modification)을 워크피스(workpiece)에 도입함으로써, 워크피스를 가공하기 위한 광 흡수의 많은 사용 가능성이 존재한다. 소위 체적 흡수(volume absorption), 즉 표면에 한정되지 않는 흡수는 레이저 빔에 대해 본질적으로 투과성인 취성-경질 재료를 가공할 가능성을 열고 있다. 일반적으로, 체적 흡수는 재료와의 상호작용이 재료 의존적(입계) 강도에서만 일어나는 일종의 비선형 흡수에서 이점을 얻는다.

[0003] 본 명세서에서, 비선형 흡수는 주로 광의 직접적인 흡수에 기초하지 않는 강도 의존적 광 흡수로서 이해된다. 대신에, 이것은 입사 광과의 상호작용 동안의 흡수의 증가, 흔히 시간적으로 제한된 레이저 펄스에 기초한다. 이에 의해서, 다른 전자가 충돌에 의해 해방될 정도로 역제동 방사(inverse bremsstrahlung)에 의해 많은 에너지를 전자가 흡수할 수 있고, 그에 따라 전자 생성 비율이 재결합 비율을 넘어선다. 특정 조건하에서, 에벌란시형 흡수(avalanche-like absorption)에 요구되는 초기 전자는 처음부터 이미 존재할 수 있거나, 선형 흡수에 의한 현재의 잔여 흡수(rest-absorption)에 의해 생성될 수 있다. 예를 들면, ns-레이저 펄스의 경우, 초기 이

온도가 온도 증가를 초래하여 자유 전자 수 및 그에 따른 다음의 흡수를 증가시킬 수 있다. 다른 조건하에서, 그러한 초기 전자는 잘 알려진 비선형 흡수 메커니즘의 예로서 다광자(multi-photon) 이온화 또는 터널(tunnel) 이온화에 의해 생성될 수 있다. 예를 들어 서브-ps 펄스 지속시간을 갖는 극초단 레이저 펄스의 경우, 그러한 애벌란시형 전자 생성이 이용될 수 있다.

[0004] 체적 흡수는 세장형 초점 구역에서 재료의 개질부를 형성하기 위해 레이저 빔에 대해 본질적으로 투과성인 재료(본 명세서에서는, 간단하게 투과성 재료로 지칭됨)에 사용될 수 있다. 그러한 개질부는 재료의 분리, 천공 또는 구조화(structuring)를 가능하게 할 수 있다. 분리를 위해, 예를 들어 개질부 내에 또는 개질부를 따라 파괴를 야기하는 개질부의 열(row)이 생성될 수 있다. 또한, 개질된 영역의 선택적 에칭(SLE: 선택적 레이저 에칭(selective laser etching))을 가능하게 하는 분리, 천공 및 구조화를 위한 개질부를 생성하는 것이 알려져 있다.

[0005] 세장형 초점 구역의 생성은 아포다이즈드 베셀 빔(apodized Bessel beam)(본 명세서에서는, 준-베셀 빔(quasi-Bessel beam)으로도 지칭됨)의 도움으로 이루어질 수 있다. 그러한 빔 프로파일은, 예를 들어 액시콘(axicon) 또는 공간 광 변조기(SLM: spatial light modulator) 및 가우스 빔 프로파일(Gaussian beam profile)을 갖는 입사 광 빔으로 형성될 수 있다. 투과성 워크피스 내로의 차후 이미징은 체적 흡수에 요구되는 강도를 초래한다. 준-베셀 빔 - 유사 베셀 빔 - 은 통상 워크피스 내에 존재하는 빔 프로파일의 원거리장(far field)에서 링형상의 강도 분포를 갖는다. 예를 들어 SLM에 의해 준-베셀 빔을 빔 정형하기 위한 위상 분포를 계산하는 것이 리치(Leach) 등의 "보정된 공간 광 변조기를 사용하는 아크로매틱 베셀 빔의 생성(Generation of achromatic Bessel beams using a compensated spatial light modulator)"(Opt. Express 14, 5581-5587 (2006))에 개시되어 있다.

[0006] 또한, 예를 들어 다초점 렌즈의 도움으로, 강도 증대의 라인을 형성하기 위한 시스템이 알려져 있다. 이에 의해서, 포커싱될 레이저 빔의 위상 변형이 원거리장에서, 즉 포커싱 동안에 사전형성되며, 이에 의해 위상 변형은 종방향으로 변위된 초점 구역의 형성을 초래한다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 개시의 일 태양은 회절성 광학 빔 정형 요소로 생성될 수 있는 세장형 초점 구역에 의한 레이저 재료 가공의 가공 품질을 개선하는 목적을 갖는다. 특히, 레이저 가공 응용에 대해서, 분리 도는 절삭 가공이 절삭 에지(cutting edge)의 증가된 정밀도로 수행될 수 있도록, 투과성 재료를 가공하기 위한 높은 종횡비(aspect ratio)를 갖는 세장형의 빔 프로파일을 빔 전파 방향으로 제공하는 것이 목적이다.

과제의 해결 수단

[0008] 상기 목적 중 적어도 하나는 독립 청구항의 방법, 광학 시스템 및 레이저 가공 기계에 의해 해결된다. 추가적인 개선예가 종속 청구항에 제공된다.

[0009] 일 태양에 있어서, 특히 상기 레이저 빔에 대해 상당히 투과성인 재료를 펄스형 레이저 빔으로 재료 가공하기 위해, 개질부가 생성되고, 개질부는 레이저 빔의 전파 방향에 대해 횡방향으로 비대칭으로 형성된다. 이에 의해서, 레이저 빔은 상기 재료 내에 세장형 초점 구역을 형성하도록 정형되며, 초점 구역은 평탄화 방향으로 횡방향으로 평탄화되는 적어도 하나의 강도 최대값, 또는 평탄화 방향으로 평탄화되는 비대칭 강도 최대값의 횡방향 및/또는 축방향 열을 포함하도록 구성된다. 상기 재료 내에 초점 구역을 위치시킨 후에, 개질부가 생성되고, 상기 재료 및 초점 구역은 평탄화 방향으로 또는 그것을 가로질러, 또는 열 방향으로 또는 그것을 가로질러 서로에 대해 상대 이동된다.

[0010] 실시예에 있어서, 회절성 광학 빔 정형 요소는 재료를 레이저 가공하도록 의도된 레이저 빔 상에 위상 분포를 부여하는데 사용되고, 빔 정형 요소는 (면으로 구성되는) 위상 마스크를 포함하고, 위상 마스크는 이 위상 마스크 상에 입사하는 레이저 빔 상에 하나 이상의 빔 정형 위상 분포를 부여하도록 구성된다. 가상 또는 실제 광학 이미지는 적어도 하나의 빔 정형 위상 분포에 할당되고, 광학 이미지는 가공될 재료에 개질부를 형성하기 위한 세장형 초점 구역 내에 이미징가능하다.

[0011] 다른 태양에 있어서, 펄스형 레이저 빔에 대해 상당히 투과성인 재료를 가공하기 위한 레이저 가공 동안에 균열을 유도하기 위한 방법은, 펄스형 레이저 빔의 비대칭 초점 구역에 레이저 빔을 포커싱함으로써 상기 재료 내에

개질부를 생성하여 상기 재료를 분리하거나 상기 재료의 분리를 준비하는 단계를 포함하며, 연속적인 개질부는 레이저 빔 전파 방향과 상기 재료 사이의 상대 이동 방향을 따라 서로에 대해 변위되고, 각각의 개질부는 균열 형성의 바람직한 방향을 포함하고, 상대 이동 방향 및 바람직한 방향은 서로에 대해 조정된다.

[0012] 다른 태양에 있어서, 전파 방향으로 그리고 전파 방향에 대해 횡방향인 다른 방향으로 세장형인 초점 구역 내의, 특히 레이저 빔에 대해 상당히 투과성인 재료를 개질함으로써, 상기 재료를 가공하기 위한 레이저 빔을 빔 정형하기 위한 광학 시스템은, 전파 방향으로 초점 구역을 형성하도록 구성되는 광학 요소를 포함하며, 전파 방향으로 초점 구역을 형성하도록 구성되는 광학 요소는 전파 방향에 대해 횡방향인 다른 방향으로 초점 구역을 추가적으로 형성하거나, 또는 전파 방향에 대해 횡방향인 다른 방향으로 초점 구역을 형성하도록 구성되는 다른 광학 요소는 전파 방향으로 초점 구역을 형성하도록 구성되는 광학 요소의 하류에 위치된다.

[0013] 다른 태양에 있어서, 전파 방향으로 세장형인 초점 구역 내의, 특히 레이저 빔에 대해 상당히 투과성인 재료를 개질함으로써, 상기 재료를 가공하기 위한 레이저 빔을 빔 정형하기 위한 광학 시스템은, 특히 빔 축 주위로 본질적으로 회전 대칭인, 하나 이상의 위상 분포를 레이저 빔 상에 부여하기 위한 회절성 광학 빔 정형 요소를 포함한다. 광학 시스템은 회절성 광학 빔 정형 요소의 하류에 빔 정형 거리로 배열되고, 레이저 빔을 초점 구역 내에 포커싱하도록 구성되는 근거리장 광학기구를 추가로 포함한다. 적어도 하나의 부여된 위상 분포는 세장형 초점 구역의 가상 광학 이미지가 레이저 빔에 할당되도록 하고, 가상 광학 이미지는 회절형 광학 빔 정형 요소의 상류에 위치되거나, 또는 세장형 초점 구역의 실제 광학 이미지가 레이저 빔에 할당되고, 실제 광학 이미지는 회절형 광학 빔 정형 요소 이후에 위치된다. 빔 정형 거리는 복수의 위상 분포가 횡방향 입력 강도 프로파일을 근거리장 광학기구의 영역에서의 횡방향 출력 강도 프로파일로 변환하는 레이저 빔의 전파 길이에 대응하고, 특히 상기 횡방향 출력 강도 프로파일은, 입력 강도 프로파일과 비교하여, 빔 축의 외측에 놓이는 적어도 하나의 극대값을 갖는다.

[0014] 본 명세서에서, 종래 기술의 태양을 적어도 부분적으로 개선하는 것을 가능하게 하는 개념이 개시되어 있다. 특히, 추가적인 특징 및 그 기능은 도면에 기초한 실시예의 하기의 설명으로부터 나온다.

도면의 간단한 설명

- [0015] 도 1은 레이저 빔의 빔 정형을 위한 광학 시스템의 개략도이고;
- 도 2는 재료 가공을 위한, 도 1에 따른 광학 시스템을 갖는 레이저 가공 장치의 개략도이고;
- 도 3은 광학 기능을 설명하기 위한 광학 시스템의 개략도이고;
- 도 4는 가상 광학 이미지를 이미징한 후에 세장형 초점 구역에서의 종방향 강도 분포의 예이고,
- 도 5는 도 4에 도시된 종방향 강도 분포의 ZR-단면이고;
- 도 6은 도 4 및 도 5에 따른 세장형 초점 구역에서의 투과성 재료의 개질에 대한 예시적인 실험 연구이고;
- 도 7은 실제 강도 증대의 생성 및 이미징을 설명하기 위한 개략도이고;
- 도 8은 도 7에 따른 실제 강도 증대를 이미징한 후에 세장형 초점 구역에서의 종방향 강도 분포의 예이고,
- 도 9 내지 도 11은 투과 또는 반사 액시콘에 기초한 광학 시스템의 예의 개략도이고;
- 도 12는 공간 광 변조기에 기초한 광학 시스템의 예의 개략도이고;
- 도 13은 투과 회절성 광학 요소에 기초한 광학 시스템의 예의 개략도이고;
- 도 14는 도 13에 따른 광학 시스템 내의 회절성 광학 요소에서의 위상 분포의 예의 개략도이고;
- 도 15는 도 13에 따른 광학 시스템에서의 출력 강도 프로파일의 예시적인 강도 단면이고;
- 도 16은 도 15에 도시된 강도 단면의 출력 강도 프로파일의 XY-뷰이고;
- 도 17은 위상-변조되지 않은 빔 부분을 필터링하는 상태의 광학 시스템의 예의 개략도이고;
- 도 18은 위상-변조된 빔 부분을 분리하기 위한 선형 빔 분포를 갖는 회절성 광학 요소에 기초한 광학 시스템의 예를 개략도이고;
- 도 19는 스캔 장치를 갖는 광학 시스템의 예의 개략도이고;

- 도 20은 광학 시스템의 이미징 시스템을 설명하기 위한 개략도이고;
- 도 21a 내지 도 21c는 균열 형성의 잠재적인 원인을 설명하기 위한 개략도이고;
- 도 22a 내지 도 23d는 빔 개구를 도입하는 것에 의한 비대칭 빔 정형을 위한 개략도이고;
- 도 24a 및 도 24b는 강도의 비대칭 어레이를 예시하기 위한 XY-단면 및 ZY-단면이고;
- 도 25a 및 도 25b는 비대칭 빔 정형을 위한 회절성 광학 요소 내의 위상 분포의 예의 개략도이고;
- 도 26은 방위각으로 분할된 위상 분포이고;
- 도 27은 도 26에 따른 위상 부여를 위한 예시적인 강도 단면이고;
- 도 28은 도 27에 도시된 강도 단면의 출력 강도 프로파일의 XY-뷰이고;
- 도 29는 도 26에 따른 위상 부여를 위한 세장형 초점 구역의 ZX-단면이고;
- 도 30은 도 26에 따른 위상 부여를 위한 세장형 초점 구역의 ZY-단면이고;
- 도 31은 2개의 횡방향으로 변위된 역 준-베셀 빔 프로파일을 생성하기 위한 위상 분포이고;
- 도 32는 도 31에 따른 위상 부여를 위해 빔 정형 요소로부터 근거리장 광학기로 전파할 때의 빔 축 Z를 따른 단면에서의 진폭 분포이고;
- 도 33은 도 31에 따른 위상 부여를 위한 출력 강도 프로파일의 XY-뷰이고;
- 도 34a 및 도 34b는 도 31에 따른 위상 부여를 위한 세장형 초점 구역의 ZX-단면 및 XY-단면이고;
- 도 35a 내지 도 35c는 도 31에 따른 위상 부여를 위한 $z = 10 \text{ mm}$, $z = 100 \text{ mm}$, $z = 150 \text{ mm}$ 에서의 빔 프로파일 이고;
- 도 36a 내지 도 36c는 도 31에 따른 위상 부여를 위한 $z = 10 \text{ mm}$, $z = 100 \text{ mm}$, $z = 150 \text{ mm}$ 에서의 X 방향의 횡 방향 강도 분포이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0016] 본 명세서에서 설명되는 태양은, 레이저 가공에 필요한 높은 강도로 인해, 광학 요소에 손상을 초래하는 강도가 레이저 빔의 준비 동안에 이미 존재할 수 있다는 인식에 부분적으로 기초하고 있다. 이러한 관점에서, 워크피스 내의 세장형 초점 구역의 생성이 가상 빔 프로파일의 이미징에 기초할 수 있는 것으로 또한 인식되어 왔다. 가상 빔 프로파일을 이미징하는 이러한 개념에 의해, 강도 피크를 갖는 영역은 광학 시스템에서 감소되거나 심지어 회피될 수 있다. 가상 빔 프로파일에 할당되고 원거리장 내의 강도 분포의 원하는 변화를 야기하는 위상 분포가 레이저 빔 상에 부여될 수 있는 것으로 또한 인식되어 왔다. 특히, 그러한 가상 빔 프로파일로부터 생기는 원거리장 분포에 의해, 예를 들어 역 베셀 빔형 또는 역 준-에어리형(inverse quasi-Airy beam-like) 강도 분포, 특정하게 설계된 강도 분포, 및 특히 이들의 중첩이 초점 구역에서 생성될 수 있는 것으로 인식되어 왔다. 그러한 강도 분포의 경우, 초점 구역 내로의 측방향 에너지 도입이 일어날 수 있어, 특히 투과성 재료의 가공을 가능하게 한다. 실제 강도 증대를 이미징하기 위한 시스템과 비교하여, 가상 빔 프로파일의 이미징의 개념이 그러한 광학 시스템의 구성을 보다 단축할 수 있는 것으로 인식되어 왔다.
- [0017] 본 명세서에서, 세장형 초점 구역은 피가공 재료 내에서의 상호작용 및 그에 의한 개질의 공간적 범위를 결정하는 광학 시스템에 의해 규정된 3차원 강도 분포와 관련된다. 이에 의해서, 세장형 초점 구역은, 피가공 재료 내에서 플루언스(flouence)/강도가 존재하는 세장형 영역을 결정하고, 이러한 세장형 영역은 가공/개질과 관련된 임계 플루언스/강도를 초과하는 영역이다. 통상적으로, 목표 임계 강도에 대한 3차원 강도 분포가 적어도 10:1, 예를 들어 20:1 이상, 또는 30:1 이상의 종횡비(측방향 범위에 대한 전과 방향의 범위)에 의해 특징지어지는 경우에 세장형 초점 구역으로 지칭한다. 그러한 세장형 초점 구역은 유사한 종횡비로 재료의 개질을 초래할 수 있다. 일부 실시예에 있어서, 예를 들어 전과 방향으로도 서로 평행한 초점 구역이 형성될 수 있고, 여기서 초점 구역 각각이 각자의 종횡비를 갖는다. 일반적으로, 그러한 종횡비에 있어서, 초점 구역에 걸친(유효) 강도 분포의 측방향 범위의 최대 변화는 50% 이하, 예컨대 20% 이하의 범위, 예를 들어 10% 이하의 범위일 수 있다.
- [0018] 이에 의해서, 세장형 초점 구역 내의 에너지는 생성된 개질부의 본질적으로 전체 길이에 걸쳐서 측방향으로 공

급될 수 있다. 결과적으로, 개질부의 초기 영역에서의 재료의 개질은 레이저 빔의 하류, 즉 개질 구역의 최종 영역에서의 재료의 개질을 야기하는 레이저 빔의 부분에 어떠한 차폐 효과도 미치지 않거나 거의 미치지 않는다. 그러한 관점에서, 가우스 빔은 필적하는 세장형 초점을 생성할 수 없는데, 이는 에너지 공급이 측방향 이 아니라 본질적으로 종방향으로 수행되기 때문이다.

- [0019] 본 명세서에서, 레이저 빔에 대해 본질적으로 투과성인 재료의 투과도는 선형 흡수와 관련된다. 임계 플루언스/강도 이하의 광에 대하여, 레이저 빔에 대해 본질적으로 투과성인 재료는, 예를 들어 개질부의 후방 단부까지 깊이를 따라, 예컨대 입사 광의 20% 미만, 또는 심지어 10% 미만을 흡수할 수 있다.
- [0020] 또한, 본 명세서에 설명되는 태양은, 예를 들어 회절성 광학 요소(diffractive optical element; DOE)에 의한 원하는 빔 정형에 의해서, 비선형 흡수에 의해 재료에 생성되는 자유 전자의 밀도가 조정될 수 있다는 인식에 부분적으로 기초하고 있다. 이에 의해 형성된 개질부를 따라서, 균열 형성이 특징하게 안내될 수 있어, 워크피스를 분리시킬 수 있다.
- [0021] 또한, 본 명세서에 설명되는 태양은, DOE에 대해서, 다중 위상 분포가 위상 마스크의 위상 분포로, 예를 들어 각각의 세그먼트에 제공될 수 있다는 인식에 부분적으로 기초하고 있다. 이에 의해서, 특히, 가상 광학 이미지, 예를 들어 역 준-베셀 빔형 빔 형상의 개념의 이점은 (종방향 또는 측방향에서) 다수의 그러한 가상 이미지의 이미징의 중첩에 사용될 수 있으며, 또한 다수의 이미징의 상호작용(예를 들면, 간섭) 및 공간적 배열 (spatial constellation)은 공통 초점 구역의 형성에 영향을 미칠 수 있다. 또한, 이러한 방식으로, 비대칭의 '공통(common)' 초점 구역이 생성될 수 있는 것으로 인식되어 왔다. 예를 들면, 재료 가공의 경우에, 비대칭의 '공통' 초점 구역은 특정 이동 방향 또는 특정 분리 방향을 선호하여 생성된다. 또한, 레이저 가공 동안에, 그러한 바람직한 방향이 광학 시스템 내에서 DOE를 배향/회전시킴으로써 원하는 가공 궤적에 채택될 수 있는 것으로 인식되어 왔다. 디지털 위상 마스크(SLM 등)의 경우, 위상 분포의 직접적인 제어가 바람직한 방향을 따르도록 또한 수행될 수도 있다.
- [0022] 또한, 본 명세서에 설명되는 태양은, DOE의 사용에 의해, 기본적인 광학 시스템의 셋업 및/또는 사용가능한 빔 부분의 격리를 단순화할 수 있는 추가적인 위상 분포가 빔 상에 부여될 수 있다는 인식에 부분적으로 기초하고 있다.
- [0023] 다시 말해서, 종래 기술의 단점은, 일부 실시예에서, 워크피스의 영역에 위치되고 전파 방향으로 세장형인 빔 프로파일이 생성된 가상 빔 프로파일의 이미징에 의해 영향을 받는다는 광학 개념에 의해 적어도 부분적으로 극복될 수 있다. 일부 실시예에 있어서, 또한 이러한 광학 개념은, 예를 들어 빔 프로파일의 푸리에 평면의 영역에서의 원치 않은 빔 부분에 대한 필터링 가능성 및 포커싱으로부터의 빔 정형의 분리를 가능하게 한다.
- [0024] 이러한 인식에서 기인하는 시스템 및 방법은, 그 중에서도, 고속으로 또한 절삭 에지의 양호한 품질로 투과성 취성-경질 재료의 분리를 가능하게 할 수 있다. 더욱이, 그러한 시스템 및 방법은 또한, 어블레이션 방법으로 생성될 때 테이퍼각을 갖지 않는 분리를 가능하게 할 수도 있다. 특히 비-어블레이션 개질에 기초한 분리시에, 제거가 없거나 작은 제거만이 있을 수 있고, 그 결과 재료는 가공 후에 표면 상에 소량의 입자만을 갖는다.
- [0025] 하기에서, 기본적인 광학 개념이 도 1 내지 도 8을 참조하여 일반적으로 설명될 것이다. 그 후에, 한편으로는 렌즈 및 미러와 같은 종래의 광학기에 의해(도 9 내지 도 11 참조), 그리고 다른 한편으로는 회절성 광학 요소에 의해(도 12 내지 도 16 참조) 광학 시스템을 구현하는 광학 시스템의 예시적인 실시예가 설명될 것이다. 도 17 내지 도 20과 관련하여, 광학 시스템 내에서의 빔 전개의 일반적인 태양뿐만 아니라, 필터링 및 스캐닝을 위한 구성요소 및 태양과의 광학 시스템의 조합 가능성이 설명된다.
- [0026] 도 21a 내지 도 21c와 관련하여, 균열 형성을 위한 바람직한 방향의 형성에 대한 잠재적인 이유가 설명된다.
- [0027] 나머지 도면들에서, 방위각 분할(도 26 내지 도 30)로 인한 횡방향 비대칭의 형성에서의 역 준-베셀 빔의 간섭, 및 횡방향으로 변위된 위상 분포(도 31 내지 도 36c)와 관련된 다양한 개념이 제안된다.
- [0028] 도 1은 전파 방향(5)으로 세장형인 초점 구역(7)을 피가공 재료(9) 내에 생성하기 위해 레이저 빔(3)을 빔 정형하기 위한 광학 시스템(1)의 개략도를 도시하고 있다. 일반적으로, 레이저 빔(3)은 파장, 스펙트럼 폭, 시간적 펄스 형상, 펄스 그룹의 형성, 빔 직경, 횡방향 입력 강도 프로파일, 횡방향 입력 위상 프로파일, 입력 발산, 및/또는 편광과 같은 빔 파라미터에 의해 결정된다. 도 1에 따르면, 레이저 빔(3)은 빔 정형하기 위한, 즉 빔 파라미터 중 하나 이상을 변환하기 위해 광학 시스템(1)에 공급된다. 통상적으로, 레이저 재료 가공의 경우, 레이저 빔(3)은 레이저 빔 소스(11), 예를 들어 극초단 펄스 고강도 레이저 시스템에 의해 생성되는 횡방향 가우스 강도 프로파일을 갖는 시준된 가우스 빔이다. 예를 들어 역 베셀 빔형 또는 역 에어리 빔형 빔 형상으로

의 변환이 수행될 수 있다.

- [0029] 도 2에 도시된 레이저 가공 기계(21)에서, 광학 시스템(1)은 예를 들어 재료 가공에 사용될 수 있다. 레이저 가공 기계(21)는 지지 시스템(23) 및 워크피스 위치설정 유닛(25)을 포함한다. 지지 시스템(23)은 워크피스 위치설정 유닛(25) 위에 걸쳐 있고, 도 2에서, 예를 들어 지지 시스템(23)의 상측 크로스빔(23A)에 통합되는 레이저 시스템(11)을 지지한다. 또한, 광학 시스템(1)은 X 방향으로 변위가능하도록 크로스빔(23A)에 장착되고, 그에 따라 양쪽 구성요소가 서로 근접하여 배열된다. 대안적인 실시예에 있어서, 레이저 시스템(11)은 예를 들어 별도의 외부 유닛으로 제공될 수 있고, 그것의 레이저 빔(3)은 광 파이버에 의해 또는 자유 전파 빔으로서 광학 시스템(1)에 안내된다.
- [0030] 워크피스 위치설정 유닛(25)은 X-Y 평면에서 연장되는 워크피스를 지지한다. 워크피스는 사용되는 레이저 파장에 대해 본질적으로 투과성인 피가공 재료(9), 예를 들어 유리 플레이트, 또는 사파이어 또는 실리콘과 같은 세라믹 또는 결정 형태의 플레이트이다. 워크피스 위치설정 유닛(25)은 워크피스가 지지 시스템(23)에 대해 Y 방향으로 변위할 수 있게 하고, 그에 따라 광학 시스템(1)의 변위 가능성과 조합하여, X-Y 평면 내에서 연장되는 가공 영역을 제공한다.
- [0031] 도 2에 따르면, 또한, 예를 들어 광학 시스템(1) 또는 크로스빔(23A)의 Z 방향으로의 재배치 가능성이 제공되어, 워크피스에 대한 거리가 설정될 수 있다. Z 방향으로의 절삭 작동 동안에, 통상적으로 레이저 빔은 또한 워크피스 상에 Z 방향으로(즉, 수직으로) 지향된다. 그러나, 붐 구성체(boom arrangement)(27) 및 추가적인 회전축(29)에 의해 도 2에 예시적으로 도시된 바와 같이, 추가적인 가공축이 제공될 수 있다. 따라서, 붐 구성체(27)는 도 2의 실시예에서 선택적인 것이다. 또한, 워크피스 또는 광학 시스템이 아니라, 보다 콤팩트하고 각각 설계된 구성요소가 가속될 때의 보다 높은 역학을 위해 여분의 추가 축이 제공될 수도 있다.
- [0032] 레이저 가공 기계(21)는 도 1에 명확하게 도시되지 않은 제어 유닛을 추가로 포함하며, 이 제어 유닛은 예를 들어 지지 시스템(23) 내에 통합되고, 특히 사용자가 작동 파라미터를 입력하기 위한 인터페이스를 포함한다. 일반적으로, 제어 유닛은, 예를 들어 펌프 레이저 파워, 냉각 파워, 레이저 기계 및/또는 워크피스 위치설정 유닛의 방향 및 속도, (예를 들면, SLM의) 광학 요소를 설정하기 위한 전기 파라미터, 및 광학 요소의(예를 들면, 그것의 회전을 위한) 공간적 배향과 같은 각각의 작동 파라미터를 제어함으로써, 레이저 가공 기계(21)의 전기적, 기계적 또는 광학적 구성요소를 제어하기 위한 요소를 포함한다.
- [0033] 다양한 자유도를 갖는 레이저 가공 기계를 위한 추가적인 구성체가 예를 들어 EP 1 688 807 A1에 개시되어 있다. 일반적으로, 소형 워크피스의 경우, 흔히 워크피스만이 이동되고, 대형 워크피스의 경우, 레이저 빔만, 또는 - 도 2에서와 같이 - 워크피스 및 레이저 빔이 이동된다. 더욱이, 2개 이상의 광학 시스템 및 그에 따른 초점 구역이 단일의 레이저 시스템(11)에 의해 공급될 수 있다.
- [0034] 레이저 가공 기계에 의해 생성되는 재료 내의 개질부는, 예를 들어 천공하거나, 유도된 장력에 의해 분리하거나, 용접하거나, 굴절 거동의 개질부를 생성하거나, 또는 선택적 레이저 에칭을 하는데 사용될 수 있다. 따라서, 적절한 방식으로 개질부의 타입 및 형상을 제어하는 것이 중요하다. 레이저 파장, 시간적 펄스 형상, 펄스의 수, 개별적인 개질부를 생성하는 펄스 그룹 내에서의 펄스의 에너지 및 시간적 거리뿐만 아니라, 펄스 에너지 또는 펄스 그룹 에너지와 같은 파라미터 이외에, 빔 형상이 결정적인 역할을 한다.
- [0035] 특히, 세장형 체적 개질부는 단일 가공 단계 내에서 빔 전파 방향으로 길게 연장된 체적 영역의 가공을 가능하게 한다. 특히, 공급 방향에서의 하나의 위치에서, 단지 단일의 개질부 가공 단계에서 큰 범위에 걸쳐서 가공이 일어날 수 있다. 본 명세서에 설명된 광학 시스템, 빔 정형, 및 방법의 사용에 의해서, 한편으로는 (연속적인 개질부 가공 단계에서 공급 방향에서의 하나의 위치에 서로 나란히 위치되는 단일 개질부에 비하여) 양호한 작업 결과가 달성될 수 있고, 다른 한편으로는 가공 시간 및 시스템 기술에 대한 요구조건을 저감할 수 있다. 그리고, 단일 개질부의 경우, 다수의 작업 단계가 필요하여, 소요 시간을 증가시키고, 단일 개질부의 상대 위치의 보다 복잡한 보장을 필요로 한다.
- [0036] 또한, 세장형 초점 구역은 평탄하지 않은 재료를 가공하는 경우에 유익할 수 있는데, 이는 본질적으로 동일한 레이저 가공 조건이 세장형 초점 구역을 따라 제공되고, 그에 따라 그러한 실시예에서, 전파 방향에서의 각자의 재조정이 필요하지 않거나, (요구되는 가공/침입 깊이를 고려하여) 세장형 초점 영역의 길이보다 큰 피가공 재료의 위치 편차에서만 필요할 수 있기 때문이다.
- [0037] 일반적으로, 그것은, 흡수가 일어나자마자, 그러한 흡수 자체 또는 그에 따른 재료 특성의 변화가 레이저 빔에 영향을 미칠 수 있는 세장형 체적 흡수에 의한 투과성 재료의 가공에 적용된다. 그러므로, 워크피스 내로 보다

깊게, 즉 빔 전파 방향에서 하향으로 개질을 야기하여야 하는 빔 부분이 상당한 흡수 영역을 통해 본질적으로 전파하지 않는 경우에 유리하다.

- [0038] 다시 말해서, 개질에 기여하는 그러한 빔 부분을 상호작용 구역에 대해 소정 각도로 더 하향으로 인도하는 것이 유리하다. 이것의 예가 링 형상의 원거리장 분포가 제공되는 준-베셀 빔이며, 그것의 링 폭은 전형적으로 반경에 비해 작다. 이에 의해서, 상호작용 구역의 빔 부분은 본질적으로 그러한 각도를 갖고서 회전 대칭으로 인도된다. 이러한 것은 본 명세서에 설명된 역 준-베셀 빔, 또는 이것의 변형에 또는 확장예, 예를 들어 균일화되거나 변조된 역 준-베셀 빔에 적용된다. 다른 예는 빔 부분이 오프셋된 각도로 개질부 내로 인도되는 역 가속된 '준-에어리 빔형' 빔이며, 여기서 이러한 빔 부분은, 예컨대 곡선형 역 준-베셀 빔에서와 같이, 곡선형 개질 구역에 대해 명확하게 접선방향으로 - 순수 준-베셀 빔에서와 같이 회전 대칭이 아님 - 인도된다.
- [0039] 더욱이, 원하는 체적 영역 내에서만 비선형 흡수에 대한 임계값을 크게 넘어서고, 원하는 응용에 적합하지만, 또한 더 하류에 위치한 체적 영역으로의 전파가 크게 방해받지 않도록 그러한 체적 영역의 기하학적 형상을 선택하는 것이 바람직하다. 예를 들면, 비선형 흡수에 요구되는 임계 강도 이하로 아포다이즈드 베셀 빔 프로파일의 2차 최대값을 유지하는 것이 유리할 수 있다.
- [0040] 개질부가 공급 방향으로 이어져 있다는 점에서, 개질된 체적의 기하학적 형상은, 또한, 공급 방향으로의 다수의 개질부의 열에 대해, 처음에 유도된 개질부가 다음 개질부의 형성에 단지 사소하게 영향을 미치도록 선택될 수 있다.
- [0041] 이미 언급된 바와 같이, 신속한 가공을 위해, 단일 개질부의 생성은 단일 레이저 펄스/단일 레이저 펄스 그룹으로만 수행될 수 있고, 그에 따라 이러한 경우에 워크피스 상의 위치는 한번만 접근되게 된다.
- [0042] 초단파 펄스 레이저는 충분히 강한 재료 개질부를 각각의 긴 상호작용 구역에 야기할 수 있게 하는 강도를 이용 가능하게 할 수 있다. 이에 의해서, 개질부의 기하학적 범위는 길게 연장된 고밀도의 자유 전자가 재료 내에서의 비선형 흡수에 의해 생성되도록 하는 빔 정형의 도움으로 설정된다. 보다 깊은 영역에의 에너지의 공급은 측방향으로 수행되고, 그에 따라 플라즈마의 상류 상호작용에 의한 차폐 효과가 가우스 포커싱에 비해 회피될 수 있다. 예를 들면, 종방향으로 매끄럽게 연장되는 전자 밀도, 또는 공간적으로 고주파 변조되는 전자 밀도가 생성될 수 있다.
- [0043] 각각의 강도에서, 재료의 폭발적인 팽창이 충분히 높은 밀도의 자유 전자를 갖는 영역 내에서 일어날 수 있고, 이에 의해 결과적인 충격파가 나노크기의 구멍(나노-보이드(nano void))을 생성할 수 있다. 개질부(개질 구역)에 대한 추가적인 예는 굴절률 변화부, 압축 및/또는 인장 응력 유도 영역, 미세-결정자(micro-crystallite), 및 화학양론의 국소 변화부이다.
- [0044] 처음에 설명된 바와 같이, 공급 방향으로의 그러한 개질 구역의 축적에 의해, 균열의 코스가 설정될 수 있다. 가공 동안에, 워크피스는 그에 맞춰 각각의 개질된 윤곽을 따라 분리된다. 그리고, 균열 형성은 그 후에 직접 이루어지거나, 다른 프로세스에 의해 유도될 수 있다. 예를 들면, 사전 변형되지 않은 재료의 분리 동안, 초음파 램프(ultrasound ramp) 또는 온도 램프가 개질된 윤곽을 따른 후후 분리를 야기하는데 사용될 수 있다. 단일 개질부는 통상적으로 균열 형성을 초래하지는 않는다.
- [0045] 맞춤형 빔 형상의 도움으로, 재료 내에서 그리고 개질된 영역들 사이의 다양한 장력 분포는 주어진 재료에 대해 분리 프로세스를 순응시키도록 생성될 수 있다. 그러한 프로세스에서, 강한 공간적 및 시간적 구배가 마이크로-폭발 또는 나노-폭발의 형성에 유리할 수 있다.
- [0046] 이에 의해서, 개질부의 기하학적 형상은 빔 정형에 의해(그리고, 예를 들어 필라멘테이션(filamentation)과 같은 비선형 전파에 의하지 않고서) 주로 결정될 수 있다. 공간적 구배의 생성은 본 명세서에 설명된 광학 시스템에 의해 달성될 수 있는 한편, 시간적 구배의 생성은 펄스 열(pulse train) 또는 펄스 정형에 의해 달성될 수 있다.
- [0047] 일반적으로, 빔 형상의 강도 분포의 스케일링(scaling)은 이미징 시스템의 이미징 비율에 의해, 특히 이미징 시스템의 근거리장 광학기기의 초점 거리 및 개구수(numerical aperture)에 의해 달성될 수 있다. 스케일링에 대한 추가적인 가능성은 빔 정형 요소 및/또는 원거리장 광학기기의 시프팅(shifting)뿐만 아니라 추가적인 렌즈의 사용에서 나온다(도 17 및 도 22와 관련한 설명 참조). 따라서, 워크피스 내의 빔 프로파일의 측방향 및 종방향 범위가 영향을 받을 수 있다. 또한, 빔을 준비하기 위해, 공간 필터 및 개구가 빔 정형을 위해 빔 경로 내에 사용될 수 있다.

- [0048] 본 개시의 범위 내에서 적용될 수 있는, 예를 들어 극초단 펄스 레이저 시스템에 대한 예시적인 레이저 빔 파라미터와, 광학 시스템 및 세장형 초점 구역의 파라미터는 다음과 같다:
- [0049] 펄스 에너지 E_p : 1 μJ 내지 10 mJ(예를 들면, 20 μJ 내지 1000 μJ)
- [0050] 펄스 그룹의 에너지 E_g : 1 μJ 내지 10 mJ
- [0051] 파장 범위: IR, VIS, UV(예를 들면, $2 \mu\text{m} > \lambda > 200 \text{ nm}$; 예를 들면, 1550 nm, 1064 nm, 1030 nm, 515 nm, 343 nm)
- [0052] 펄스 지속기간(FWHM): 10 fs 내지 50 ns(예를 들면, 200 fs 내지 20 ns)
- [0053] 상호작용 지속기간(공급 속도에 의존함): 100 ns 미만(예를 들면, 5 ps 내지 15 ns)
- [0054] 듀티 사이클(duty cycle)(레이저 펄스/펄스 그룹의 반복 시간에 대한 상호작용 지속기간): 5% 이하, 예를 들어 1% 이하
- [0055] 광학 시스템에 진입시의 원빔(raw beam) 직경 $D(1/e^2)$: 예를 들면, 1 mm 내지 25 mm의 범위
- [0056] 근거리장 광학기기의 초점 거리: 3 mm 내지 100 mm(예를 들면, 10 mm 내지 20 mm)
- [0057] 근거리장 광학기기의 개구수 NA: $0.15 \leq \text{NA} \leq 0.5$
- [0058] 재료 내에서의 빔 프로파일의 길이: 20 μm 초과
- [0059] 짧은 방향으로 적용가능한 경우의 재료 내에서의 빔 프로파일의 최대 측방향 범위: 20λ 미만
- [0060] 종횡비: 20 초과
- [0061] 전파 방향에서의 변조: 초점 구역에 걸쳐 10 주기 초과
- [0062] 예를 들어 분리 응용을 위한 2개의 이웃하는 개질부들 사이의 공급 d_v : $100 \text{ nm} < d_v < 10*$ (공급 방향에서의 측방향 범위)
- [0063] 상호작용 지속기간 동안의 공급: 예를 들면, 공급 방향에서의 측방향 범위의 5% 미만
- [0064] 따라서, 레이저 펄스의 펄스 지속기간 및 상호작용 지속기간은, 예를 들어 레이저 펄스의 그룹이 소정 위치의 단일 개질부의 형성을 위해 재료와 상호작용하는 시간적 범위와 관련된다. 이에 의해서, 현재의 공급 속도와 관련하여 상호작용 지속기간이 짧고, 그에 따라 그룹의 모든 레이저 펄스가 하나의 위치에서의 개질에 기여한다.
- [0065] 워크피스가 초점 구역의 길이보다 얇다면, 초점 구역은 워크피스의 외측에 부분적으로 위치되고, 그에 따라 초점 구역보다 짧은 개질부가 야기될 수 있다. 그러한 상황은, 광학기와 워크피스 사이의 거리의 변화에 대해서도, 가공 프로세스를 강건하게 하는데 유리하게 사용될 수 있다. 일부 실시예에서는, 전체 워크피스를 통과하지 않는 개질부가 유리할 수도 있다. 특히, 초점 구역의 길이 및/또는 워크피스 내의 위치는 맞춰질 수 있다. 일반적으로, 비선형 흡수에 대한 상이한 임계값으로 인해, 상정된 동일 강도를 갖는 초점 구역이 상이한 재료 내에 상이한 크기의 개질부를 야기할 수 있다는 것에 주목하자.
- [0066] 종횡비는 피가공 재료 내의 빔 프로파일(초점 구역)의 기하학적 형성뿐만 아니라, 빔 프로파일로 생성된 개질부의 기하학적 형상과 관련된다. 비대칭이거나 측방향으로 변조된(예를 들면, 비회전 대칭이거나 링 형상인) 빔 프로파일의 경우, 종횡비는 개질부 길이의 범위 내에 존재하는 최단 방향에서의 최대 측방향 범위에 대한 개질부의 길이의 비에 의해 주어진다. 예를 들어 링 형상의 빔 프로파일의 경우에 이에 의한 빔 프로파일이 측방향으로의 개질부를 포함하면, 종횡비는, 예를 들어 링 형상의 빔 프로파일의 경우, 링의 강도에 대한 최대의 폭과 관련된다. 측방향으로 변위되는 복수의 개질부 체적이 형성되는 경우, 종횡비는 단일 개질부의 측방향 범위와 관련된다. (예를 들면, 간섭으로 인해) 전파 방향으로 변조된 빔 프로파일의 경우, 종횡비는 보다 큰 랭킹의 전체 길이와 관련된다.
- [0067] 특히 근거리장 광학기기의 초점 거리 f_N 보다 긴, 빔 정형 요소와 포커싱 렌즈(근거리장 광학기기) 사이의 거리 d 와, 0.15보다 큰, 공기에 대한 근거리장 광학기기의 NA를 가정하면, 빔 정형 요소의 사용된 각도 스펙트럼 α 는 $\tan(\alpha) < f*NA/d < NA/2$ 및 바람직하게는 $\tan(\alpha) > f*NA/(d*4)$ 의 범위일 수 있다.

- [0068] 파라미터에 대한 전술된 범위는, 예를 들어 1 μm 미만의 절삭-에지의 거칠기 Ra를 갖는 예를 들어 5 mm 이상(전형적으로, 100 μm 내지 1.1 mm)까지의 재료 두께의 가공을 가능하게 할 수 있다.
- [0069] 광학 시스템(1)은 레이저 빔(3)의 빔 직경, 입력 강도 프로파일, 입력 발산 및/또는 편광과 같은 빔 파라미터를 조정하기 위한 빔 처리 유닛(13)을 추가로 포함할 수 있다. 예를 들면, 펄스형 레이저 시스템의 레이저 빔은, 예를 들어 5 mm의 빔 직경, 1030 nm 정도의 파장에서의 6 ps의 펄스 지속기간을 갖는 광학 시스템(1) 내에 결합되고, 처리 유닛(31)으로 인도된다.
- [0070] 도 3은 기능을 설명하기 위한 광학 시스템(1)의 개략적인 셋업을 도시하고 있다. 광학 시스템(1)은 빔 정형 요소(31) 및 이미징 시스템(33)에 기초한다. 빔 정형 요소(31)는 레이저 빔(3)을 수용하도록 구성된다. 따라서, 이것은 레이저 빔(3)의 횡방향 입력 강도 프로파일(41)에 적합화된다. 또한, 빔 정형 요소(31)는 횡방향 입력 강도 프로파일(41)에 대한 빔 정형 위상 분포(43)(도 1에서 점선으로 개략적으로 지시됨)를 레이저 빔(3) 상에 부여하도록 구성된다. 부여된 위상 분포(43)는 세장형 초점 구역(7)의 (본질적인) 가상 광학 이미지(53)가 레이저 빔(53)에 할당되도록 하고, 가상 광학 이미지(53)는 빔 정형 요소(31)의 전방에 위치된다. 빔 정형 요소(31)는 이러한 방식으로 이 빔 정형 요소(31)의 상류에 위치한 가상 빔 프로파일을 생성하지만, 그러한 위치에 있는 빔의 실제 경로에 대응하지 않는다.
- [0071] 이미징 시스템(33)은 워크피스가 가공 동안에 위치되는 레이저 가공 기계의 영역 내로 가상 빔 프로파일이 이미징되도록 구성된다. 도 3에서, 이미징 시스템(33)은, 그러한 목적을 위해, 본 명세서에서 원거리장 광학기기(33A)로 지칭되는 빔 방향에서의 제1 포커싱 요소, 및 본 명세서에서 근거리장 광학기기(33B)로 지칭되는 빔 방향에서의 제2 포커싱 요소를 포함한다.
- [0072] 원거리장 광학기기(33A)는 위상 부여 영역에 제공되고, 도 3에서 빔 정형 요소(31)의 하향에 렌즈 형상으로 예시적으로 도시되어 있다. 하기에 설명되는 바와 같이, 원거리장 광학기기(33A)는 또한, 빔 정형 요소(31) 직전에 배열되고, 빔 정형 요소 전후의 구성요소로 구성되고, 및/또는 빔 정형 요소에 완전히 또는 부분적으로 통합될 수 있다.
- [0073] 빔 정형 요소(31) 내에서의 위상의 부여 후에, 레이저 빔(3)은 빔 정형 거리(Dp)에 걸쳐서 이미징 시스템(33)을 따라서 근거리장 광학기기(33B)까지 전파된다. 이에 의해서, 빔 정형 거리(Dp)는 부여된 위상 분포(43)가 횡방향 입력 강도 프로파일(41)을 근거리장 광학기기(33B)에서의 횡방향 출력 강도 프로파일(51)로 변환하는 레이저 빔(3)의 전파 길이에 대응한다. 본 명세서에서, 출력 강도 프로파일(51)은 위상 부여에 의해 결정되는 광학 시스템 내의 그러한 횡방향 강도 프로파일을 포함한다. 이것은 통상적으로 늦어도 근거리장 광학기기 이전의 초점 거리의 영역에서 또는 근거리장 광학기기의 영역 내에서 완료된다.
- [0074] 가상 빔 프로파일의 개념을 구현하기 위해, 레이저 빔(3)이 광학 시스템 내에서 전파되어야 하는 (빔 정형 요소(31)로부터 근거리장 광학기기(33B)까지의) 전파 길이에 대한 하기의 고려사항이 존재한다. 일반적으로, 광학 시스템은 원거리장 포커싱 작용 및 근거리장 포커싱 작용을 갖는 이미징 시스템(33)을 형성한다. 후자는 근거리장 광학기기(33B) 및 그에 따른 근거리장 초점 거리(f_N)에 의해 결정된다. 전자는 원거리장 포커싱 작용 및 각각의 원거리장 초점 거리(f_F)에 의해 결정된다. 원거리장 초점 거리(f_F)는 별도의 원거리장 광학기기(33A)에 의해 실현될 수 있고, 및/또는 빔 정형 요소 내에 통합될 수 있다. 이것에 대해서는 또한 도 20 참조. 이미징 시스템(33)은 X:1의 이미징 비율을 가지며, 여기서 X는 가상 이미지의 축소에 대해 통상적으로 1보다 크다. 예를 들면, 1:1 이상, 예를 들어 5:1, 10:1, 20:1 또는 40:1 이상인 이미징 비율이 구현된다. 다시 말해서, 이미징의 이러한 정의에 따르면, 계수 X는 가상 프로파일 내로의 초점 구역의 축방향 크기의 확대와 유사하다. 각도가 각각 축소된다. 이미징 비율이 프로파일의 길이에 자승으로 된다는 것에 주목해야 한다. 따라서, 가상 이미지의 종방향 길이는 예를 들어 10:1의 이미징 비율에 대해 100의 계수로 작아지고, 20:1의 이미징 비율에 대해 400의 계수로 작아진다.
- [0075] 1:1의 이미징 비율에서, $f_N = f_F$ 이고, 초점 평면의 중첩 정렬이 추정된다. 일반적으로, $f_F = Xf_N$ 이다. 원거리장 광학기기(33A)가 빔 정형 요소 내에 통합되면, 예를 들어 근거리장 광학기기로부터 거리 f_N+f_F 에, 즉 전형적으로 양쪽 광학 요소의 초점 거리의 합계의 범위 내에 위치된다. 1:1이거나 축소 이미징 시스템인 경우, 그에 따라 전파 길이는 적어도 근거리장 광학기기의 초점 거리의 2배에 대응한다.
- [0076] 원거리장 광학기기(33A) 및 빔 정형 요소(31)를 분리하고, 가상 광학 이미지가 빔 정형 요소와 (특히, 초점 구역과 관련된 강도 영역 내에서) 중첩하지 않아야 하는 것으로 가정하면, 빔 정형 요소는 가상 빔 프로파일(53)

의 증방향 중심의 하향으로 적어도 $I/2$ 의 거리에 배열된다. 여기서, 길이 I 는 관련 강도 영역에 대한 가상 빔 프로파일(53)의 증방향 범위이다. 가상 빔 프로파일(53)의 증방향 중심은 근거리장 광학기기(33B)로부터 거리 f_N+f_F 에 위치되는, 예를 들어 원거리장 광학기기(33A)의 진입측 초점 평면에 위치된다. 이러한 경우에, 전과 길이 $d = f_N+2f_F-I/2 = (1+2X)f_N-I/2$ 이고, 따라서 $f_N+2f_F = (1+2X)f_N$ 보다 작거나, 다시 말해서 광학 요소들 사이의 거리와 f_F 의 합보다 작다.

[0077] 거리 $f_N+2f_F = (1+2X)f_N$ 에 대해서, 또한 증가하는 빔 확장에 대해서, 가상 빔 프로파일(53)의 각각 증가하는 길이 I 가 이미징될 수 있고, 이에 의해 - 후술되는 바와 같이 - 프로파일의 규정된 단부가 유지될 수 있다.

[0078] 일반적으로, 원빔 발산 및 수렴뿐만 아니라, 이미지 시스템의 조정 편차로 인해, 상기 고려사항으로부터 편차가 생길 수 있다고 언급되고 있다. 실제 강도 증대의 필적하는 이미지, 즉 필적하는 이미징 비율을 갖는 이미지와 대조적으로, 빔 정형 요소는 보다 근접하게 위치된다(도 7 및 도 8에서의 각각의 논의 참조). 그러므로, 공통 거리는 $(1+2X)f_N \geq d \geq 2f_N$ 의 범위에 놓인다.

[0079] 부여된 위상으로 인해, 횡방향 출력 강도 프로파일(51)은, 입력 강도 프로파일(41)과 비교하여, 빔 축(45)의 외측에 위치한 적어도 하나의 극대값(49)을 포함한다. 빔 축(45) 외측에 위치한 극대값(49)은 초점 구역(7) 내로의 측방향 에너지 진입을 초래한다. 빔 정형 요소(31)에 따라서, 횡방향 출력 강도 프로파일(51)의 극대값(49)은 - 도 3에서 단면도로 도시된 바와 같이 - 빔 축(45)에 대해 회전 대칭으로 될 수 있거나, 방위각 범위 내에 형성될 수 있다(도 29 및 도 30 참조). 통상적으로, 빔 축은 측방향 빔 프로파일의 빔의 무게 중심에 의해 규정된다. 통상적으로, 광학 시스템은, 통상 빔 정형 요소의 대칭점(DOE의 중심 또는 반사성 중공 원추형 액시콘의 틱)을 통과하는 광축과 관련될 수 있다. 회전 대칭 빔 및 각각의 정확한 정렬의 경우, 빔 축은 적어도 단면에서 광학 시스템의 광축과 일치할 수 있다.

[0080] 극대값은, 특히 역 준-베셀 빔형 빔 형상에 대해, 급격하고 완만한 하강 플랭크(falling flank)를 갖는 전형적인 서브구조가 형성될 수 있는 출력 강도 프로파일(51)의 일반적인 특징부로서 고려될 수 있다. 연관된 원거리장 초점 평면의 범위에서의 빔 정형 요소 및/또는 원거리장 광학기기의 포커싱 작용으로 인해 그러한 서브구조 자체가 반전될 수 있다. 특히, 출력 강도 프로파일은 그러한 원거리장 초점 평면의 범위 내에서 특히 "급격한" 극대값을 나타낼 수 있고, 예를 들면, 역 준-베셀 빔형 빔 형상의 경우에, 극대값 자체가 빔 정형 요소 이후에 상당히 빠르게 형성될 수 있다. 그러나, 서브구조의 태양은 위상 부여의 다양한 가능성 때문에 변할 수 있다.

[0081] 가상 빔 프로파일의 개념은, 한편으로는 광학 시스템(1)의 구성 길이를 감소시킬 수 있고, 다른 한편으로는 광학 시스템(1) 내에서의 상당한 강도 증대를 갖는 세장형 빔 프로파일의 형성을 회피할 수 있다. 이미징 시스템(33)은, 광학 시스템(1) 내에 가상 빔 프로파일의 원거리장이 형성되고, 근거리장 광학기기(33B) 내의 포커싱이 렌즈, 미러, 현미경 대물렌즈(microscopic objective), 또는 이들의 조합과 같은 일반 포커싱 구성요소를 사용하여 실행될 수 있도록 구성된다. 그러한 경우에, "일반"은 본 명세서에서 특정 빔 형상이 근거리장 광학기기(33B)가 아니라 본질적으로 빔 정형 요소(31)에 의해 부여된다는 의미에서 이해된다.

[0082] 도 3에는, 예시를 위해 본 명세서에서 역 준-베셀 빔으로 지칭되는 빔에 대응하는 빔의 경로가 도시되어 있다. 그러한 목적을 위해, 빔의 경로는 빔 정형 요소(31)의 하류에서 실선으로 도시되어 있다. 빔 정형 요소(31)의 상류에서는, 시준된 입사 빔(3) 대신에, 가상 빔 프로파일이 실제 준-베셀 빔과 유사하게 점선으로 묘사되어 있다.

[0083] 일반 준-베셀 빔과 유사하게, 또한 역 준-베셀 빔은 원거리장 광학기기(33A)의 초점 평면에 링 구조를 갖는다. 그러나, 원거리장 광학기기(33A) 상에 충돌하는, 개략적인 단면도로 도시된 발산 빔 영역(55A, 55B)은, "실제" 준-베셀 빔 프로파일에서 기인하지 않고, 입사 레이저 빔(3)과 빔 정형 요소(31)의 상호작용으로부터 직접적으로 생긴다. 직접적인 상호작용 때문에, 빔 영역(55A, 55B)은 레이저 빔(3)의 횡방향 빔 프로파일(41)에 의해 측방향 강도 분포로 정형된다. 따라서, 가우스 입력 빔의 경우, 강도는 원칙적으로 빔 영역(55A, 55B)에서 반경방향으로 내측으로부터 외측으로 감소한다. 빔 영역(55A, 55B)의 발산으로 인해, 그에 따라 전형적으로 낮은 강도의 영역((이상적인 경우에는 강도가 없는 영역)이 위상-변조된 빔 부분에 대해 빔 축 상에 형성된다. 그러한 경우에, 빔 부분의 발산, 또한 그에 따라 발산하는 빔 부분은 본 명세서에서 빔 축으로부터 멀리 이동하는 빔 부분과 관련된다. 그러나, 그러한 영역에서, 위상 변조되지 않은 빔의 빔 부분, 및/또는 또한 추가적인 위상-변조된 빔 부분이 중첩될 수 있다. 역 베셀 빔형 빔의 정형 동안에 광학 시스템 내에서의 빔의 전개에 대해, 도 33 및 도 34의 설명이 참조된다. 이러한 강도 거동은 횡방향 강도 코스(57A, 57B)로 개략적으로 지시되어 있다. 전과 길이를 따른 강도 코스가 부여된 위상 분포(43)로 인해 변할 수 있다는 것에 주목하자. 그러

나, 적어도 초기 영역(즉, 빔 정형 요소(31)에 근접하게 놓이는 빔 영역(55A, 55B) 내에서, 그리고 일반적으로 순수 위상 마스크로서 작용하는 빔 정형 요소(31)로 인해, 레이저 빔(3)의 입사 강도 프로파일보다 발산하는 위상-변조된 빔 부분이 우세하다.

[0084] 역 준-베셀 빔의 명확한 설명을 위해, 추가적인 강도 코스(57A', 57B')가 도 3에 개략적으로 도시되어 있다. 여기에서, 빔 정형 요소(31)가 진폭이 아니라 위상에만 영향을 미치는 것으로 가정한다. 원거리장 광학기기(33A)에 의한 포커싱(또는 빔 정형 요소(31)의 각각의 원거리장 작용)이 광학 시스템(1)의 출구에서 강도 코스를 역전시켜서, 빔 축(45) 상에의 세장형 초점 구역(7)의 형성 동안에, 처음에는 입사 가우스 빔 프로파일의 감소하는 플랭크에서 기인하는 낮은 강도가 중첩되게 하는 것으로 인식된다. 그 후에, 입사 가우스 빔 프로파일의 중심 영역으로부터 기인하는 보다 높은 강도가 중첩한다. 이러한 맥락에서, 빔 정형 요소 상의 강도뿐만 아니라, 기여하는 영역이 인지되어야 한다는 것에 주목하자. 회진 대칭의 경우, 대응적으로 거리가 자승으로 된다. 특히 도 4와 관련하여 도시된 바와 같이, 종방향 강도 프로파일은 입력 프로파일의 중심으로부터의 빔 부분이 교차하는 영역에서 정확하게 종료된다. 중심에서는, 최고의 강도가 존재하지만, 그 영역은 제로가 된다. 더욱이, 초점 구역 이후에는, 빔 정형 요소 이후의 강도 코스(57A, 57B)에 대응하는 역전된 강도 코스가 다시 존재한다는 것에 주목하자(재료와의 상호작용이 없다고 가정함).

[0085] 이미징 시스템(33)에 의한 이미징으로 인해, 따라서 도 3에 가상 빔 정형에 대해 개략적으로 도시되는 입사 가상 강도 코스(57A" 및 57B")가 존재한다. 이것은 강도 코스(57A' 및 57B')에 원칙적으로 대응한다.

[0086] 준-베셀 빔과 비교하여 반전된 그러한 강도 코스는 가상 빔 프로파일, 즉 광학 이미지(53)에서 뿐만 아니라 초점 구역(7)에서 역 준-베셀 빔에 대한 특정 종방향 강도 코스를 야기하는데, 이것은 여기에서 빔 부분(55A, 55B)의 중첩이 가상으로 실행되기 때문이다. 통상의 준-베셀 빔에 대한 강도 코스의 각각의 논의를 위해 도 7 및 도 8 및 각각의 설명이 참조된다.

[0087] 도 4는 역 준-베셀 빔 형상의 가상 광학 이미지(53)의 이미징에 대해 산출될 수 있는 세장형 초점 구역(7) 내의 종방향 강도 분포(61)를 예시적으로 도시하고 있다. Z 방향으로의 표준 강도 I가 도시되어 있다. 재료(9) 상에의 (Z 방향으로의) 수직 입사에 따른 전파 방향이 요구되지 않고, 도 2와 관련하여 설명된 바와 같이, 대안적으로 Z 방향에 대해 소정 각도로 일어날 수 있다는 것에 주목하자.

[0088] 도 4에서, 강도 최대값까지 수백 마이크로미터에 걸친 초기에 느린 강도 증가(61A)(낮은(외측) 강도의 초기 중첩)에 이어서 강한 강도 감소(61B)(높은(중심) 강도의 중첩)가 이어지는 것을 알 수 있다. 그러므로, 역 베셀 빔 형상의 경우, 그 결과는 전파 방향(도 4에서의 Z 방향)으로의 종방향 강도 분포의 확실한 경계(hard border)이다. 특히 도 3에 도시된 강도 코스(57A' 및 57B')의 면에서 알 수 있는 바와 같이, 확실한 경계는 종방향 강도 분포(61)의 종료부가 확실히 높은 강도를 갖는 입사 레이저 빔의 빔 중심의 기여에 의존하지만, 크게 감소된(제로가 되는) 영역에 의존한다는 사실에 기초한다. 다시 말해서, 그러한 종료부는 역 준-베셀 빔의 중심에서 구멍이 형성되는 가상 빔 프로파일의 이미징에 의존한다. 그러한 종료부에서의 강도 감소의 강한 구배는 입력 프로파일의 중심에서의 높은 강도에 의존하지만, 소실 영역에 의해 제한된다. 이상적인 이미징 시스템의 경우, 강도 분포(61)의 종방향 범위는 이미징 스케일 및 가상 프로파일의 위치에 의해 규정된다. 또한 워크피스가 큰 굴절률을 포함하면, 빔 프로파일은 대응적으로 길어진다.

[0089] 이러한 맥락에서, 확실한 경계는, 레이저 가공 기계에서, 입사 횡방향 빔 프로파일이 증가되는 경우에도 전파 방향에서의 개질부의 전방 단부가 전파 방향에서 본질적으로 고정되어 있다는 결과를 낳는다는 것이 부연된다. 개질부는 후방부에서만 그 범위가 변하며, 즉 레이저 빔의 입력 빔 직경이 커지는 경우, 근거리장 광학기기로의 방향으로 길어질 수 있다. 이에 의해, 워크피스 지지체 또는 워크피스 자체에 대한 확실한 경계의 한번 설정된 위치는 개질부의 하류에서 높은 강도를 회피할 수 있다. 그와 대조적으로, 실제 강도 증대를 이미징할 때의 입력 빔 직경의 증대는 전파 방향으로, 즉, 예를 들어 워크피스 지지체 내로의 개질부의 신장을 야기하여, 워크피스 지지체의 손상을 초래할 수 있다.

[0090] 도 5는 도 4에 도시된 종방향 강도 분포(61)에 대한 초점 구역(7) 내의 강도의 예시적인 X-Y 단면(63)을 도시하고 있다. 수백 마이크로미터에 걸친 세장형 형태의 초점 구역(7)이 수 마이크로미터의 횡방향 범위에 있다는 것을 알 수 있다. 비선형 흡수의 임계 거동과 함께, 그러한 빔 프로파일은 워크피스 내에 명확하게 규정된 세장형 개질부를 야기할 수 있다. 예를 들면, 세장형 형상의 초점 구역(7)은 10:1 내지 1000:1, 예컨대 20:1 이상, 예를 들어 50:1 내지 400:1의 범위의 종횡비, 즉 초점 구역의 길이 내에 존재하는 측방향 최단 방향에서의 최대 범위에 대한 초점 구역의 길이의 비- 후자는 비회진 대칭 프로파일의 경우임 - 를 포함한다.

- [0091] 진폭에 대해 전과 방향으로 변형되지 않는, 역 준-베셀 빔의 빔 형상 - 도 4에 도시됨 - 으로부터 자유로워지면, 빔 정형 요소(31)는 예를 들어 전과 방향에서의 강도 변형에 사용될 수 있는 근거리장에서의 진폭 재분포를 추가적으로 생성할 수 있다. 그러나, 초점 구역(7) 전방에 이렇게 생성된 강도 분포는 매우 명확한 방식으로 더 이상 제공될 수 없다. 그럼에도 불구하고, 흔히 역전의 초기 단계는 종방향 강도 프로파일의 시작 영역 또는 종료 영역에서, 예를 들어 완만한 증가 및 급격한 감소를 보여준다. 그러나, 빔 정형 요소(31)의 위상 종류에 의한 (위상 유발된) 진폭 재분포는, 예를 들어 종방향 플랫폼(flat top) 강도 분포의 형태를 야기하기 위해, 정확하게 역 강도 분포로 설정될 수 있다.
- [0092] 추가적으로, "실제" 빔 형상과 구별하기 위한 하기의 특징은 유지될 수 있다: 실제 가우스 입력 빔의 경우에, 예를 들어 실제 액시콘에 대하여, 입력 빔의 축소된 가우스 횡방향 빔 프로파일이 존재하고 그에 따라 볼 수 있게 되는 평면이 초점 구역과 근거리장 광학기기 사이에 존재한다. 가상 광학 이미지의 개념에 대해 각각의 이미징이 존재한다. 그러나, 이러한 경우에, 축소된 가우스 횡방향 빔 프로파일이 존재하는 이미지 평면은 초점 구역 뒤에 놓인다. 따라서, 횡방향 빔 프로파일은 볼 수 있게 된다. 이것은, 본 명세서에 개시된 역 빔 형상을 위한 위상 마스크에 대해, 이들이 가우스 빔 프로파일로 조명되는 경우에, 일반적으로 적용된다. 구체적으로, 축소된 가우스 횡방향 빔 프로파일은 빔 정형 요소의 이미지 평면 내에, 그리고 따라서 통상적으로 초점 구역의 바로 하류에 위치된다. 그러므로, 이미 수행된 발산으로 인해, 이것은 초점 구역 내의 역 준-베셀 빔형 빔의 횡방향 빔 프로파일보다 상당히 크다. 또한, 강도는 훨씬 낮아진다.
- [0093] 빔 프로파일의 구조의 빠른 역전, 즉 작은 축방향 영역에 걸친 강한 변화에 의한 입력 빔의 이미징된 가우스 횡방향 빔 프로파일의 위치를 알 수 있다. 예를 들면, 역 준-베셀 빔형 빔의 횡방향 강도 프로파일이 초점 구역 내에 존재한다. 빔 정형 요소의 이미지 평면을 통과할 때, 즉시 암점(dark spot)이 중심에 "유사하게(quasi)" 형성된다. 역 준-베셀 빔의 경우, 이것은 초점 구역의 시작부에서 상이하다. 거기에서, 가우스 빔 프로파일의 경계 영역의 중첩 증가로 인해, 어두운 중심으로부터, 중심에 채워지는 역 준-베셀 빔형 빔의 횡방향 강도 프로파일로의 느린 변환이 이루어진다. 다시 말해서, 종방향으로, 강도가 보다 큰 영역에 걸쳐서 증가하고, 그러면 종료부에서 감소하게 된다. 따라서, 종료부에서, 그러한 변환은 명확히 급격하게 제한된다. 실제 베셀 빔형 강도 증대를 이미징할 때, 종료부에서의 거동과 시작부에서의 거동이 뒤바뀌며, 즉 베셀 빔 프로파일의 종료부에서 암점이 보다 느리게 형성된다는 것이 부연된다.
- [0094] 그러므로, 전술된 바와 같이, 가상 빔 프로파일을 사용하는 개념은, 그 중에서도, 적용될 위상 부여 및 결과적인 초점 구역(7) 내의 강도 코스에 영향을 미칠 수 있다.
- [0095] 도 6은 투과성 재료 내의 개질부 형성을 조사하기 위한 실험 연구의 맥락에서 생성된 개질 구역(65)을 도시하고 있다. 각각의 개질 구역(65)은 레이저 펄스의 그룹, 예를 들어 약 14 ns의 시간 간격의 2개의 6 ps 펄스와의 상호작용에서 기인한 것이다. 개질 구역의 형상은 도 4 및 도 5에 따라 추정된 바와 같은 세장형 초점 구역(7)의 형상에 대응한다. 최대 길이는 요구된 강도/플루언스에서의 세장형 초점 구역(7)의 기하학적 형상에 의해 제한된다.
- [0096] 상측 4개의 이미지는 약 20 μJ 내지 40 μJ 의 펄스 그룹 에너지(E_g)에 대한 임계 거동을 나타내고 있다. 하측 4개의 이미지는 약 30 μJ 내지 200 μJ 의 펄스 그룹 에너지(E_g)에서의 세장형 개질 구역(65)의 정형을 나타내고 있다. 전체 에너지(E_g)가 증가함에 따라, 개질 구역은 빔 입구(근거리장 광학기기)의 방향으로 길어지는데, 이는 비선형 흡수에 대한 임계 강도가 초점 구역(7)의 보다 긴 영역 내에 도달되기 때문이다. 빔 전과 방향에서의 개질부의 단부는, 특히 피가공 워크피스에 대한 근거리장 광학기기(33B)의 거리의 이차 수정 없이도, 그 위치에 본질적으로 고정되어 있다. 보다 낮은 에너지에서, 후방 단부의 빔 방향으로의 초기 이행(initial walk)은, 특히 개질 임계값이 빔 프로파일 내의 작은 강도에 놓이는 경우에, 종방향으로 존재하는 구배로 인해 발생할 수 있다. 그러나, 이러한 이행은 중간 및 높은 에너지에서 감소하는데, 이는 역 준-베셀 빔형 빔 프로파일의 생성이 전과 방향에서 잠재적 최대 후방 단부를 포함하기 때문이다.
- [0097] 개질부의 종방향 범위의 변화의 유사한 거동이 입사 레이저 빔(3)의 반경방향으로 증가하는 빔 직경에 대해 또한 생성된다. 그러한 경우에도, 개질 구역은 빔 입구(근거리장 광학기기)의 방향으로 길어지는데, 반경방향 외측으로 부가되는 입사 레이저 빔(3)의 강도 영역이 느린 강도 증가(61A)(즉, 완만한 구배를 갖는 강도 증가)의 영역에 있어서의 종방향 강도 영역으로 에너지를 안내하기 때문이다. 따라서, 강도 분포의 최대값은 빔 입구의 방향으로 시프팅될 것이다. 대조적으로, 빔 전과 방향에서의 개질부의 단부는 그 위치에 본질적으로 고정되어 있는데, 이는 그러한 위치가 입사 레이저 빔(3)의 빔 중심에 의해 에너지를 공급받기 때문이다. 또한, 이러한

거동이 변형된 역 준-베셀 빔형 빔 형상에 대해서도 관찰될 수 있다는 것에 주목하자. 예를 들면, 도 23 내지 도 26과 관련하여 논의되는 바와 같은 플랫폼 빔 형상의 경우, 개질부의 단부의 위치는 빔 직경의 변화시에 본질적으로 변하지 않는다. 그러한 변화된 입사 강도 프로파일에서, 또한 빔 정형 요소는 결국 최적화된 플랫폼 구조를 더 이상 초래할 수 없고, 그에 따라 이것은 강도의 변조 및 결국 시작부의 변이를 초래할 수 있다.

[0098] 도 7은 실제 강도 증대(71)가 엑시콘과 같은 빔 정형 광학기기(73)에 의해 생성되는 빔 유도를 설명하는 역할을 한다. 이것은 알려진 형태의 준-베셀 빔에 대응한다. 그리고, 강도 증대(71)는 망원경 시스템(75)에 의해 위크피스(9) 내로 이미징되어 초점 구역(77)을 형성한다. 도 7에 도시된 바와 같이, 그러한 셋업에서, 특히 짧은 셋업 길이가 실현되어야 하는 경우, 실제 강도 증대(71)가 망원경 시스템(75)의 원거리장 광학기기(79)를 손상시킬 위험성이 있다. 가상 이미지의 개념을 구현하는 본 명세서에 개시된 광학 시스템(예를 들면, 도 3 참조)은 빔 유도 광학기기에 대한 그러한 손상의 위험성을 회피하게 된다.

[0099] 도 8은, 완벽을 기하기 위해, 도 7의 셋업에서 기인하는 Z 방향으로의 종방향 강도 분포(81)를 도시하고 있다. 초기의 급격한 증가(81A)후에, 강도 최대값에 도달하고, 강도가 다시 감소하기 시작한다. 보다 낮은 강도에서, 느린 소멸 하강(81B)(작은 구배의 소멸 하강)이 시작된다. 도 4 및 도 8의 종방향 강도 분포(61 및 68)의 대체적인 역전을 알 수 있고, 여기서 종료부에서의 "확실한 경계"가 "확실한 시작부(hard beginning)"로 대체되어 있다.

[0100] 그러한 준-베셀 빔에 있어서, 입사 가우스 빔 프로파일(83)을 갖는 레이저 빔의 엑시콘 통과는 중첩된 빔 부분(85A, 85B)을 초래하고, 그것의 강도 가중이 실제 종방향 강도 분포(81)(처음에는, 가우스 빔 프로파일(83)의 중심 영역의 강도의 중첩, 그 후의 가우스 빔 프로파일(83)의 낮은(외측) 강도의 중첩)을 초래한다. 설명을 위해, 다시 개략적인 강도 코스(87A 및 87B)가 원거리장 광학기기(79)의 하류에 도시되고, 강도 코스(87A' 및 87B')가 초점 구역(77)의 하류에 도시되어 있다.

[0101] 가상 강도 증대의 개념을 구현하는 광학 시스템의 다양한 예시적인 구성이 하기에서 설명되기 전에, 도 3 및 특히 근거리장 광학기기(33B)에서의 횡방향 출력 강도 프로파일(51)이 다시 참조된다. 출력 강도 프로파일(51)의 영역에서, 예를 들어 개구(50)가 초점 구역에 기여하는 부분에 영향을 미칠 수 있다. 개구 개방부의 배향 및 폭과, 대체적인 개구의 형상에 따라서, 종방향 강도 분포(61)의 개질부가 세장형 초점 구역(7)에 야기될 수 있고, 심지어 조정될 수 있다. 회전 대칭의 - 도 3 및 도 7에 도시됨 - 출력 강도 프로파일(51) 또는 도 14에서의 각각의 대칭적인 위상 분포의 경우, 빔 축 주위로의 개구의 회전은 초점 구역(7) 내의 개질부의 배향의 회전을 야기할 수 있다.

[0102] 개구(50)의 그러한 기계적인 제어는 예를 들어 이전에 논의되고 하기 도면들과 관련하여 추가로 설명되는 영구 기록된 DOE의 회전에 의해 대안적으로 수행될 수 있거나, 프로그램가능한 DOE의 시간-종속적 설정에 의해 전자적으로 구현될 수 있다. 따라서, 각각의 레이저 절삭 및 특히 유도를 위해 의도된 레이저 가공 기계는 회전 메커니즘 및/또는 전기 제어 장치를 포함한다. 상기에서 논의된 바와 같이, 여기에서는, 역전 및 보통의 준-베셀 빔의 광학 요소 또는 출력 강도가 변형되거나 회전될 수 있다.

[0103] 이것은 특히, 투과 및 반사의 빔 정형 요소를 포함하는, 하기에서 설명되는 시스템과 관련되고, 여기서 위상 분포의 부여가 특히 굴절, 반사 또는 회절로 수행된다. 레이저 시스템(11)과 같은 전문화된 구성요소에 대한 상기 설명이 참조된다.

[0104] 근거리장 광학기기로부터 빔 정형 광학기기(73)의 거리의 관점에서, 하기의 값은 가상 이미지에 대한 고려사항과 유사하게 적용될 수 있다. 실제 빔 프로파일에 대해, 전형적으로 길이 I의 이미징될 실제 빔 프로파일의 중심이 원거리장 광학기기의 입구측 초점 거리 내에 위치된다. 그러면, 전형적인 거리는 적어도 $f_N + 2f_F + I/2 = (1+2X)f_N + I/2$ 이고, 그에 따라 $f_N + 2f_F$ 보다 크고, 다시 말해서 광학 요소들 사이의 거리와 f_F 의 합보다 크다.

[0105] 도 9는 중공 원추형 엑시콘(131A)에 의한 굴절성 빔 정형을 도시하고 있다. 이것은 중공 원추형 엑시콘(131A)의 상향에 가상의 역 준-베셀 빔 프로파일(153A)을 생성한다. 이러한 것이 도 9에 점선으로 도시되어 있고, 그러한 영역에서 실제 강도 증대는 존재하지 않는다. 또한, 도 9의 실시예에서, 원거리장 광학기기는 중공 원추형 엑시콘(131A)의 전과 방향 하류에 평면-볼록 렌즈(plano-convex lens)(133A)로서 구성된다. 근거리장 광학기기(33B)는 초점 구역(7) 내로의 레이저 빔의 포커싱을 야기하고, 그에 따라 가상의 역 준-베셀 빔 프로파일(153A)이 초점 구역(7)의 가상 광학 이미지로서 레이저 빔에 결부된다.

[0106] 도 10은 굴절성 빔 정형 요소로서 사용되는 중공 원추형 엑시콘 렌즈 시스템(131B)을 갖는 실시예를 도시하고

있다. 여기에서, 원거리장 광학기기는 중공 원추형 액시콘의 입구측에 위치되는 볼록 렌즈면(133B)으로서 빔 정형 요소에 통합된다. 이러한 셋업은 유사하게 가상의 역 준-베셀 빔 프로파일(153B)을 생성한다.

- [0107] 도 11은 반사성 빔 정형 요소, 특히 반사성 액시콘 미러 시스템(131C)을 갖는 실시예를 도시하고 있다. 빔 정형 요소의 높은 반사성 표면은 반사 액시콘의 빔 정형 특성이 포커싱 중공 미러의 원거리장 형성 구성요소와 조합되도록 형상 설정된다. 따라서, 액시콘 미러 시스템(131C)은 빔 정형 기능뿐만 아니라, 원거리장 광학기기의 기능을 갖는다. 가상의 역 준-베셀 빔 프로파일(153C)은 액시콘 미러 시스템(131C)의 후방측에, 그에 따라 레이저 빔(3)이 통과하지 않는 영역에 나타나 있다.
- [0108] 도 11에 또한 도시된 바와 같이, 빔 조정 유닛(beam adaptation unit)(13) 이후에, 레이저 시스템(11)의 레이저 빔(3)이 편향 미러(140)에 의해 광학 시스템(1) 내에 결합된다. 편향 미러(140)는 예를 들어 액시콘 미러 시스템(131C)과 근거리장 광학기기(33B) 사이에서 광축 상에 배열되고, 빔을 빔 정형 요소(131C)로 유도한다. 일부 실시예에 있어서, 편향 미러는, 잠재적으로 광학적 에러를 갖는 빔 정형 요소(131C)의 중심 영역 상으로 광을 가능한 한 적게 유도하도록, 예를 들어 중앙이 천공될 수 있다. 도 17 및 도 18과 관련하여 하기에서 설명되는 그러한 필터링의 태양에 부가하여, 여기에서는, 편향 미러(140)가 원치않는 중심 빔 부분을 동시에 차단하여, 중심 빔 부분이 근거리장 광학기기(33B)에 의해 포커싱되지 않게 하는 것에 이미 주목했다.
- [0109] 도 12 및 도 13은 디지털화된 빔 정형 요소를 갖는 광학 시스템의 실시예를 도시하고 있다. 여기에서, 디지털화는 위상 시프트 및/또는 측방향 구조(예를 들면, 픽셀 구조)에 대한 별개의 값의 사용과 관련될 수 있다. 공간 광 변조기(SLM)의 사용은 프로그램가능하거나, 또한 영구 기록되는 회절성 광학 요소(DOE)로 빔 정형을 실현하는 많은 상이한 가능성 중 하나이다.
- [0110] 예를 들어 하나 이상의 중공 원추형 액시콘의 위상 부여에 따른 하나 이상의 가상 빔 프로파일의 단순한 생성에 부가하여, 회절성 광학 요소는, 예를 들어 측방향 강도 분포를 균일화하기 위한 원하는 개질을 가능하게 한다. 이것을 위해서, 위상의 편차는 중공 원추형 액시콘 위상(및 그에 따른 역 준-베셀 빔)에 대해 50% 이하, 예컨대 20% 이하 또는 10% 이하의 범위에서 예시적으로 사용될 수 있다. 일반적으로, SLM은, 예를 들어 리소그래피적으로 생성되고 영구 기록된 DOE와 대조적으로, 측방향 조대 분해능에서 매우 미세한 위상 변화를 가능하게 한다. 영구 기록된 DOE는 예를 들어 그 두께가 위상을 결정하는 평면-평행 단차(plano-parallel step)를 포함한다. 그래서, 리소그래피 제조가 큰 측방향 분해능을 가능하게 한다. 이진 단차(binary step)는 실제 및 가상 빔 프로파일을 초래할 수 있다. 2개 초과인 많은 위상 단차만이 가상 빔 프로파일에 대한 바람직한 방향의 면에서 미분(differentiation)을 할 수 있게 한다. 예를 들면, 4개 또는 8개 이상의 위상 단차는 가상 빔 프로파일에 대한 효율적인 빔 정형을 가능하게 한다. 그러나, 이산화(discretization)는 예를 들어 필터링될 수 있는 이차 오더(secondary order)를 야기할 수 있다.
- [0111] 본 명세서에서, 위상 부여를 야기하고 평면 형상으로 구성되는 회절성 광학 빔 정형 요소의 구조 요소는, 조정 가능한 SLM 또는 영구 기록된 DOE의 경우에, 위상 마스크로서 지칭된다. DOE의 구성의 타입에 따라서, 레이저 빔 상에 위상 분포를 부여하기 위해 투과 또는 반사에 사용될 수 있다.
- [0112] 도 12에서, 공간 광 변조기(31A)가 위상 부여를 위한 반사에 사용된다. 예를 들면, 공간 광 변조기(31A)는 개별 픽셀에 프로그램가능한 위상 시프트를 가능하게 하는 "실리콘 액정(liquid crystal on silicon)"(LCOS)에 기초한다. 또한, 공간 광 변조기는 미세 시스템(micro-system; MEMS), 미세 광학 전자 기계 시스템(micro-opto-electro-mechanical system; MOEMS), 또는 미세 미러 매트릭스 시스템(micro-mirror-matrix system)에 기초할 수 있다. SLM에서, 픽셀은 예를 들어 횡방향 입력 강도 프로파일 상에 특정 위상 부여를 야기하도록 전자적으로 제어될 수 있다. 전자적 제어성은, 예컨대 피가공 재료에 따라서 또는 레이저의 변동에 반응하여, 예를 들어 위상의 온라인 설정 및 그에 따른 초점 구역의 조정을 가능하게 한다. 도 12의 구성에 있어서, 가상의 역 준-베셀 빔 프로파일의 생성을 위한 회절성 액시콘의 기능은, 예를 들어 공간 광 변조기(31A)의 위상 시프팅에 의한 원거리장 광학기기의 원거리장 형성 작용과 조합될 수 있다. 대안적으로, 영구 기록된 반사성 DOE는 빔 정형 요소(31A)로서 사용될 수 있다.
- [0113] 도 13은 DOE(31B)에 기초한 광학 시스템의 개략도이고, 여기서 위상 부여가 DOE(31B)에 영구 기록된다. 그러한 경우에, DOE(31B)는 투과에 사용된다. 도 12에서와 같이, 예를 들어 가상 준-베셀 빔 프로파일을 초래하는 위상 시프트뿐만 아니라, 원거리장 광학기기의 포커싱 특성이 DOE(31B) 내에 조합된다.
- [0114] 도 9 내지 도 13의 광학 시스템은 역 준-베셀 빔 프로파일에 대응하고 가상 광학 이미지에 할당되는 출력 강도 프로파일을 초래할 수 있다. 예를 들어 투과에 사용되는 보통의 액시콘을 갖는 도 9 및 도 13과 유사한 셋업뿐

만 아니라, 도 7의 광학 시스템은 (보통) 준-베셀 빔 형상의 출력 강도 프로파일을 초래할 수 있다. 국소 작용에 기초한 절삭 방법의 이용의 경우, 역 준-베셀 빔 프로파일 및 정상 준-베셀 빔 프로파일이 유사하게 사용될 수 있으며, 물론 본 명세서에 개시된 차이가 고려될 필요가 있다.

- [0115] 도 14는 DOE(31B)에 제공될 수 있는 위상 분포(243)의 예를 도시하고 있다. 위상 분포(243)는 회전 대칭이다. 그 주파수가 반경방향으로 변조되는 링 형상의 위상 분포를 알 수 있다. 링은 회전 대칭의 가상 준-베셀 빔 프로파일의 생성을 가리킨다. 주파수 변조는 빔 정형을 위한 위상 분포에서의 원거리장 광학기기의 위상 성분의 적분을 가리킨다. 도 14에서, 위상은 $\pm\pi$ 의 범위에서 나타내진다. 대안적인 구성에 있어서, 이진 위상 분포 또는 다중-단차(예를 들면, 0 내지 2π 의 위상 시프트의 범위에서 4개 이상의 레벨) 위상 분포와 같은 별개의 위상 분포가 DOE 위상 마스크에 구현될 수 있다.
- [0116] 도 15 및 도 16은 강도 단면(도 15) 내에서 및 2D-상면도(도 16)에서 출력 강도 프로파일(251)을 예시적으로 도시하고 있다. 강도 최대값(249)이 빔 축(45) 주위로 링 형상으로 연장된다는 것을 알 수 있다. 빔 중심에는 거의 어떠한 강도도 없다.
- [0117] 일부 실시예에 있어서, 예를 들어 가우스 빔 형상을 갖는 위상-변조되지 않은 잔류 빔이 대응적으로 링 형상의 강도 프로파일에 중첩되도록, 역 준-베셀 빔으로의 변환은 완료되지 않는다. 도 15는 그러한 위상-변조되지 않은 빔 부분(252)을 일점쇄선으로 개략적으로 도시하고 있다.
- [0118] 도 15에서의 그러한 강도 분포의 최대값(249)은 원래의 입력 강도 프로파일(예를 들면, 가우스 빔 프로파일)이 횡방향 출력 강도 프로파일의 영역에서 변형되지 않은 강도 극대값의 일 예이다. 링 구조의 회전 대칭은 역 준-베셀 빔 프로파일의 회전 대칭으로 인한 것이다. 대안적인 실시예에 있어서, 강도 극대값은 방위각 범위에 제한된다. 또한, 방위각 제한되고 및/또는 링 형상인 극대값의 중첩이 주어질 수 있다.
- [0119] 역 준-베셀 빔 형상의 출력 강도 프로파일의 생성을 위해 굴절성 증공 원추형 액시콘(도 9 및 도 10 참조)을 사용하는 경우, 원치않는 빔 부분이 액시콘의 불완전한 팁에서 원치않는 각도로 생성될 수 있다. 회절성 빔 정형 요소의 경우에도, 원치않는 빔 부분이 나타날 수 있다. 예를 들면, 무시할 수 없는 위상-변조되지 않은 빔 부분, 또는 레이저 빔의 원거리장에서의 추가 차수의 회절이 존재할 수 있다.
- [0120] 본 명세서에 개시된 광학 시스템은, 원거리장 구성요소를 이용함으로써, 그러한 방해 빔 부분을 필터링하는 필터의 삽입 및 형상 선택을 단순화한다. 특히, 이러한 원치않는 빔 부분은 푸리에 평면의 영역에서 단순한 방식으로 원하는 빔 부분(이용가능 빔)과 분리될 수 있다.
- [0121] 도 15의 위상-변조되지 않은 빔 부분(252)을 참조하여, 도 17은 도 3에 도시된 광학 시스템에 기초한 예시적인 광학 시스템을 도시하고 있다. 그러나, 추가적으로 위상-변조되지 않은 부분의 필터링은 이미징 시스템(33)의 푸리에 평면의 영역에서 수행된다. 예시적으로, 도 17에는 공간 필터 요소(220)가 근거리장 광학기기(33B)의 상향에 도시되어 있다.
- [0122] 필터 유닛(220)은 예를 들어 위상-변조되지 않은 빔 부분(252)의 가우스 강도 분포 - 도 15에 도시됨 - 를 차단하는 빔 축(45) 주위의 중심 영역을 포함한다. 필터 요소(220)는 반경방향 더 외측에 위치되는, DOE 또는 SLM에 의해 보다 높은 차수의 회절을 차단하기 위한 섹션을 추가로 포함할 수 있다.
- [0123] 일반적으로, 필터 유닛(220)은 본 명세서에 개시된 다양한 굴절성, 반사성 또는 회절성 빔 정형 요소의 산란 방사선뿐만 아니라, 위상-변조되지 않은 기본 모드 및 보다 높은 회절 차수의 억제를 위해 제공된다. 회절 대칭의 출력 강도 프로파일의 경우, 통상적으로 필터 유닛도 회전 대칭으로 이루어진다. 일부 실시예에서는, 필터 유닛(220)의 일부 부분만이 제공되거나, 전혀 필터링이 제공되지 않는다.
- [0124] 회절성 빔 정형 요소는 위상-변조되지 않은 빔 부분을 억제하기 위한 다른 접근법을 허용한다. 이를 위해서, 위상-변조된 빔 부분을 편향시키기 위해 추가적인 위상 기여부(contribution)가 부여된다.
- [0125] 도 18은 예를 들어, 회절성 광학 요소(31)가 선형 위상 기여부를 추가로 구비하는 광학 시스템을 도시하고 있다. 선형 위상 기여부는 위상-변조된 빔(203A)의 편향(230)을 초래한다. 위상-변조되지 않은 빔 부분(203B)은 편향되지 않고, 예를 들어 필터 유닛(222) 상에 충돌한다.
- [0126] 도 19는 스캔 접근법의 구현을 위해 원거리장 구성요소의 사용을 추가로 이용하는 광학 시스템의 다른 실시예를 도시하고 있다. 일반적으로, 스캔 시스템은 특정 범위 내에서의 초점 구역(7)의 시프팅을 허용한다. 일반적으로, 근거리장 포커싱으로부터 빔 형상의 분리에 의해, 특히 체적 흡수에 호적한 텔레센트릭 스캔(telecentric scan) 접근법을 제공하는 것이 가능하다. 일부 실시예에 있어서, 위치뿐만 아니라 각도도 설정될 수 있다. 따

라서, 그러한 스캐너 시스템은 미세한 윤곽을 워크피스 내에 기록하게 할 수 있다.

- [0127] 도 19의 구성에서, 스캐너 미러(310)는 근거리장 광학기기(333B)의 이미지축 초점 평면에 위치된다. 스캐너 미러(310)는 그 측부에 위치한 근거리장 광학기기(333B) 상으로 출력 강도 분포 범위의 레이저 빔을 편향시킨다. 푸리에 평면에서의 편향은 워크피스에서의 전파 방향이 위치의 변위에도 불구하고 유지되게 한다. 스캐닝 영역 자체는 근거리장 광학기기(333B)의 크기에 의해 결정된다.
- [0128] 스캐너 미러(310)가 근거리장 광학기기(333B)의 초점 평면에 정확하게 위치되지 않은 경우, 또는 그에 대해 이동될 수 있는 경우, 세장형 초점 구역의 배향, 특히 도 2에서의 Z 방향으로부터의 각도 편차가 설정될 수 있다.
- [0129] 도 13에 도시된 광학 시스템에 따른 구성의 도움으로, 도 20은 기본적인 이미징 특징을 예시적으로 설명한다. 광학 시스템은 원거리장 광학기기로서도 작동하고 그에 따라 초점 거리(f_f)에 의해 특징지어지는 빔 정형 요소(31)를 포함한다. 또한, 광학 시스템은 초점 거리(f_N)에 의해 특징지어지는 근거리장 광학기기(33B)를 포함한다. 도 20에서, 원거리장 광학기기와 근거리장 광학기기의 초점 평면은 일치한다. 따라서, 도 20에서는, 하나의 초점 평면(340)만이 점선으로 도시되어 있다. 중첩하는 초점 평면의 그러한 구성에서, 일반적으로 이미징 시스템은, 평면 파면의 입사에 대하여, 세장형 초점 구역(7) 상에 가상 빔 형상(253), 예를 들어 역 준-베셀/에어리 빔형 빔 형상의 예로서 역 준-베셀 빔 프로파일, 역 변조 또는 균일화된 준-베셀 빔 프로파일을 이미징한다.
- [0130] 그렇지만, 초점 평면이 항상 중첩할 필요는 없다. 예를 들면, 이미징 시스템은 주어진 빔 발산에 대해 조정될 수 있지만, 레이저 빔(3)이 다른 발산으로 입사할 수도 있다. 그러한 경우에, 빔 정형 요소의 전방에 위치되는 가상 광학 이미지는 여전히 세장형 초점 구역(7)에 할당되지만, 완전한 이미징일 필요는 없다. 유사한 상황일, 예를 들어 스캐너 장치와 관련하여, 이미징 시스템의 의도된 오정렬을 위해 주어질 수 있다.
- [0131] 도 20은 또한 용어 "원거리장 광학기기" 및 "근거리장 광학기기"를 나타내고 있다. 원거리장 광학기기는 원거리장 초점 거리(f_f)의 범위 내에 가상 빔 경로(253)의 원거리장을 생성한다. 이전에 이미 설명된 바와 같이, 원거리장 광학기기는 그 기능으로 분류될 수 있고, 예를 들어 빔 정형 요소 이전 및/또는 이후에 배열되고 그에 대해 변위되는 하나 이상의 구성요소로 이루어지고, 및/또는 빔 정형 요소 내에 통합될 수 있다. 근거리장 광학기기는 워크피스의 방향에서의 보다 작은 초점 거리(f_N)로 빔을 포커싱하고, 이에 의해 초점 구역을 형성한다. 따라서, 원거리장 광학기기에 대한 가상 빔 프로파일(53)의 원거리장뿐만 아니라, 근거리장 광학기기(33B)에 대한 초점 구역(7)의 원거리장이 초점 평면(340)의 영역에 위치된다. 불완전한 이미징(예를 들면, 원거리장 광학기기와 근거리장 광학기기의 비중첩 초점 평면)의 경우에도, 본질적으로 초점 구역 내에 허용가능한 강도 분포가 제공될 수 있고, 이는 근거리장 광학기기 상에 충돌하는 강도 프로파일이 약간만 변하기 때문이다.
- [0132] 예를 들면, 역 준-베셀 빔 형상의 경우, 광학 시스템 내에서 원거리장 광학기기에 의한 제1 포커싱은 근거리장 광학기기 상에의 링 크기를 조정할 수 있게 한다. 그러한 방식으로, 원거리장 광학기기는 도면에 도시된 바와 같이 일부 타입의 중간 초점까지 감소하는 링 직경 상에의 포커싱 작용을 갖는다.
- [0133] 도 21은 수렴 레이저 빔(3')이 빔 정형 요소(31) 상에 충돌하는 경우에 광학 시스템 내의 빔 경로를 도시하고 있다. 레이저 빔의 위상-변조된 부분(303A)이 세장형 초점 구역(7) 상에 포커싱된다. 입사 레이저 빔(3')의 수렴으로 인해(그리고, 결국 별도로 포커싱하는 원거리장 광학기기 또는 빔 정형 요소(31)의 위상 분포에의 통합으로 인해), 위상-변조되지 않은 부분(303B)(일점쇄선)은 전파 길이(D_p) 동안에 더 감소하고, 근거리장 광학기기(33B)의 중심 영역 상에 충돌한다. 이에 의해서, 위상-변조되지 않은 빔 부분(303B)에 대한 초점(350)이 세장형 초점 구역(7)보다 근거리장 렌즈(33B)에 근접하게 형성된다. 위상-변조되지 않은 부분은 초점(350) 이후에 강하게 발산하며, 그에 따라 위상-변조되지 않은 빔 부분(303B)에 대해 비선형 흡수를 초래하는 강도가 워크피스 내에 더 이상 도달되지 않게 한다. 그러한 구성에서, 위상-변조되지 않은 빔 부분(303B)을 필터링하지 않아도 될 수 있다.
- [0134] 그럼에도 불구하고, 위상-변조되지 않은 빔 부분(303B)이 상호작용 구역 및 워크피스에 들어가지 못하도록, 공간적으로 국소적인 필터 유닛이 초점(350)의 영역에(또는 빔이 강하게 포커싱되는 경우, 원거리장 광학기기와 근거리장 광학기기 사이에도) 제공될 수 있다.
- [0135] 다른 실시예와 관련하여, 특히 2014년 11월 19일자로 동일 출원인에 의해 출원된 우선권 출원 DE 2014 116 958.1이 참조된다. 그 출원의 내용은 그 전체가 본 명세서에 포함된다. 예를 들면, 하나 이상의 추가적인 렌

즈가 빔 발산의 조정을 위해 빔 정형 요소의 상류에 배열될 수 있다.

- [0136] 회절성 광학 요소는 입력 강도 프로파일에 걸쳐서 디지털화되고 예를 들어 픽셀 기반인 위상 조정을 허용한다. 역 준-베셀 빔 형상의 강도 분포로부터 시작하여, 종방향 플랫폼 강도 프로파일이 예를 들어 초점 구역(7)에 생성될 수 있다. 그러한 목적을 위해, 출력 강도 프로파일 내의 강도 기여부가 베셀 빔의 테일부(tail) 및 강도 최대값을 형성하는 영역으로부터 취해지고, 근거리장 광학기기(33B)에 의한 추후 포커싱에 대해, 증가 영역(61A) 및 감소 영역(61B)이 확대되거나, 멀리 연장되는 테일부가 (예를 들면, 테일부로부터의 파워를 균일화된 영역에 밀어냄으로써) 거의 회피되게 위상 변화에 의해 반경방향으로 재분포되도록, 빔 정형 요소 내의 위상 분포가 영향을 받을 수 있다.
- [0137] 개질 구역은 본질적으로 워크피스(9) 내의 Z 방향으로 동일한 크기 범위에 걸쳐 항상 형성된다. 이것은 짧은 증가 및 감소만을 갖는 본질적으로 일정한 강도에 기초하고 있다. 그러나, 에너지가 증가함에 따라, 개질 구역의 강도뿐만 아니라 측방향 범위가 증가한다.
- [0138] 또한, 측방향 및/또는 종방향 다중 스폿 위상 부여와 같은 보충적인 위상 부여가 일반적으로 근거리장 광학기기(33B)의 이미지측 초점 평면의 영역에 실행될 수 있다. 특히, 가속된 에어리 빔형 빔 형상의 형성이 가능하다.
- [0139] 일부 실시예에 있어서, 광학 시스템은, 예를 들면, 도 7에 따른 실제 강도 증대뿐만 아니라, 도 3에 따른 가상 강도 증대가 생성될 수 있도록 구성된다. 이에 의해서, 개질 구역의 종방향 범위가 넓어질 수 있다.
- [0140] 역 준-베셀 빔이 본 명세서에 개시된 굴절성, 반사성 및 회절성 광학 시스템, 예를 들면 중공 원추형 액시콘 시스템 및 DOE 시스템으로 생성될 수 있다. DOE 시스템은 예를 들어 도 14에 도시된 위상 마스크의 위상 분포에 기초할 수 있으며, 여기서 역 준-베셀 빔에 필요한 위상에 부가하여 포커싱 위상 기여부가 제공된다.
- [0141] 통상적으로, 회전 대칭의 가우스 빔 프로파일을 갖는 레이저 빔이 빔 정형 요소 상에 조사된다. 가우스 빔 프로파일은 가우스 방식으로 빔 중심을 통해 연장되는 횡방향 진폭 코스를 포함한다.
- [0142] 순수 위상 마스크로 인해, 가우스 빔 프로파일 및 가우스 진폭 코스가 가우스 빔과 유사하게 여전히 빔 정형 요소 직후에 존재한다. 그러나, 그 후에 연속적으로 커지는 발산을 야기하는 부여된 위상에 의해 유발되는 급격하게 한정된 구멍이 바로 형성된다. 동시에, 보다 높은 진폭을 갖는 링 영역이 형성된다.
- [0143] 링 영역은 내측을 향해 급격하게 한정되어, 반경방향 진폭/강도 분포에서 단차 형상으로 보여질 수 있다. 둘레 방향 단차의 플랭크는 그 빔 축/빔 중심을 향하여 있다. z 값이 증가함에 따라, 플랭크의 대향 섹션이 멀어지고, 즉 급격하게 한정된 중앙 구멍은 직경이 빠르게 커진다($D1 < D2$).
- [0144] 반경방향 진폭/강도 분포에서, 링 영역은 z 값이 점점 빠르게 증가함에 따라 외측을 향해 하강한다. 원거리장에서, 즉 예를 들어 부여된 포커싱 원거리장 작용과 근거리장 광학기기의 중첩하는 초점 평면에서, 급격한 링이 빔 프로파일 내에 형성되고, 그 후에 발산한다. 이에 의해서, 이제 급격한 에지가 외측부에 형성되고, 즉 내측 플랭크의 단차가 이제 외측을 향하여 있다.
- [0145] 빔 프로파일 및 진폭 코스의 이러한 일반적인 거동은 가우스 입력 빔으로 광학 시스템의 시험을 가능하게 하며, 여기서 처음에는 내측으로 향하는 급격한 플랭크를 갖는 구멍이 형성되고, 이에 의해 원거리장에서의 빔 축의 외측에 극대값을 초대한다. 내측 영역으로부터 뿐만 아니라 초점 구역의 영역에서 빔 프로파일의 이미징은 각각의 빔 프로파일을 식별할 수 있게 한다. 이에 의해서, 광학 시스템의 사용은 반드시 가우스 빔에 제한되지는 않는다. 또한, 도면은 이상적인 경우에 대한 산출 결과라는 것에 주목해야 한다. 예를 들면, 비이상적인 DOE가 사용되면, 보다 높은 차수의 제시된 위상-변조되지 않은 부분 또는 실제 준-베셀 빔의 부분(예를 들면, 이진 마스크의 경우)은 빔 축 상에 있을 수 있고, 강도로 "구멍"을 채울 수 있다.
- [0146] 그러므로, 역 준-베셀 빔은 진폭 코스 및 그에 따라 강도 분포에서 급격한 플랭크를 갖는 단차를 포함한다. 이것은 특히 빔 정형 요소에 근접한 영역, 예를 들어 원거리장의 절반부까지의 영역, 및 특히 빔 정형 요소의 하류에 있는 원거리장 광학기기의 초점 길이의 영역에서 내측을 향하여 있을 수 있다. 빔 축에 베이스를 갖지 않는 "단순한" 역 준-베셀 빔의 경우, 위상-변조된 빔 부분의 거의 제로로부터 최대값까지의 단차의 범위에서 진폭/강도가 증가한다. 이에 의해서, (위상-변조된 빔 부분 내의) 단차의 형성은 또한, 빔 정형 요소를 가로질러 본질적으로 일정한 반경방향 강도(반경방향 플랫폼)를 갖는 예시적인 입사 빔에 대해 주어지는데, 이는 이러한 단차가 본질적으로 빔 중심과 관련되기 때문이다.
- [0147] 원거리장 초점 평면의 상류에서의 진술한 빔 특성은 그 후에 초점 구역까지 반경방향으로 역전된다. 그러한 초점 구역 이후에, 그것은 또 한번 반경방향으로 역전되어 그 위치에 - 피가공 재료와 상호작용 없이 - 단차 형상

이 다시 형성될 수 있다. 예를 들면, 빔 프로파일은, 빔 정형 요소 이후, 또는 초점 구역 이전 또는 이후에 광학 시스템 내에 있다면, 각각의 위치에서 빔을 취함으로써 분석될 수 있다. 특히, 중앙 방해 빔의 차단을 가능하게 하는 셋업의 경우에, 초점 영역 이전 또는 이후의 위상-변조된 빔 부분의 강도 분포가 분석될 수 있다.

[0148] 이러한 맥락에서, 본 출원인에 의해 2017년 11월 19일자로 출원되고 명칭이 "광 빔 정형 요소(Optisches Strahlformungselement)"이며, 특히 빔을 정형하기 위한 광학 시스템을 논의하는 독일 특허 출원 DE 10 2014 116 957.3이 또한 참조된다. 그러한 출원의 내용은 그 전체가 본 명세서에 포함된다. 거기에서 일반적으로 설명되는 바와 같이, 그 중에서도 역 준-베셀 빔 형 빔이 레이저 재료 가공에 사용될 수 있다.

[0149] 본 명세서에 개시된 개념은 초점 구역에 종방향 및 측방향으로 영향을 미칠 수 있게 한다. 특히, 이미 구성된 위상 마스크에 대한 예로서 DOE의 사용은 레이저 빔(3) 상에의 다중 위상 분포의 동시 부여를 가능하게 한다. 역 준-베셀/에어리 빔형 빔을 생성하는 동안에, 가상 광학 이미지는 위상 분포 중 적어도 하나에 할당되고, 가상 광학 이미지는 레이저 빔에 의해 가공될 재료에 개질부를 형성하기 위해 세장형 초점 영역 내에 이미징될 수 있다. 적어도 부분적으로 중첩하는 초점 구역 또는 적어도 서로 영향을 미치는 초점 구역을 초래하는 2개의 그러한 위상 분포의 존재시에, 피가공 재료의 개질부(들) - 레이저 펄스 또는 레이저 펄스의 그룹에 의해 생성된 - 의 기하학적 형상이 형성될 수 있다.

[0150] 일반적으로, 그러한 위상 분포는 횡방향 원거리장 강도 분포(출구 강도 분포)에 하나 이상의 링 구조, 각도 범위에 제한된 링 세그먼트 구조(예를 들면, 도 28 참조), 및/또는 하나 이상의 극대값(예를 들면, 도 33 참조)을 형성할 수 있다.

[0151] 몇 개의 그러한 상 분포는 다양한 방식으로 부여될 수 있다. 위상 마스크 상에서의 세그먼트들의 연계는 가장 명백하다(예를 들면, 도 26 참조). 이들 세그먼트는 별도의 면 영역일 수 있으며, 별도의 영역은 예를 들어 서로에 대해 반경방향으로 및/또는 방위각으로 결합할 수 있고, 예를 들어 경계 영역에서 급격하게 또는 가중적으로 서로 내로 이행할 수 있다. 또한, 세그먼트는 서로 내에 적어도 부분적으로 봉입될 수 있다(예를 들면, 도 31 참조). 결국, 면으로 구성된 위상 마스크의 (면) 부분에 의해 생성되는 위상 증가는 그러한 위상 분포에 각각 할당되는 위상 기여부의 조합일 수 있다. 하기에 설명되는 DOE 구성 이외에, 예를 들면, 또한 각각 조합된 중공 원추형 액시콘 또는 (역 베셀 빔에 대한) 반사 액시콘 및 (보통 베셀 빔에 대한) 일반적인 액시콘이 면 분할을 재현할 수 있다. 따라서, 잠재적인 개념을 설명하기 위한 하기의 예가 이해되어야 하며, 그러한 개념은 이전에 논의되고 본 명세서에 개시된 위상 부여를 위한 다른 접근법에 의해 실현될 수도 있다. 일반적으로, 몇 개의 광학 요소는, 예를 들어 모든 요소(예를 들면, 중공 원추형 액시콘(들) 및 렌즈(들))의 투과 함수를 결정하고; 개별적인 위상 함수($\exp(-i(\phi_1+\phi_2+\dots))$)를 추가함으로써 DOE 내에 조합될 수 있다. 추가적으로 또는 대안적으로, 개별 투과 함수의 일부 타입의 중첩이 실행될 수 있다. 위상 분포의 결정에 대해, 처음에는 리치 등의 공보가 참조되었다.

[0152] 회전 대칭인 세그먼트의 경우, 또한 강도 분포는 회전 대칭이고, 또한 각각의 간섭 최대값은 강도/플루언스가 임계 강도/플루언스 이상일 수 있는 체적 영역에 대응한다.

[0153] 하기에 설명되는 태양은 예를 들어 회절성 광학 요소(DOE)에 의한 목표 빔 정형에 의해서, 비선형 흡수에 의해 재료 내에 생성될 수 있는 자유 전자의 밀도가 조정될 수 있다는 초기에 접근된 인식에 기초하고 있다. 결과적인 개질부를 따라서, 균열 형성이 특징하게 안내될 수 있어, 그 후에 워크피스를 분리시킬 수 있다. 또한, 정상 및 역 베셀 빔 타입은 목표 빔 정형을 위한 개구를 사용하기에 적합한 것으로 인식되고 있는데, 이는 그들이 개구를 도입하기 위한 링 형상의 원거리장을 포함하기 때문이다.

[0154] 특히 열적 또는 기계적으로 유도된 장력을 인가함으로써, 윤곽을 한정하는 균열 형성이 모든 개질부를 도입한 후에 일어나거나 개시될 수 있다. 레이저의 파라미터의 선택에 따라서, 그리고 재료에 따라서, 균열 형성은 개질부의 작성 동안에 이미 일어날 수 있다. 개질부의 생성 동안에 균열 형성을 개시하는 경우, 균열은 바람직하게 최후에 생성되는 개질부를 따르도록 안내되고, 즉 균열이 공급 방향에 대해 형성된다.

[0155] 예를 들면, 특히, 투과성 재료를 분리하기 위한 바람직한 방향의 형성에 대해, 회전 대칭에서 벗어난 강도 분포가 동시에 또는 설정된 바람직한 방향을 따라 연속적인 단계로 균형을 생성할 수 있게 한다. 다시 말해서, 강도 분포는 그것의 XY-평면에서, 즉 빔 전파 방향에 수직인 평면에서 더 이상 회전 대칭이 아니고, 대신에 예를 들어 타원형이다. 초점 구역 내에서의 강도 최대값은 증가하는 고강도의 각각의 영역에 의해 둘러싸이고, 본 명세서에서는, 특히 균열 형성에 대한 거동의 면에서, 이들 모두가 일반적으로 초점 구역의 강도 최대값으로서 이해되고, 이러한 맥락에서, 강도 최대값은 최대값 자체가 감소되지는 않는 것으로 이해되어야 한다.

- [0156] 일반적으로, 레이저 빔의 전과 방향으로의 신장 범위뿐만 아니라, 전과 방향에 대해 횡방향인 평면 내의 특히 비대칭 범위를 갖는 초점 구역이 가정된다. 유사한 형상의 개질부가 각각 생성된다. 초점 구역이, 그 범위 내에서, 초점 구역의 포락선(envelope) 내에 강도 극대값을 갖는 몇 개의 초점의 어레이를 포함하는 경우, 서브-초점 구역을 갖는 개질부의 각각의 어레이가 형성된다. 또한, 그러한 초점의 강도 분포도 전과 방향에 수직인 평면 내에서 특히 비대칭 범위를 가질 수 있다. 초점 구역의 포락선 형상이 전과 방향에 수직인 평면 내에서 평탄화되는 경우, 초점은 간접 작용에 의해 형성될 수 있고, 초점은 또한 포락선의 평탄화(flattening)에 대해 수직 방향으로 평탄화된다(도 20b 및 도 23b 참조).
- [0157] 생성된 분리 작용에 대하여, 분리 작용에 대해 각각의 임계값을 초과하는 강도 영역은 - 기본적인 레이저 파라미터 및 기본적인 재료 특성에 기초함 - 중요하다. 이것이 개별적인 서브-초점 구역에 대한 경우라면, 균열 형성에 영향을 미칠 수 있고; 포락선의 형상 내의 본질적으로 하나의 구역만이 임계값을 초과한다면, 균열 형성에 영향을 미칠 것이다.
- [0158] 도 21a 및 도 21b는 - 단일 개질부 또는 서브-초점 구역으로 인한 개질부인 경우 - 세장형 타원(400)으로서 X-Y 평면 내의 비대칭 빔 형상을 예시적으로 도시하고 있다.
- [0159] 균열 형성의 바람직한 방향의 준강제(quasi-forced) 형성은 예를 들어 개질부들 사이에 보다 긴 거리를 사용할 수 있게 하며, 즉 전체적으로 개질부가 덜 요구된다. 균열 형성의 랜덤한 바람직한 방향이 회피될 수 있으므로, 분리 자체는 개선될 수 있다. 대조적으로, 균열 형성의 "랜덤한" 바람직한 방향 자체는, X-Y 평면에서 "점" 형상이거나 공간에서 구형 또는 둥근 기둥 형상(회전 대칭)인 개질부에 대해, 예를 들어 재료 내의 (사전)장력, 재료의 곡률, 및 내재적으로 주어진 결정 구조와 같은 재료-특정 또는 분리 경로-특정 파라미터에 의해 부분적으로 설정될 수 있다.
- [0160] 본 명세서에 제안된 균열 및 유도는, 제어된 방식으로 그리고 특히 파손되지 쉬운 구조에 대해, 경계 또는 이전에 생성된 윤곽에 근접한 균열의 삽입을 허용할 수 있다. 또한, 균열 유도는 다른 가공 단계 없이 개질 동안에 일어날 수 있으며, 그에 따라 적은 프로세스 단계에 의해 시간 절약이 이루어질 수 있다.
- [0161] 바람직한 방향을 갖는 개질부를 생성하기 위해 비대칭 초점 구역을 사용하는 경우, 비대칭이 공급 방향에 평행할 수 있다. 도 21a에서, 이것은 X 방향으로의 공급 방향이다. 이것은 개질부를 따른(도 21a에서 X 방향으로의) 균열 형성을 야기할 수 있는 재료 내의 충격과의 생성을 초래할 수 있다. 즉, 재료에 따라서, 공급 방향을 따른, 예를 들어 X-Y-단면에서 타원형 형상의 정렬은 타원의 길이 축의 방향으로의 균열 형성을 야기할 수 있다. 이것은 공급 방향으로의 각각의 일련의 개질부에 의해 확대된다.
- [0162] 충격과의 생성은 종래 기술에 잘 알려져 있다. 이에 의해서, 개질부의 주위에는, 개질부 경계에 수직으로 작용하는 강한 인장 응력이 생성된다. (이후에 설명되는 도 21a에서, 이들이 실선 화살표(402)가 된다.) 그러므로, 세장형 개질부에 대하여, 최대 장력이 최대 범위(들)를 따라 생성된다. 개질부 어레이에 대하여, 개별 개질부의 작용은 축적되고, 그에 따라 비대칭 어레이에서, 분리 평면이 또한 어레이의 최대 범위의 방향으로 연장된다.
- [0163] 재료 파라미터에 의존한 적절한 빔 형상 및 레이저 파라미터의 적절한 선택의 도움으로, 비선형 흡수에 의해 재료 내에 생성되는 자유 전자의 밀도는 충격과 작용 또는 열적 신장이 분리 평면 및/또는 균열을 삽입하는데 사용될 수 있도록 설정될 수 있다. 재료, 정밀도, 가공 속도, 및 분리 라인들 사이의 거리와 같은 다른 경계 조건에 따라서, 하나 또는 다른 작용이 더 유리할 수 있다.
- [0164] 개질부의 생성시에, 공급 방향으로 비대칭으로 용융된 체적이 예를 들어 타원 형상의 XY-단면에서 (특히 저점도로) 생성되는 경우에도, 그러한 정렬은 비대칭 방향, 예를 들어 타원의 길이 축의 방향으로의 균열 형성을 야기할 수 있다.
- [0165] 비대칭 초점 구역이 바람직한 방향을 갖는 개질부를 생성하는데 사용되는 경우, 공급 방향을 가로질러 비대칭이 또한 존재할 수 있다. 도 21a에서, 이것은 Y 방향으로의 공급 방향이다. 또한, "절삭날(cutting knife)"의 상으로부터 직감적으로 벗어나는 이러한 배향은, 일부 재료 및 빔 파라미터에 대해, 평행한 정렬 또는 회전 대칭의 강도 분포에 비하여 분리 표면의 품질을 증대시키는 결과를 달성할 수 있다.
- [0166] 개질부(일부 경우에 재료가 고점성임)의 열 팽창에 의한 신장, 및 그에 의한 도 21a 및 도 21b의 실선 화살표(402)를 따른 주위 재료 상으로의 압축력이 생성되는 것으로 추정된다. 팽창은 예를 들어 일시적 또는 영구적일 수 있다. 세장형 형상으로 인해, 압축력은 점선 화살표(404)를 따라, 즉 X 방향으로 그리고 빔 방향에 수직

인 평면 내의 강도 분포의 세장형 형상을 가로질러 인장력을 유발한다. 복수의 개질부, 특히 또한 보다 작은 범위의 작용이 서로 상에 부가될 수 있고, 그에 따라 - 도 21b에 도시된 바와 같이 - 균열(406) 또는 균열 형성의 바람직한 방향이 타원(400) 사이에 형성된다.

- [0167] 가장 투과성인 재료에 대해, 충격파뿐만 아니라 열 팽창의 사용이 균열 형성에 영향을 미치는데 이용될 수 있다고 추정된다. 야기되는 작용은 레이저 파라미터, 즉 파장, 펄스 지속기간, 반복 속도, 기본 주파수, 펄스 에너지, 펄스 그룹 에너지 등의 설정에 따라 달라진다. 충격파를 생성할 때 바람직한 방향이 비대칭 초점 구역의 최대 범위의 방향으로 형성되기 때문에, 초점 구역은 그러한 작용을 이용하는 경우에 공급 방향에 평행하게 되어야 한다. 열 팽창 동안에, 바람직한 방향이 최대 범위를 가로질러 생성되기 때문에, 초점 구역은 그러한 작용을 이용하는 경우에 공급 방향을 가로질러 유도되어야 한다. 다초점의 어레이의 경우, 신장된 분리 평면이 공급 방향에 평행하게 유도되는 것에 주목해야 한다.
- [0168] 타원형의 개별 개질부의 경우에, 예를 들면, 또한 장력만이 (균열 형성 없이도) 재료 내에 형성될 수 있고, 그 후에 재료가 사전 장력하에만 있도록 설정된다. 외부 장력을 인가하는 경우에만, 원하는 균열이 존재하는 장력의 분포를 따라 형성된다. 그래서, 몇 개의 횡방향 타원형 개질부는 타원형 베이스 형상(400)의 배향을 가로질러 연장되는 균열을 그들 사이에 생성할 수 있다.
- [0169] 일부의 경우에, 균열 형성이 단일 개질부에 대해 아직 생기지 않고, 대신에 균열은, 공급 방향으로 차례로 도입된 일련의 몇 개의 개질부에 대해서만, 앞서 도입된 개질부로부터 이후에 도입된 개질부로 또는 그 내부까지 연장되는 것으로 인식되고 있다. 이에 의해서, 공급 방향으로 개질부보다 앞서 연장되고, 그 배향을 제어하기 곤란한 균형이 회피될 수 있다. 특히, 균열 형성에 요구되는 인장 응력이 일시적인 방식으로만 형성되는 경우, 타원의 경우에서 XY-평면의 단면에 대해 도 21b에 도시된 바와 같이, 공급 방향으로 배열되는 몇 개의 개질부의 동시 형성이 유리하다.
- [0170] 특히 레이저 빔에 대해 상당히 투과성인 재료의 재료 가공에 상기 고려사항이 포함되면, 비대칭형 개질부가 레이저 빔의 전파 방향에 수직하게 형성된다. 그러한 경우에, 레이저 빔은 재료 내에 세장형 초점 구역을 형성하기 위해 적절하게 포커싱될 수 있고, 초점 구역은 평탄화 방향으로 횡방향으로 평탄화되는 적어도 하나의 강도 최대값을 포함하도록 구성된다. 도 21a 및 도 21b에 있어서, 각각의 강도 영역/강도 최대값은 Y 방향으로 평탄화된다. 또한, 전파 방향에 대해 횡방향으로(도 22C 및 도 23C와 비교하여 도 21C 참조), 및/또는 그러한 전파 방향에 대해 축방향으로(도 29 및 도 30 - 도 30은 또한 횡방향 열을 도시함 - 과 비교하여 도 21C 참조), 열이 생성될 수 있다. 또한, 비대칭 강도 최대값의 그러한 횡방향 및/또는 축방향 열은 열 방향으로 평탄화되고, 이에 의해 특히 재료 및 초점 구역이 서로에 대해 이동되는 경우, 특히 도 21a 내지 도 21c와 관련하여 본 명세서에서 설명되는 균열 형성 및 균열 유도를 위한 작용을 야기할 수 있고, 그에 따라 연속적인 레이저 펄스에 대해 공급 방향에서 횡방향으로 변위된 개질부가 생성되고, 이 개질부를 따라 예를 들어 각각의 정밀도로 균열 형성이 일어나야 한다. 레이저 파라미터 및 재료 특성에 따르면, (초점 구역의 평면 상에 있든지 서브-초점 구역의 평면 상에 있든지 간에) 개질부는, 비대칭 형상의 길이 방향을 따르든지 이를 가로지르든지 간에, 균열 형성을 위한 상기에서 설명된 바람직한 방향을 생성할 수 있다.
- [0171] 도 21c는 도 21b의 도시를 이웃하는 강도 분포의 어레이에 옮긴 것이고, 강도 분포는 Z 방향으로 추가적으로 변조된다. 즉, 개별적인 타원체(410)는 상하로 또는 나란히 배열되고, 예를 들어 Z 방향으로 정렬된다. 각 타원체(400') 주위에는, (여기서는 실선) 화살표(404)를 따른 인장 응력에 의해 생성될 수 있는 잠재적인 분리 구역(406')의 장력 분포가 표시되어 있고, 분리 구역(406')은 함께 분리 평면(410)의 형성을 초래할 수 있다.
- [0172] 일반적으로, 그러한 장력은, 또한 Z 방향으로 정렬된 개질부들 사이에 Z 방향으로 또한 존재할 수도 있다. 분리 평면(410)은 타원체(400')에 의해 생성된 인장 응력(404')의 합산으로부터 생긴다.
- [0173] 하기에, 초점 구역의 비대칭의 생성에 대한 예가 개시되어 있다. 한편으로, 개구(도 3 및 도 7에서의 개구(50) 참조)는 이미지 시스템(33)의 영역, 특히 초점 평면(340)에서 두께 및 배향이 설정될 수 있는 슬릿(slit)을 형성하게 한다. 개구에 대한 2개의 위치가 도 22a 내지 도 23d와 관련하여 설명된다. 다른 한편으로, DOE의 위상 분포를 산출함으로써 적절한 대칭이 부여될 수 있다. 도 22a 및 도 23a에 도시된 개구의 위치에 대응할 수 있는 예시적인 위상 분포가 도 24a 및 도 24b에 도시되어 있다.
- [0174] 도 22a는 개구(50)를 통과한 후의 강도 단면에서의 출력 강도 프로파일(451)을 예시적으로 도시하고 있다. 또한, 개구 개방부(460)가 도 22a에 예시적으로 도시되어 있다. 2개의 강도 최대값(449)이 빔 축(45) 주위로 링 세그먼트 형상을 연장되는 것을 알 수 있다. 빔 중심에는 강도가 존재하지 않는다.

- [0175] 도 22b는 빔 축(Z)을 가로지른 단면에서의 강도 분포를 도시하고, 도 22c는 초점 영역 내에서 빔 축(Z)을 통한 단면에서의 강도 분포를 도시하고 있으며, 이러한 강도 분포는 도 22a에서의 경계 영역을 차단하는 결과일 수 있다.
- [0176] 도 22b 및 도 22c는 전파 방향으로의 약 5개의 강한 강도 최대값의 열을 갖는 세장형 초점 구역(477)을 도시하고 있고, 거의 유사한 강도를 갖는 강도 최대값이 Z 방향으로 수백 μm 의 영역에 걸쳐 재료 내에 도달할 수 있다. 간섭 최대값(461)은 빔 축을 가로지른 단면에서 본 명세서에서 대체로 타원형으로 지칭되는 종방향으로 변형된다. 간섭 최대값의 길이방향 축은 열의 방향을 가로질러 정렬된다. 도 21b의 고려사항에 따르면, 타원의 길이 축을 가로질러 그리고 대응적으로 도 22b에서 Z 방향을 따라 균열 형성을 야기하는 재료 및 레이저 파라미터의 경우, 재료는 대응적으로 간섭 최대값(461)의 열을 따라 분리된다.
- [0177] 도 23a에 도시된 보다 작은 개구 개방부(460')에 대하여, 도 23b 및 도 23c는 간섭 최대값(461)의 수가 개구를 폐쇄할 때 증가하고, X 방향으로의 타원 변형부가 증가하는 것을 도시하고 있다. 세장형 초점 구역(477)은 이제 10개 초과인 강도 최대값(461)을 나타낸다.
- [0178] 도 23d는 1030 nm의 파장인 약 7 ps의 지속기간의 이중 펄스로 알루미늄실리케이트(alumosilicate) 유리(고릴라 글래스(gorilla glass))의 재료 가공에 대한 예이다. 125 μJ 의 전체 에너지는 200 μs 의 시간적 거리로 조사되는 62.5 μJ 의 2개의 단일 펄스 에너지에서 기인한다. 가공은 예를 들어 2 kHz의 기본 주파수로 수행된다.
- [0179] 보통 및 역 베셀 빔-타입은 개구의 삽입을 위한 링형 원거리장을 포함하기 때문에 개구 사용의 경우 세장형 초점 구역을 생성하기에 특히 적합하다.
- [0180] 비대칭을 생성하기 위한 양 방법 모두는 재료 가공의 프로세스에 조정 가능성을 허용할 수 있다. 예를 들면, 기하학적 형상은 개구의 두께를 통해 설정될 수 있다. 작은 슬릿은 타원이 보다 넓어지게 할 뿐만 아니라, 예를 들어 공급 방향으로 더 타원이 되게 한다.
- [0181] 예를 들면, 개구의 폭은 개질 구역을 단축하기 위해 절삭될 반경에 대해 보다 넓게 개방될 수 있다. 추가적으로 또한 대안적으로, 곡선의 트래킹(tracking)은 빔 프로파일의 정렬에 의해 지원될 수 있다. 예를 들면, 전체 광학 시스템 또는 워크피스가 회전될 수 있다. 또한, (회전 대칭의 입력 빔을 가정하면) 개구 및/또는 DOE가 빔 축 주위로 회전될 수 있고, 그에 따라 바람직한 방향이 재료 가공 동안에 변경될 수 있다. 또한, 온라인 조정가능 위상 분포가 사용될 수 있다. 특히, 개구에 대하여, 개구의 양 측부가 동기적으로 변경될 수 있거나, 개구의 측부가 개별적으로 제어될 수 있다.
- [0182] 일반적으로, 개질부는, 균열(예를 들면, 전방)의 우연한 빗나감(swerve)을 회피하기 위해, 생성된 장력이 어레이의 단부에서 감소하도록 생성될 수 있다. 유사하게, 개질부는 어레이가 보다 큰 장력을 "후방을 향해" 형성하도록 생성될 수 있고, 그에 따라 균열은 앞서 도입된 개질부로 연장된다. 그 결과는 일종의 균열과 함께 하는 유도 또는 균열을 트래킹(추종)하는 유도이다.
- [0183] 예시적으로, 도 24a, 도 24b는 그러한 재료 내로 연장되는 초점 구역의 선형 어레이의 X-Y-평면(빔에 대해 횡방향으로) 및 Y-Z-평면(빔을 따라)에서 강도 분포(477')의 각각의 단면도를 도시하고 있다. 어레이 내의 강도가 공급 방향(V)에 대해 증가함을 알 수 있다(여기서, 공급은 음의 Y 방향으로 수행됨). 따라서, 균열 형성은 이전 개질부를 향해 연장될 수 있다. 그러나, 아직 가공되지 않은 재료를 향하는 방향에서, 균열 형성에 대한 경향이 감소된다. 그러한 강도 분포는 특정의 DOE-위상 분포에 의해 및/또는 다중 빔의 중첩에 의해 생성될 수 있다.
- [0184] 대안적으로, 방사선장은, 회전 대칭 방사선장 및 부분 방사선장을 사용할 때에도 원하는 비대칭을 달성하기 위해, 변위 방식으로 재료 내에 결합되는 2개 이상의 부분 방사선장으로 분리될 수 있다.
- [0185] 도 25a 및 도 25b는, 개구의 사용에 대해 대안적으로, 각각 구성된 DOE를 도시하고 있다. 위상 마스크상의 위상 분포가 방위각 분할을 가짐을 알 수 있다. 2개의 세그먼트는 - 각각이 중심에 각각 위치한 삼각형의 직각 피크부를 갖는 삼각형 형상으로 - 서로 대향하여 있다. 세그먼트들 사이에 위치한 위상 마스크의 영역은 광을 관심이 없는 공간 영역으로 산란시키는 위상 분포를 갖는 2개의 대향 세그먼트를 형성한다. 일반적으로, 입사 가우스 빔은 빔 정형 요소의 중심이 입사 빔의 빔 축과 일치하도록 빔 정형 요소 상으로 지향된다.
- [0186] 도 25b의 DOE에 사용되는 각도 범위는, 여기서 타원 형상의 신장 및 초점 구역에서의 강도 최대값의 수의 증가가 또한 야기되도록, (도 23a에서의 개구 개방부와 유사하게) 감소된다.
- [0187] 도 25a 및 도 25b의 위상 분포는 명백하게 회전 대칭이 아니다. 각각의 DOE의 회전은 - 마찬가지로 빔 축 주위

로의 선형 개구 개방부의 회전과 유사하게, 초점 구역의 각각의 회전 및 그에 따른 균열 형성을 위한 바람직한 방향의 배향의 변화를 초래하는데, 이는 X 방향을 따른 빔 부분이 "X"-세그먼트(970A)의 위상 분포에 종속되고, Y 방향을 따른 빔 부분이 "Y"-세그먼트(970B)의 위상 분포에 본질적으로 종속되기 때문이다.

- [0188] 흔히, 원하는 분리 평면과 일치하지 않는 균열 형성을 위한 바람직한 방향이 형성된다. 이것은, 예를 들어 이방성 워크피스, 예컨대 수정에 의해, 워크피스 대칭의 대칭 편차에 의해, 또는 예를 들어 수직 입사로부터 벗어난 빔 입사에 대한 빔 입구면 또는 곡선형 빔 입구면으로 인한 비점수차(astigmatism)에 의해 야기될 수 있다. 흔히, 그러한 "랜덤한" 바람직한 방향은 가공을 방해한다. 빔 프로파일의 특정하게 설정된 비대칭에 의해, "랜덤한" 바람직한 방향은 유리하게 오버스티어링(oversteering)될 수 있고, 원하는 바람직한 방향으로 전환될 수 있다.
- [0189] 요약하자면, 공급에 대한 빔 프로파일/바람직한 방향의 배향은 공급 방향에서의 향상된 분리를, 특히 보다 신속하게, 보다 효율적으로, 고품질의 보다 강건한 분리를 허용할 수 있다.
- [0190] 일반적으로, 비대칭에 기초한 본 명세서에 개시된 균열-지원 분리의 경우, 강도 분포는 재료 내에만 도입될 수 있거나, 하나 또는 양쪽 표면까지 연장되도록 도입될 수 있다.
- [0191] 또한, 다중 스폿 구성 이외에, 변조된 강도 분포가 또한 사용될 수 있으며, 변조는 빔 방향으로 및/또는 빔 방향에 대해 횡방향으로 존재할 수 있다.
- [0192] 다시 말해서, 특히 개구의 사용이 균열 길이를 윤곽에 적합화할 수 있게 한다. 예를 들면, 공급 방향으로의 짧은 연장이 뾰족한 곡선 및 에지에 설정될 수 있고, 공급 방향으로 긴 범위가 직선형 분리 라인에 대해 설정될 수 있다.
- [0193] 도 26은 방위각 분할에 의한 위상 마스크의 위상 분포(970)를 도시하고 있다. 한쌍의 "X" 세그먼트(970A)는 - 각각이 중심(빔 축에 대응함)에 각각 위치된 삼각형의 직각 피크부를 갖는 삼각형 형상으로 - 서로 대향하여 있다. "X" 세그먼트(970A)들 사이에 위치된 위상 마스크의 영역은 - 또한 중심에 위치된 삼각형의 직각 피크부를 갖는 삼각형 형상으로 - 2개의 대향 세그먼트(970B)를 형성한다. 일반적으로, 입사 가우스 빔은 빔 정형 요소의 중심이 입사 빔의 빔 축과 일치하도록 빔 정형 요소 상으로 지향된다.
- [0194] 도 26의 예에 있어서, 개별 세그먼트들 사이에서의 위상 분포의 이행이 급격하게 일어난다. 도 26의 위상 분포는, X 방향을 따른 빔 부분이 "X"-세그먼트(970A)의 위상 분포에 종속되고, Y 방향을 따른 빔 부분이 "Y"-세그먼트(970B)의 위상 분포에 본질적으로 종속되기 때문에, 명백하게 회전 대칭이 아니다.
- [0195] 도 27 및 도 28은 X 방향에서의 강도 분포(971A), 및 원거리장 초점 평면에 형성될 수 있는 강도 분포에서의 XY-뷰의 중심 부분(971B)을 도시하고 있다. 도 26의 위상 마스크가 포커싱 위상 부분을 포함하지 않기 때문에, 따라서 이러한 것은 양쪽 세그먼트에 동일한 별도의 원거리장 광학기와 함께 사용된다. 강도 분포(971A) 및 부분(971B)에서, 강도 증대의 두 부분의 외측 링 세그먼트(972A)가 반경방향 외측에 위치되어 있음을 알 수 있다. 부분(971B)에서, 강도 증대의 두 부분의 내측 링 세그먼트(972B)가 반경방향 내측에 위치되어 있음을 또한 알 수 있다. 후자는 본질적으로 X 방향($y = 0$)에서 기여부를 포함하지 않는다. 따라서, 이것은 강도 분포(971A)의 강도 증대로서 볼 수도 없다. 링 세그먼트(972A 및 972B)의 각 부분이 - 방위각 분할에 따라 - 90° 에 걸쳐 연장된다.
- [0196] 결과적으로, 도 26의 방위각 분할된 위상 마스크는 원거리장에서 비대칭 강도 분포를 초래한다. 또한, 종방향 간섭 구조가 상이한 각도 부분으로 인해 형성될 수 있다. 빔 형상의 비대칭은 세그먼트의 비대칭에 기인한다. 세그먼트의 동일한 각도 부분 및 PI의 세그먼트의 위상 시프트에 대해, 예를 들어 변조 없는 비대칭 빔 형상이 형성될 수 있고, 이렇게 생성된 역 준-베셀 빔의 거리 자체가 빔의 범위 내에 있을 수 있다. 따라서, 각각의 역 준-베셀 빔형 빔 형상의 간섭은 강도 분포의 횡방향 형태에서 비대칭/변조를 초래할 수 있다.
- [0197] 예시적으로, 도 29는 도 28에 따른 입력 강도 분포로부터 기인하는 강도 분포의 공통 세장형 초점 구역(973)을 통한 ZX 평면에서의 단면(973A)을 도시하고 있다. 도 30은 강도 분포의 ZY 평면에서의 단면(973B)을 도시하고 있다. 본질적으로 선형으로 배열된 강도 최대값(975)의 열을 볼 수 있다. 강도 최대값은 도 29에서의 단일 열로 그리고 도 30에서의 3개의 열로 큰 강도에 도달한다. 이에 의해서, 도 30에서는, Z 방향에서의 외측 열의 최대값이 내측 열에 대해 변위된다. 이제 재료 가공을 위한 공급 방향으로 Y 방향을 선택하면, 단일 레이저 펄스(또는 레이저 펄스 그룹)가 공급 방향으로 세장형인, 즉 비대칭인 초점 구역/개질 구역을 형성한다. 따라서, 초점 구역/개질 구역의 폭은 분리 방향, 즉 YZ-평면에서 감소된다. 따라서, 그 결과는 강도 최대값(975)의 3개의 "절삭" 열의 배열이다. 본 명세서에서 도 29 및 도 30의 그레이스케일 도시는 컬러 도시에 기초하고, 그

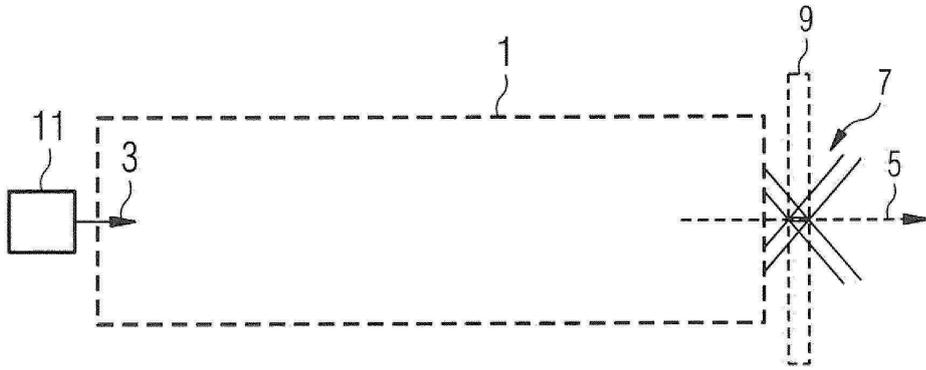
에 따라 강도/진폭의 최대값은 어렵게 도시되어 있다는 것에 주목하자.

- [0198] 다시 말해서, 위상 마스크의 분할에 의해 생성된 비대칭은, 역 준-베셀 빔 형상과 조합하여, 분리 동안에 바람직한 기하학적 방향의 형성에 사용될 수 있다. 이러한 구성에서도, 초점 구역/개질 구역의 단부 영역은 본질적으로 입사 빔의 빔 직경 및 조사된 에너지와는 독립적일 수 있다.
- [0199] 비대칭 형상을 갖는 재료(9) 내의 상호작용 공간의 다른 예가 도 31 내지 도 36c와 관련하여 설명된다. 도 31은 2개의 위상 분포의 중첩에 기초하는 위상 마스크의 위상 분포(1043)를 도시하고 있다. 각각의 위상 분포는 예를 들어 중공 원추형 액시콘으로 개별적으로 생성될 수 있는 역 준-베셀 빔에 속한다. 그러나, X 방향에서의 위상 분포의 중심은 Δx 만큼 서로에 대해 변위된다. 위상 분포(1043)는 중앙에 배열된 구형 위상과의 중첩을 추가로 포함하고, 즉 포커싱 원거리장 작용은 예를 들어 회절성 광학 빔 정형 요소로서 구성되는 위상 마스크에 통합된다.
- [0200] 도 32는 위상 분포(1048)를 부여하는 결과일 수 있는, $z = 0$ mm 내지 $Z = 250$ mm의 범위인 빔 축(Z)을 따른 단면에서의 진폭 분포를 도시하고 있다. Z 방향으로 넓어지는 어두운 중심 영역(1010A)을 볼 수 있다. 약간 측방향으로 변위된 위상 분포로 인해, 발산 간섭 구조(1034)가 중심 영역(1010A)의 반경방향 외측에 인접하는 밝은 강도 영역(1010B)에 형성된다.
- [0201] 위상 분포(1048)의 포커싱 원거리장 작용은 각각의 초점 평면에 그 강도로 구성되는 링을 형성한다. 각각의 출력 강도 프로파일(1051)이 도 33에 예시적으로 도시되어 있다. 그 범위가 X축에의 방위각 방향에서 최대인 극대값을 볼 수 있다. 방위각 범위는 X축으로부터의 거리를 링을 따라 증가시킴에 따라 감소한다.
- [0202] 도 34a는 종방향 강도 프로파일을 통한 ZX 단면을 도시하고, 도 34b는 출력 강도 프로파일(1051)의 포커싱의 결과인 상호작용 영역 내의 종방향 강도 프로파일을 통한 XY 단면을 도시하고 있다. 특히, X 방향으로 변위되고 Z 방향으로 연장되는 2개의 세장형 초점 구역(1007A 및 1007B)이 형성된다. 주요 최대값 이외에, 각각의 다수의 이차 최대값이 형성된다. 펄스 에너지 또는 펄스 그룹 에너지는, 특히 비선형 흡수에 대해, 각 초점 구역의 가장 강한 최대값 또는 가장 강한 최대값들만이 재료의 개질을 초래하도록 설정될 수 있다.
- [0203] 가공될 재료에 걸쳐 Y 방향으로 그러한 방식으로 형성된 레이저 빔을 스캐닝하는 경우, 소정 거리에 있는 2개의 개질 구역의 트랙이 형성된다. 이에 의해서, 예를 들어 바람직하게는 세장형 개질 구역들 사이의 중간 영역(1050) 내에서 분리를 시작할 수 있는 재료 내의 의도된 장력 분포가 생성될 수 있다. 예를 들면, 압축력이 개질 구역에 축적될 수 있어, 각각의 분리 프로세스를 지원하는 중간 영역에의 인장 응력의 형성을 초래한다. 여기서, X 방향이 또한 분리 방향이고, Y 방향이 공급 방향이다.
- [0204] 도 34a 및 도 34b에 도시된 바와 같은 초점 분포에 대한 충격과 생성되도록 레이저 파라미터가 재료에 따라 설정되는 경우, 강도 분포는 또한 세장형 초점 구역들(1007A 및 1007B) 사이에 분리 평면을 생성함으로써 균열 형성의 바람직한 방향을 삽입하기 위해 공급 방향으로서의 X 방향에 사용될 수도 있다.
- [0205] 회절성 광학 빔 정형 요소의 하류에 있는 각각의 광학 시스템의 강도의 전개는 - 역 준-베셀 빔형 빔 형상에 대응하여 - 반경방향 강도 분포에서의 단차 구조를 또한 갖는다. 그러나, 2개의 역 준-베셀 빔에 대한 빔 부분의 측방향 변위로 인해, 단차 구조와 겹칠 수 있는 간섭 구조(1034)가 형성된다.
- [0206] 간섭 구조(1034)에도 불구하고, 도 35a 내지 도 35c에 재현되는 $z = 10$ mm, $z = 100$ mm 및 $z = 150$ mm에 대한 빔 프로파일(1040A 내지 1040C) 내의 영역이 반경방향 내측부에 보다 높은 강도를 가짐을 알 수 있다. 도 36a 내지 도 36c는 X 방향에서 반경방향으로 연장되는 각각의 강도 분포(1042A 내지 1042C)를 도시하고 있다. 특히 도 36b 및 도 36c에서, 보다 낮은 강도의 내측 영역을 둘러싸는 급격한 플랭크(1047)의 형성을 알 수 있다. 여기에서, 강도는 느리게 감소하는 플랭크(1047)로 반경방향 외측으로 약해진다. 그러나, 플랭크의 형성은, 예를 들어 도 35a 내지 도 35c에 도시된 바와 같이, 간섭으로 인해 강하게 방향에 의존한다.
- [0207] 상기에서 설명된 예는 위상 마스크 상에 제공된 2개의 위상 분포의 값에 기초하고 있다. 그러나, 2개 초과 위상 분포가 제공될 수 있다. 예를 들면, 2개 초과 위상 분포가 반경방향 및 방위각 세그먼트에 제공될 수 있거나, 위상 단차의 조합에 포함될 수 있다.
- [0208] 하기에는, 본 명세서에 개시된 태양의 추가적인 실시예 및/또는 추가적인 개선예가 요약된다:
- [0209] 일반적으로, 원거리장 광학기기 및 근거리장 광학기기와 같은 본 명세서에 개시된 포커싱 요소는 예를 들어 렌즈, 미러, DOE, 또는 이들의 조합으로 구성될 수 있다.

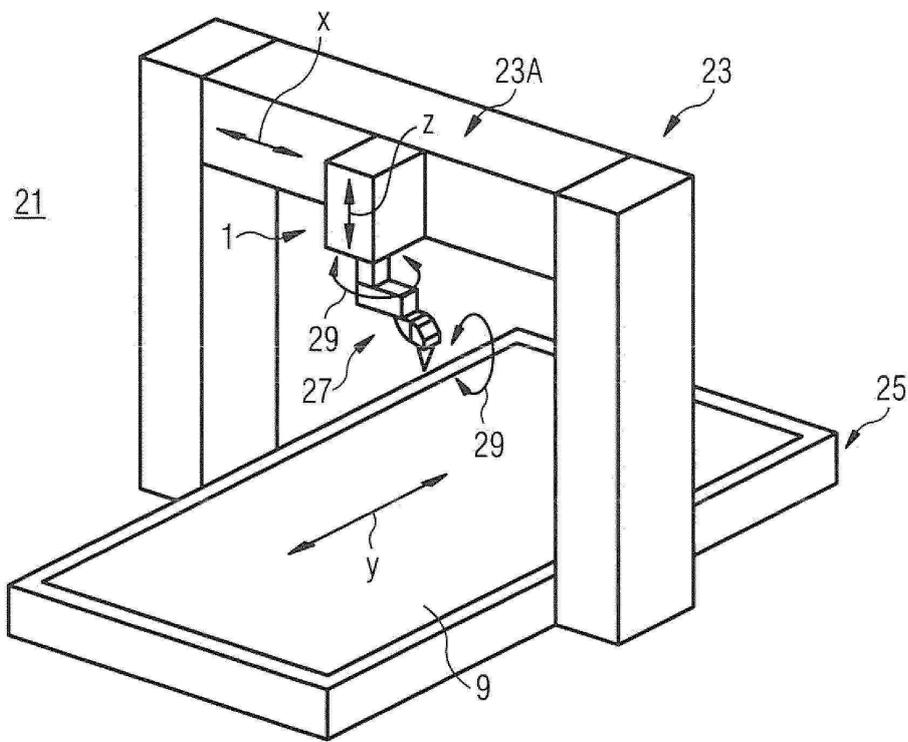
- [0210] 더욱이, 추가적인 광학 요소가 본 명세서에 개시된 실시예와 같은 광학 시스템에 삽입될 수 있다. 그 중에서도, 예를 들어 이미지측 초점 평면의 영역에서의 스캔 이동뿐만 아니라 필터 기능을 실현할 수 있도록, 중간 이미지가 이미징 시스템에 삽입될 수 있다. 이에 의해서, 예를 들어 이미지측 초점 평면(예를 들면, 도 20의 이미지 평면(340)) 자체가 추가적인 광학 시스템에 의해 이미징될 수 있다. 대안적으로 또는 추가적으로, 그러한 중간 광학 시스템은 예를 들어 스캐너 응용의 경우에 확장된 작동 거리 및/또는 작동장(working field)의 확대를 실현할 수 있게 한다.
- [0211] 회절성 광학 빔 성형 요소의 다른 개선예와 관련하여, 적어도 하나의 복수의 빔 정형 위상 분포(43)는 가우스 강도 분포를 갖는 입사 레이저 빔(3)이 가상 광학 이미지(53)에 할당된 적어도 하나의 발산 빔 영역(55A, 55B) 내로 이송되도록 구성될 수 있다. 회절성 광학 빔 정형 요소(31)의 하류에서, 발산 빔 영역은, 내측으로부터 외측으로 감소하고, 특히 위상 마스크의 포커싱 작용에 할당된 원거리장 초점 거리(f_f) 이전에 존재하는 횡방향 강도 분포(57A, 57B)를 포함하며, 및/또는 적어도 하나의 복수의 빔 정형 위상 분포(43)는 입사 레이저 빔(3)이 가상 광학 이미지(53)에 할당된 적어도 하나의 발산 빔 영역(55A, 55B) 내로 이송되도록 구성된다. 회절성 광학 빔 정형 요소(31)의 하류에서, 발산 빔 영역은, 반경방향 내측으로 향하는 급격한 플랭크(907)를 포함하는 단차형 강도 증가의 섹션을 포함하고, 특히 위상 마스크의 포커싱 작용에 할당된 원거리장 초점 거리(f_f) 이전에 존재하는 횡방향 강도 분포(57A, 57B)를 포함한다.
- [0212] 적어도 2개의 세그먼트 특정 위상 분포는 세그먼트-특정 초점 구역에 이미징될 수 있는 세그먼트-특정 가상 광학 이미지와 각각 연관될 수 있고, 각각의 세그먼트-특정 초점 구역은 개질 구역의 형성에 함께 기여하도록 서로에 대해 배열된다.
- [0213] 적어도 2개의 세그먼트는 서로 내로 적어도 부분적으로 붐입되는 공간 구조로 구성될 수 있고, 및/또는 복수의 세그먼트 중 세그먼트는 반경방향으로 및/또는 방위각으로 결합하며, 각각의 이웃하는 위상 분포들 사이의 가중된 이행은 복수의 세그먼트의 이웃하는 세그먼트의 이행 영역에 설정될 수 있다.
- [0214] 특히 세그먼트-특정 초점 영역은 서로에 대해 중첩되고 및/또는 서로 공간적으로 상보적일 수 있으며, 및/또는 가상 광학 이미지의 적어도 2개의 특히 세그먼트-특정 이미지는 간섭하면서 중첩되고, 및/또는 가상 광학 이미지의 적어도 2개의 특히 세그먼트-특정 이미지는 공통의 세장형 초점 구역을 형성할 수 있다.
- [0215] 또한, 이미지 시스템은 가상 광학 이미지의 종방향 이미지 중심의 하류의 이미지 평면을 빔 정형 요소에 할당할 수 있고, 레이저 빔의 횡방향 빔 프로파일은 빔 정형 요소에서 이미지 평면 내에 존재할 수 있다. 특히 이미지 평면의 영역에서, 초점 구역에 존재하는 측방향 빔 프로파일로부터 어두운 중심을 갖는 측방향 빔 프로파일로 종방향으로 빠른 변화가 존재할 수 있고, 후자는 특히 레이저 빔의 본질적인 측방향 가우스 빔 프로파일의 경우이고, 특히 가상 광학 이미지에 할당되는 발산 빔 영역을 생성하는 입사 레이저 빔의 빔 부분에 대한 것이고, 및/또는 광학 시스템은, 본질적으로 입사 레이저 빔의 중심 영역만이 가상 이미지에 할당된 초점 구역의 하류에 위치한 단부에 기여하고, 그에 따라 입사 레이저 빔의 빔 직경의 변화는 초점 구역의 하류에 위치한 단부의 상당한 종방향 변위를 초래하지 않는다.
- [0216] 상세한 설명 및/또는 청구범위에 기재된 모든 특징은 원래 개시의 목적뿐만 아니라 실시예 및/또는 청구범위에 서의 특징의 조합과 독립적으로 청구된 발명을 한정할 목적으로 서로 별도로 그리고 독립적으로 개시되도록 의도됨을 명확하게 기술한다. 엔티티(entity) 그룹의 모든 값 범위 또는 표시는 원래 개시의 목적뿐만 아니라, 특히 값 범위의 한계로서 청구된 발명을 한정할 목적으로 모든 가능한 중간 값 또는 중간 엔티티를 개시함을 명확하게 기술한다.

도면

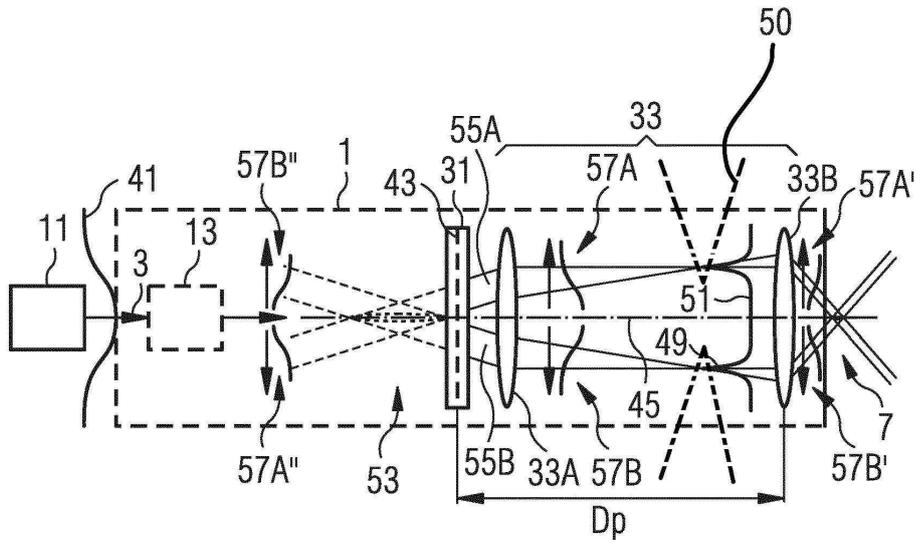
도면1



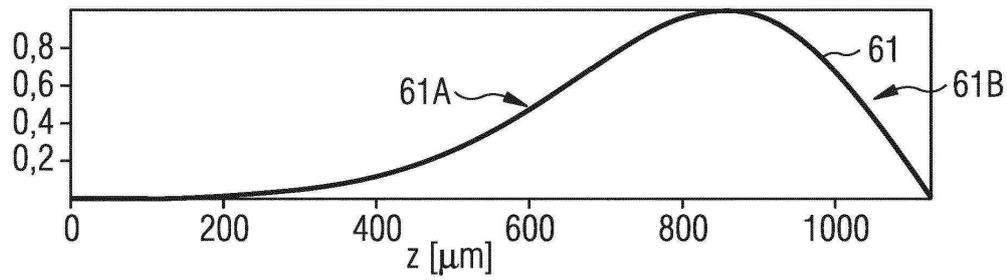
도면2



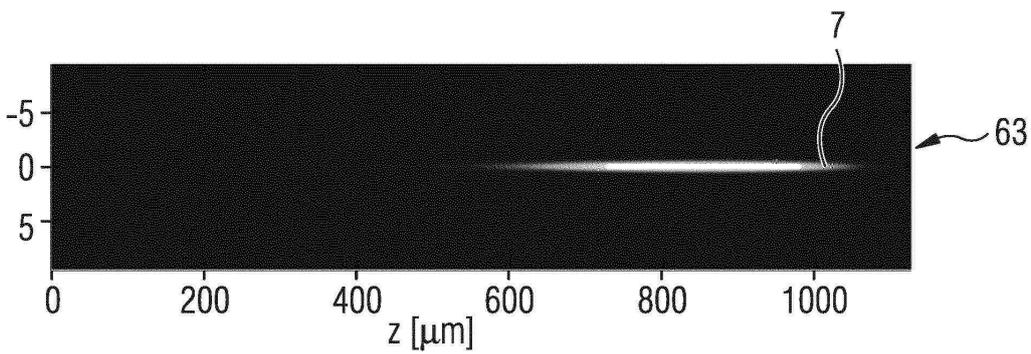
도면3



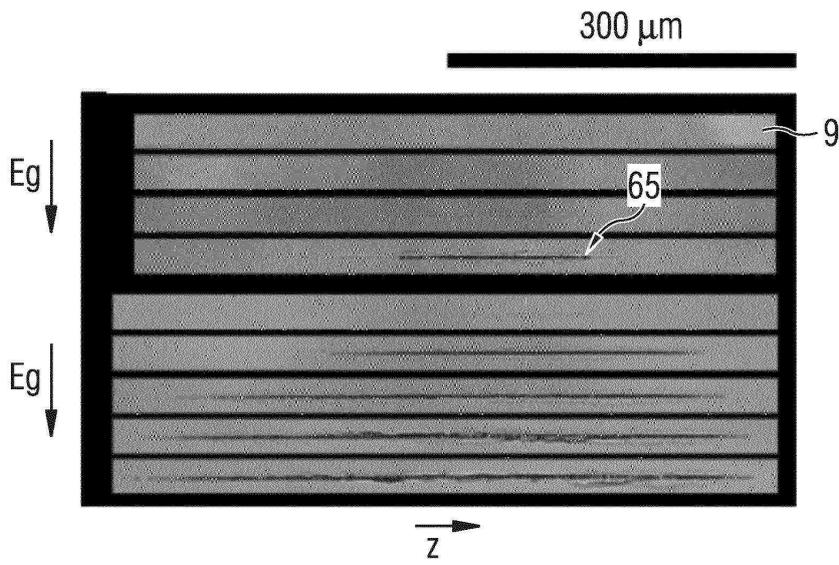
도면4



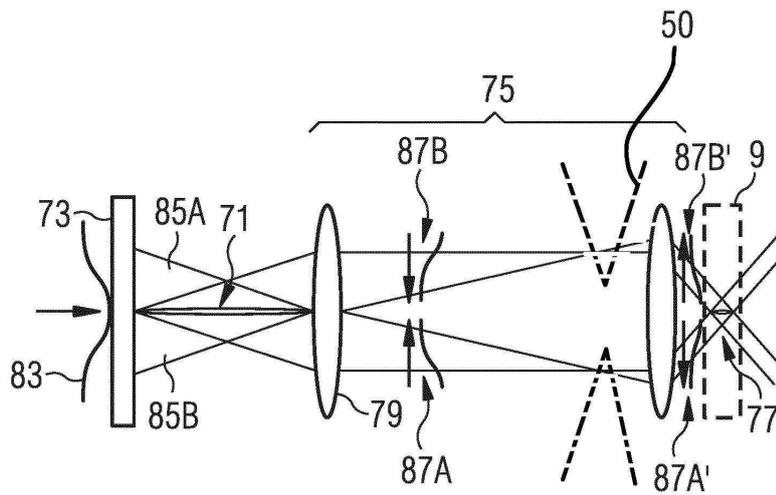
도면5



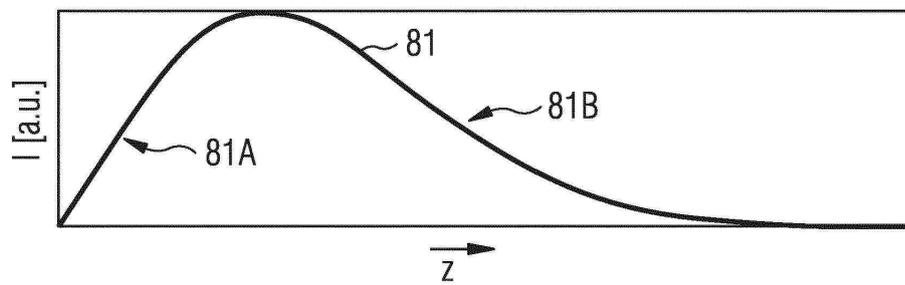
도면6



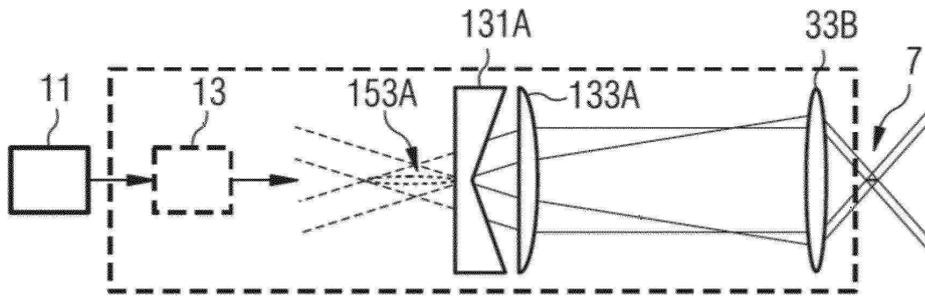
도면7



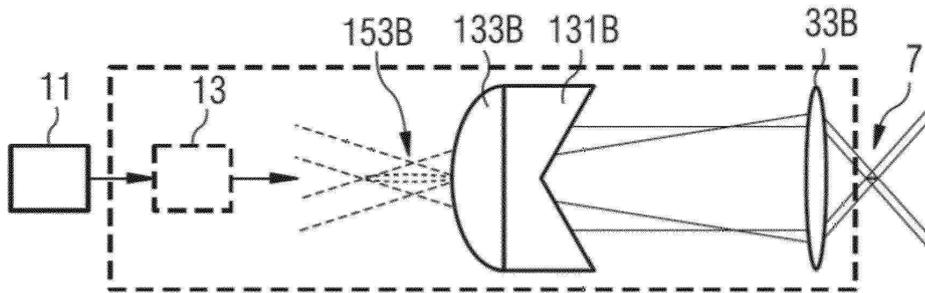
도면8



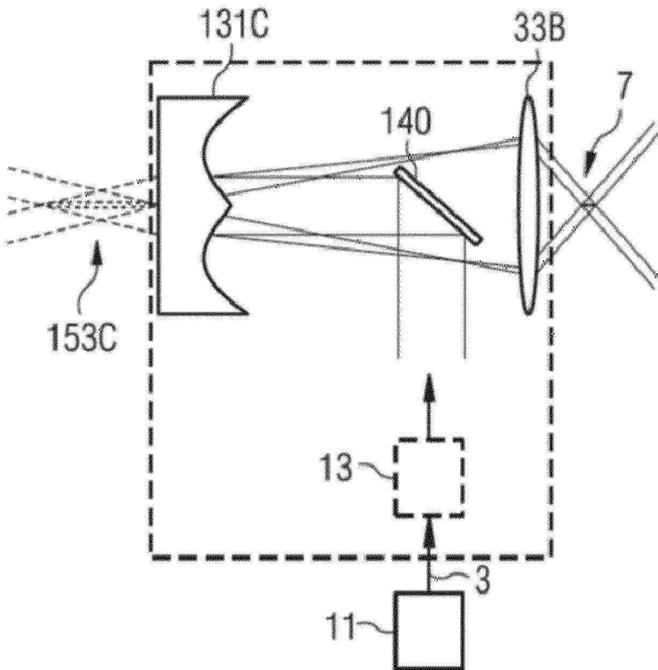
도면9



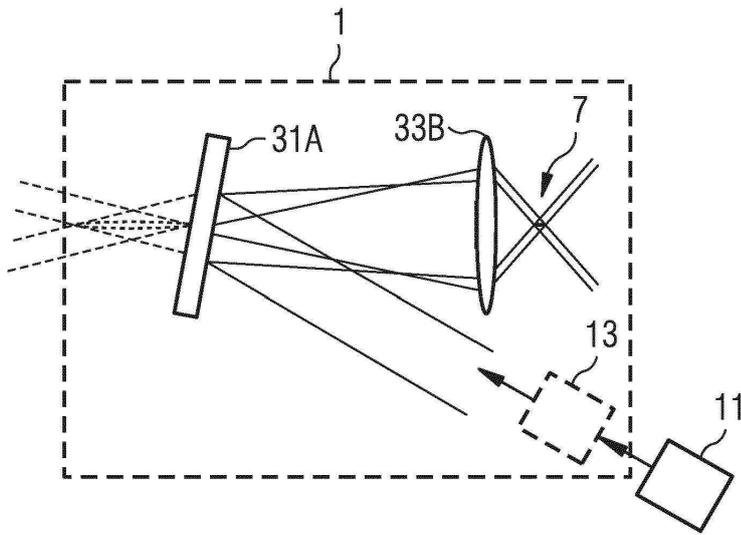
도면10



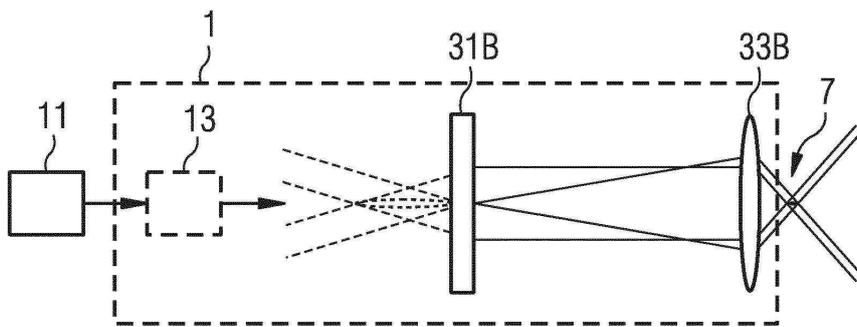
도면11



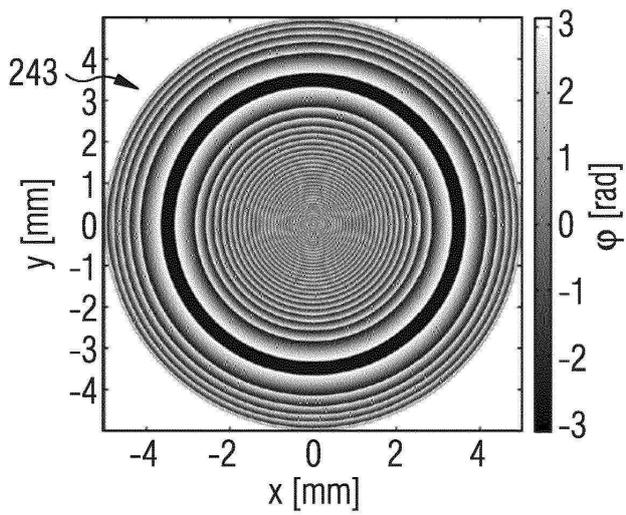
도면12



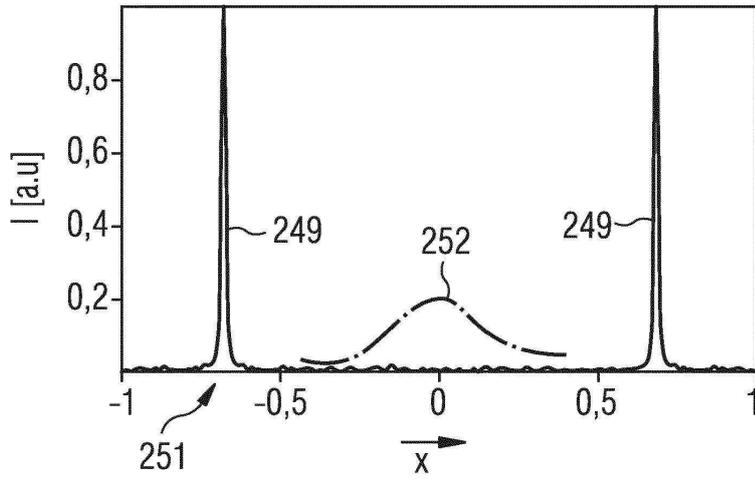
도면13



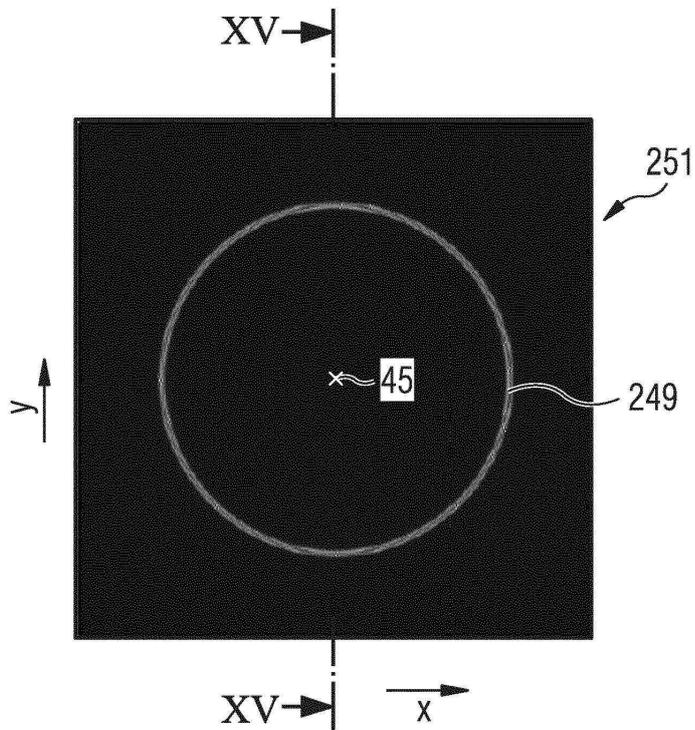
도면14



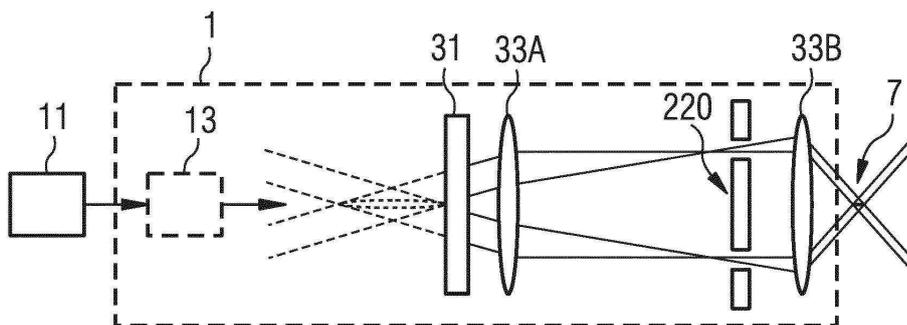
도면15



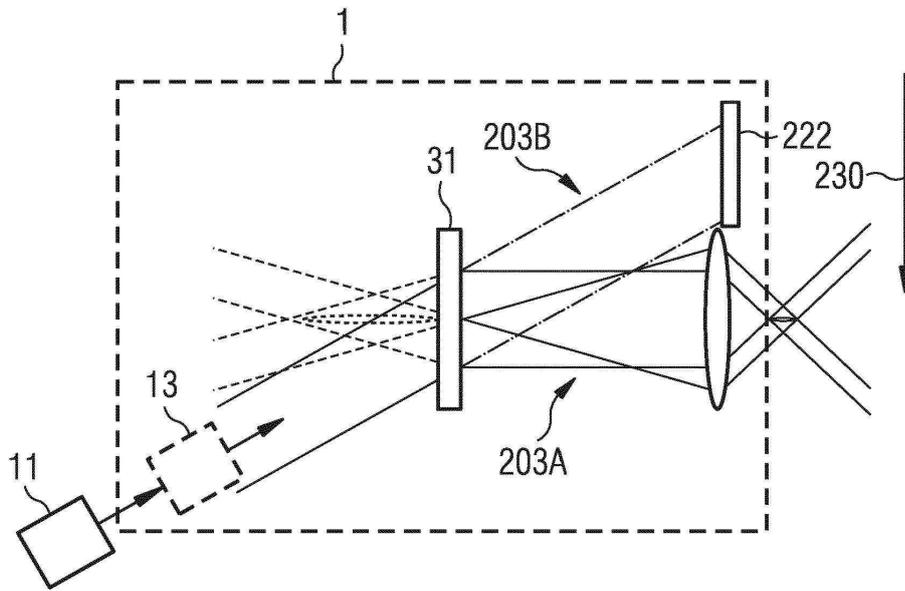
도면16



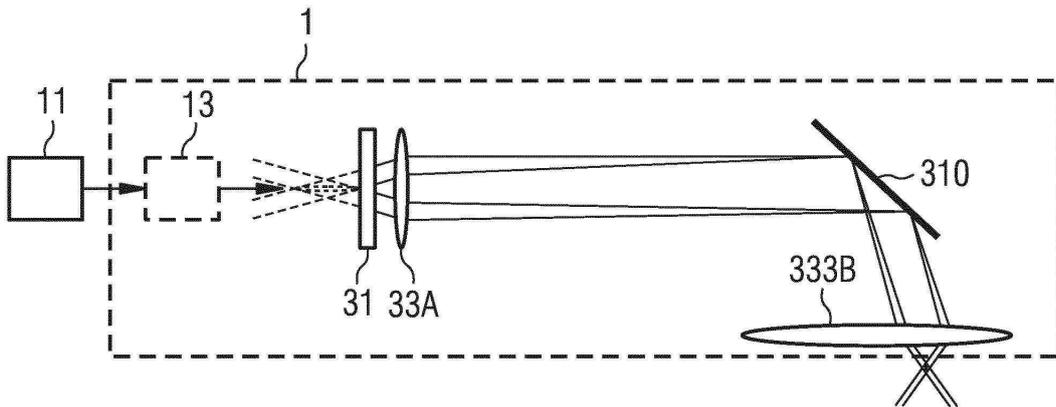
도면17



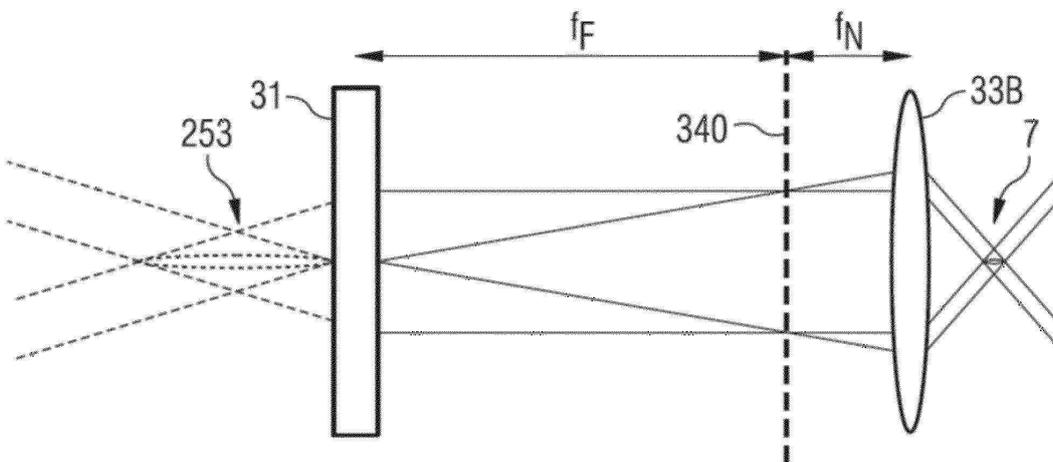
도면18



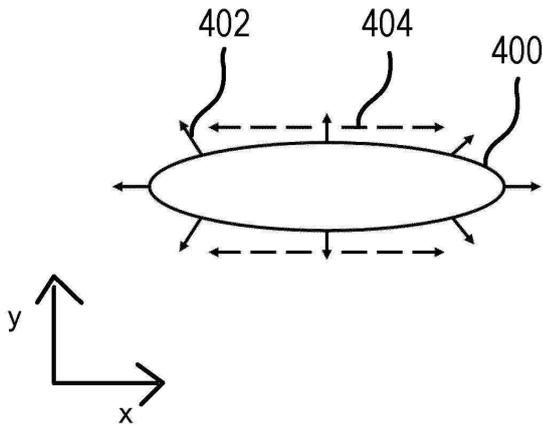
도면19



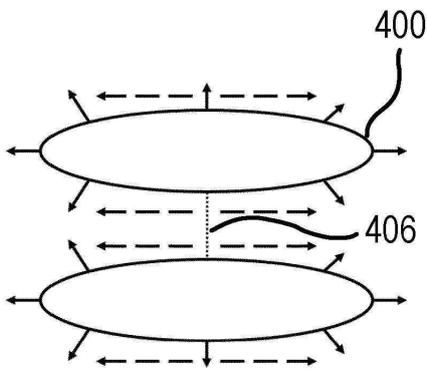
도면20



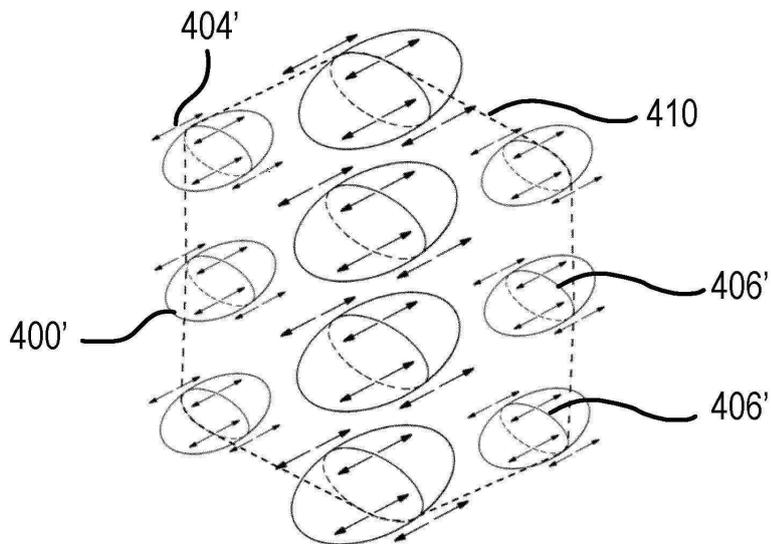
도면21a



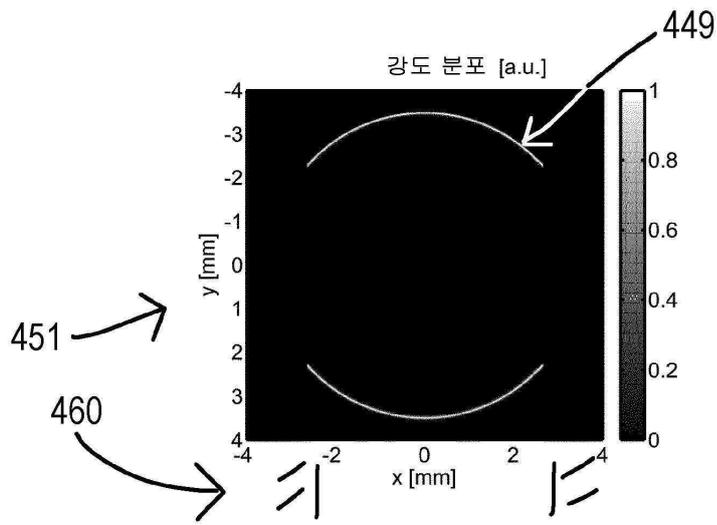
도면21b



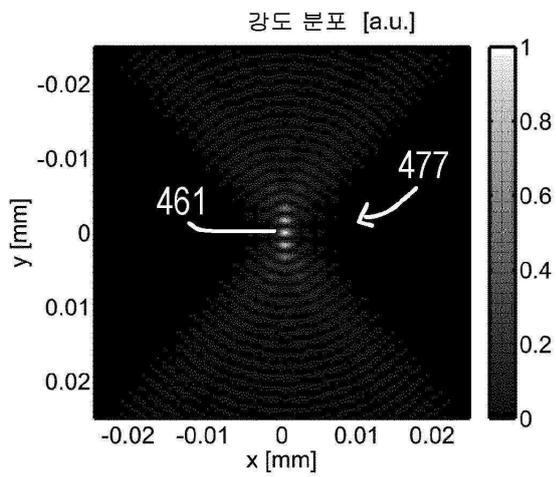
도면21c



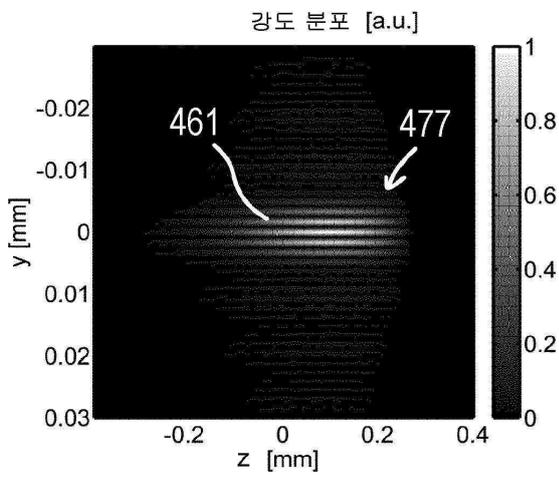
도면22a



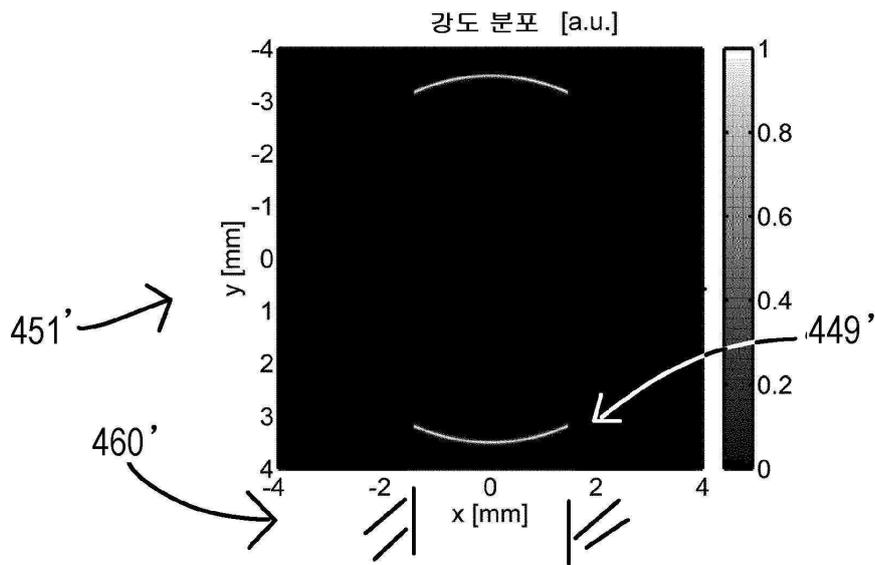
도면22b



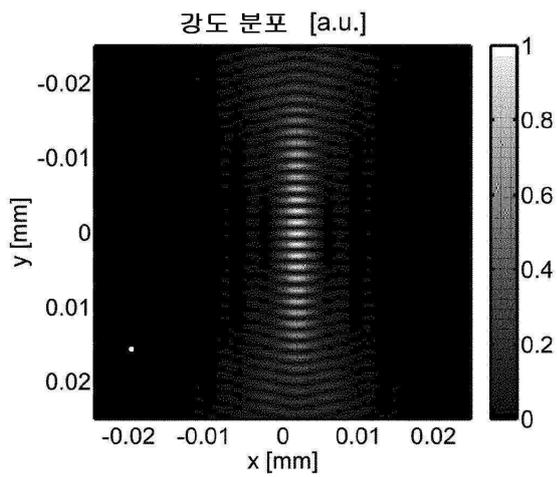
도면22c



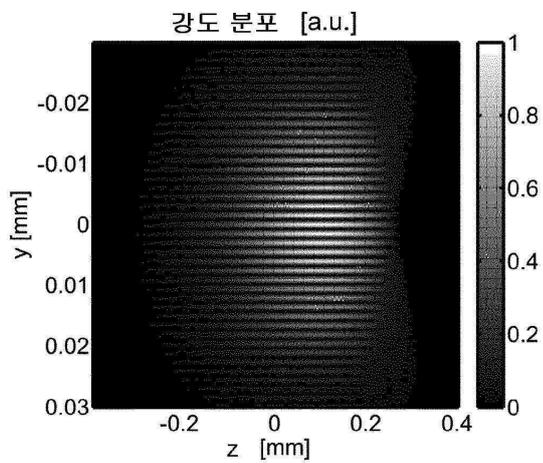
도면23a



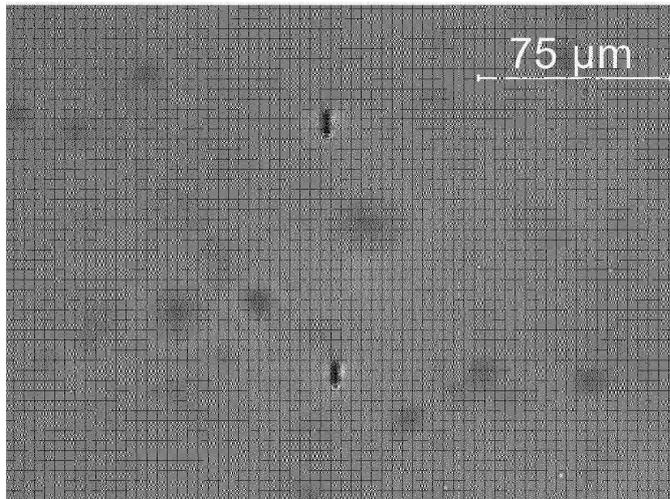
도면23b



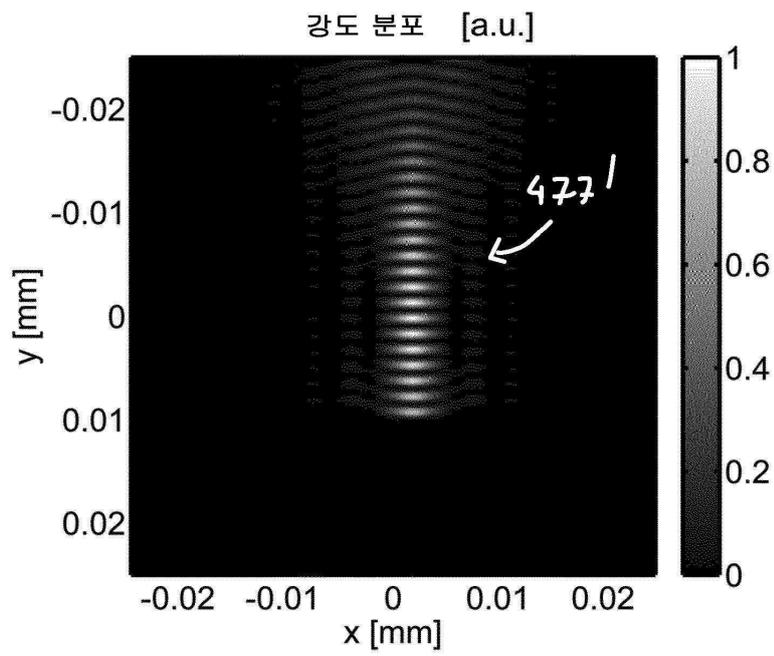
도면23c



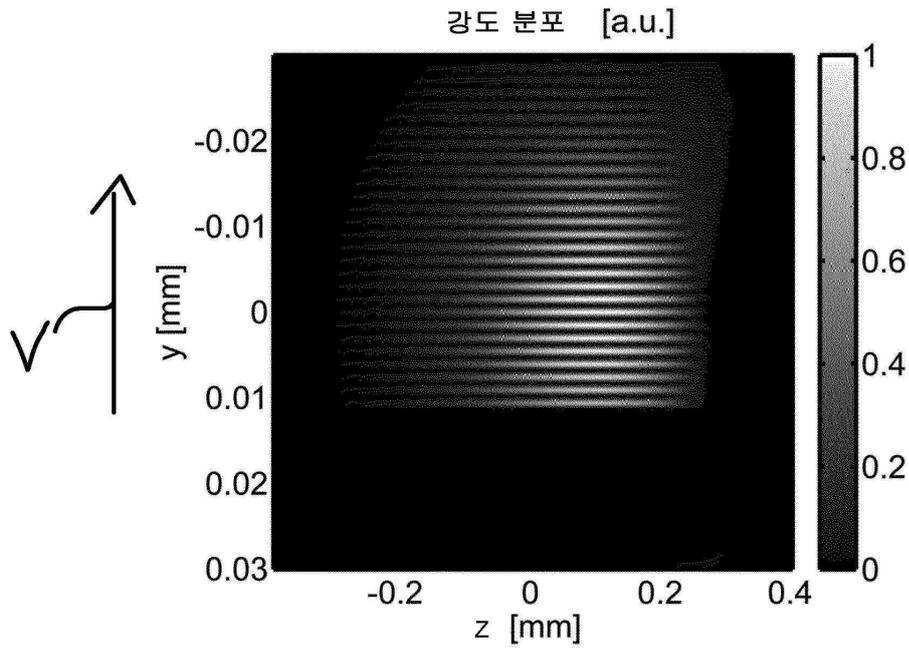
도면23d



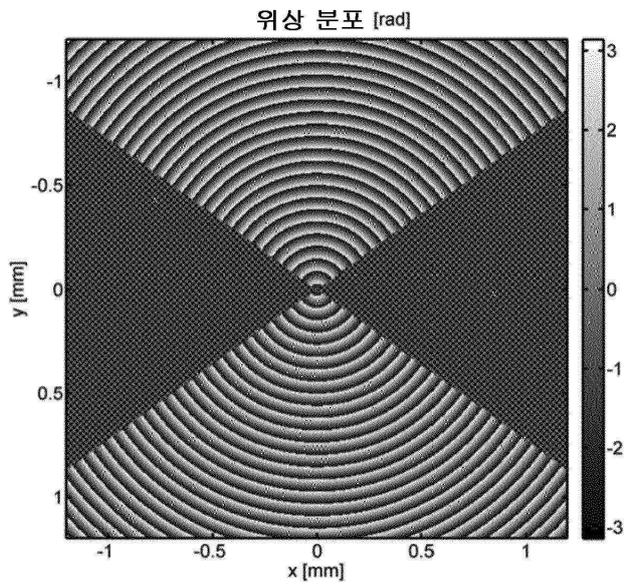
도면24a



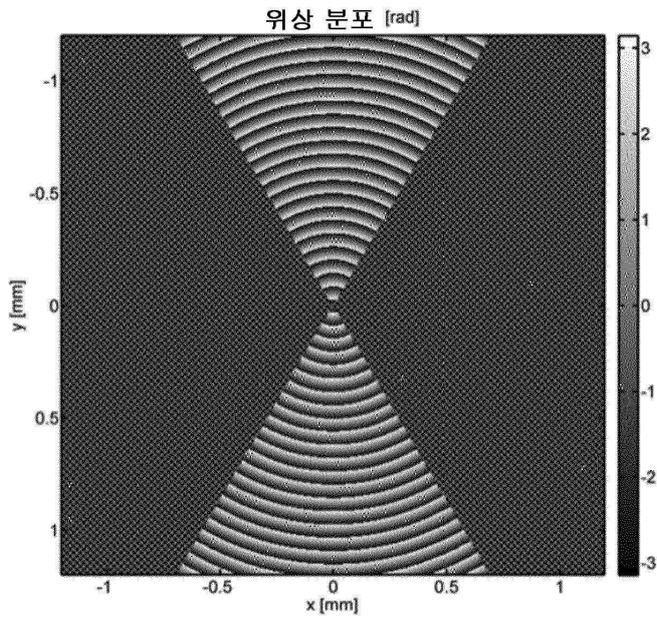
도면24b



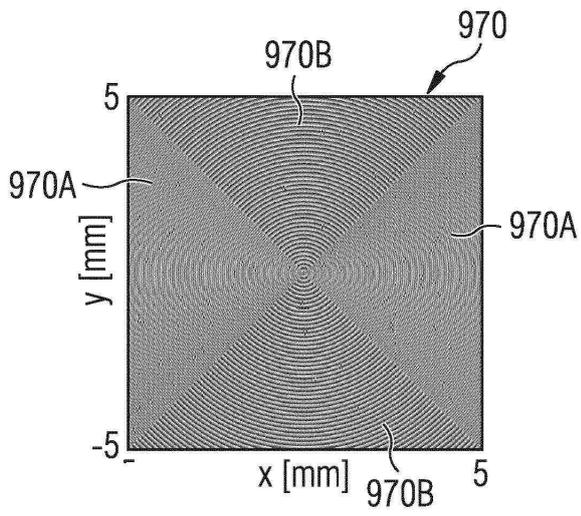
도면25a



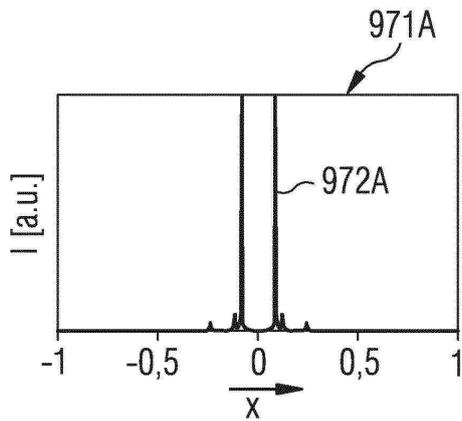
도면25b



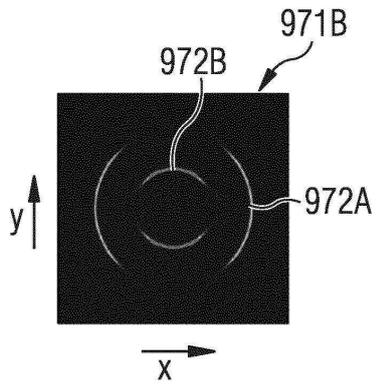
도면26



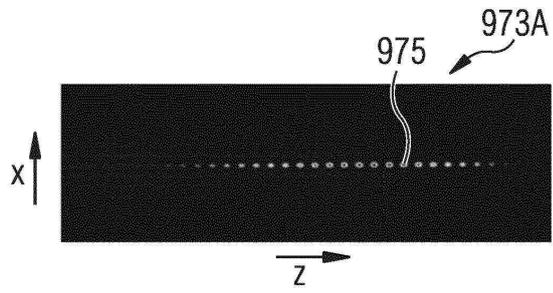
도면27



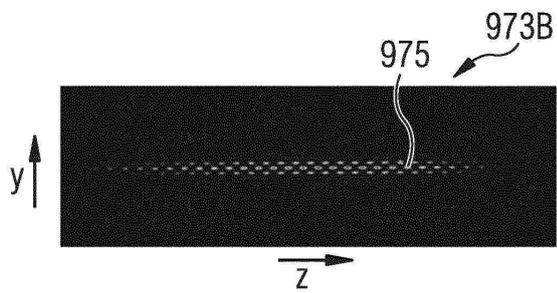
도면28



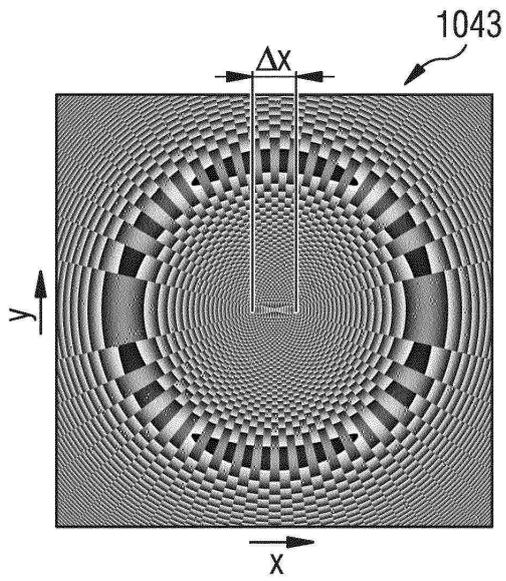
도면29



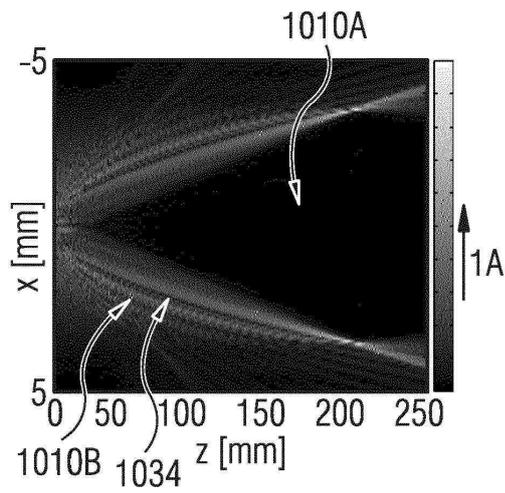
도면30



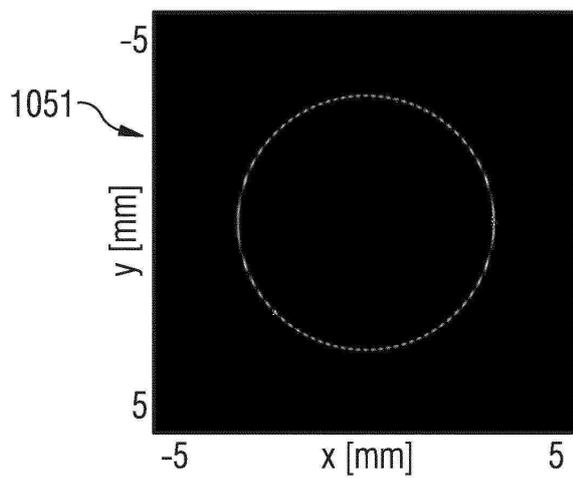
도면31



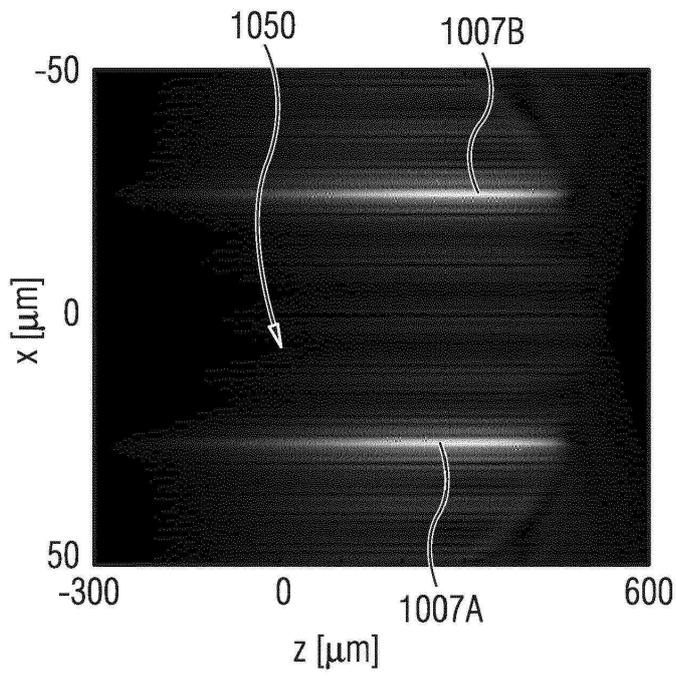
도면32



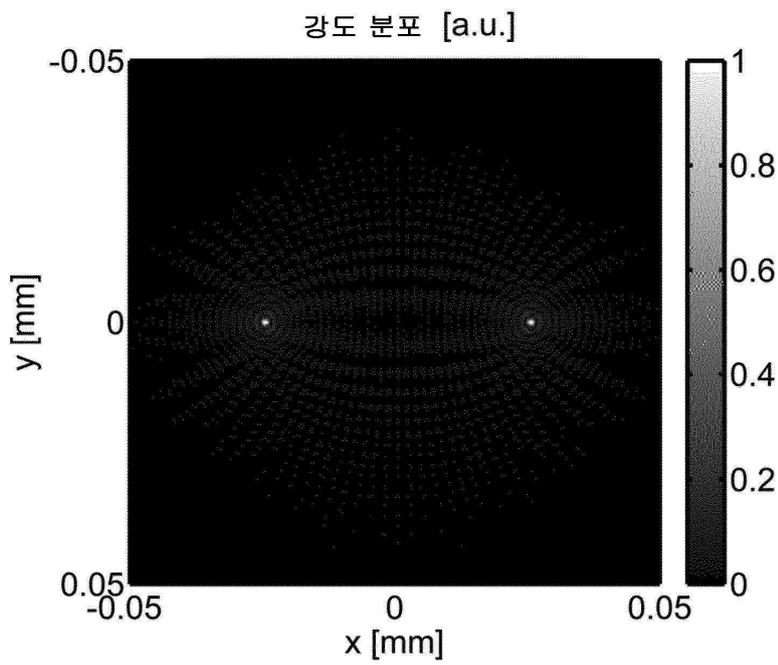
도면33



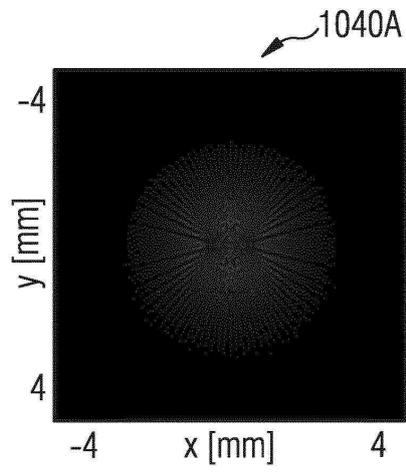
도면34a



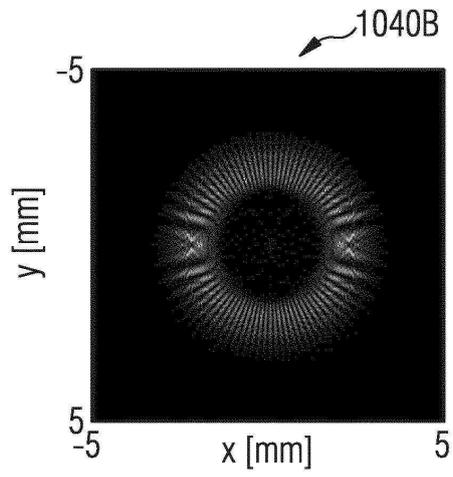
도면34b



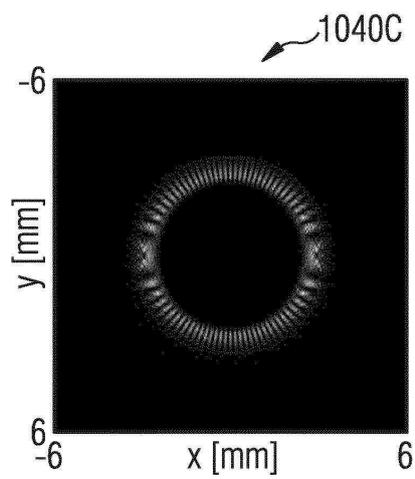
도면35a



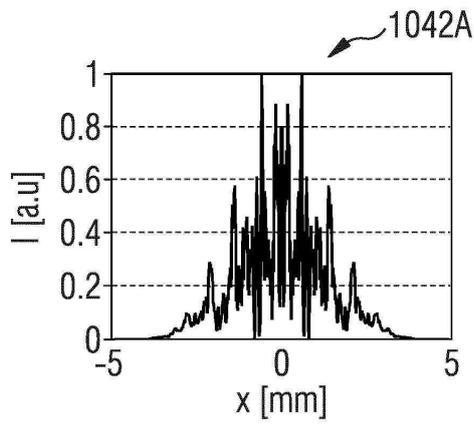
도면35b



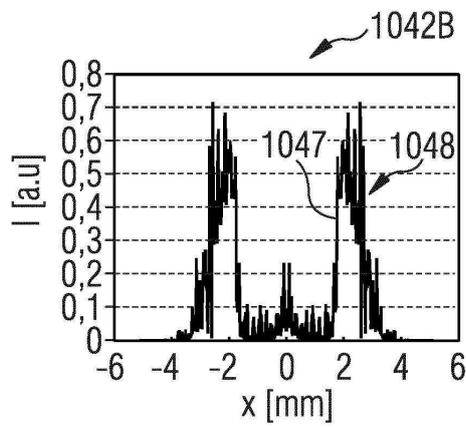
도면35c



도면36a



도면36b



도면36c

