



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2020년02월17일
(11) 등록번호 10-2078294
(24) 등록일자 2020년02월11일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
B23K 26/073 (2006.01) B23K 26/00 (2014.01)
B23K 26/06 (2014.01) B23K 26/067 (2006.01)
B23K 26/08 (2014.01) B23K 26/38 (2014.01)
B23K 26/53 (2014.01) C03B 33/08 (2006.01)
C03B 33/10 (2006.01)
- (52) CPC특허분류
B23K 26/0736 (2013.01)
B23K 26/0006 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2019-7012464
- (22) 출원일자(국제) 2017년09월28일
심사청구일자 2019년05월28일
- (85) 번역문제출일자 2019년04월29일
- (65) 공개번호 10-2019-0065335
- (43) 공개일자 2019년06월11일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2017/054168
- (87) 국제공개번호 WO 2018/064409
국제공개일자 2018년04월05일
- (30) 우선권주장
62/402,337 2016년09월30일 미국(US)
- (56) 선행기술조사문헌
JP2005288503 A
KR1020190043586 A
WO2018044843 A1

- (73) 특허권자
코닝 인코포레이티드
미국 뉴욕 (우편번호 14831) 코닝 원 리버프론트 플라자
- (72) 발명자
아카라푸, 라빈드라 쿠마르
미국, 뉴욕 14845, 호스헤드스, 헌터스 런 15 피이치, 가렛 앤드류
미국, 뉴욕 14830, 코닝, 혼비 로드 4226
(뒷면에 계속)
- (74) 대리인
청운특허법인

전체 청구항 수 : 총 13 항

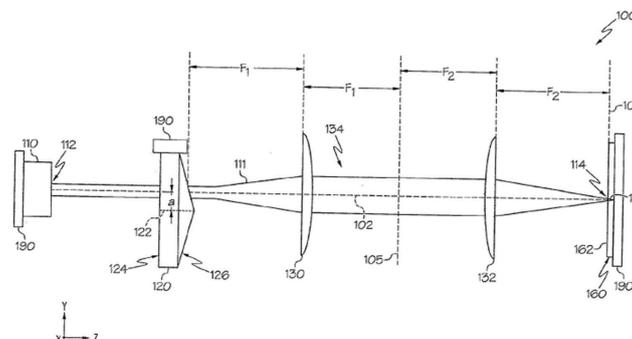
심사관 : 우귀애

(54) 발명의 명칭 비-축대칭 빔 스폿을 이용하여 투명 워크피스를 레이저 가공하기 위한 기기 및 방법

(57) 요약

투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법은, 빔 경로로부터 방사상 방향으로 오프셋되어 위치한 비구면 광학 요소를 통해 빔 소스에 의해 출력된 펄스 레이저 빔을 투명 워크피스로 지향시켜 상기 투명 워크피스로 지향된 펄스 레이저 빔의 일부가 투명 워크피스 내에 결함을 생성하는 투명 워크피스 내의 유도 흡수를 발생하는, 결함을 포 (뒷면에 계속)

대표도



함하는 윤곽선을 형성하는 단계를 포함한다. 펄스 레이저 빔의 일부는, 파장(λ), 유효 스폿 크기($w_{0,eff}$), 및 단면 x-방향의 최소 레일리 범위($Z_{Rx,min}$) 및 단면 y-방향의 최소 레일리 범위($Z_{Ry,min}$)를 포함하는 비-축대칭

빔 단면을 포함한다. 또한, 상기 $Z_{Rx,min}$ 와 $Z_{Ry,min}$ 중 더 작은 것이 $F_D \frac{\pi w_{0,eff}^2}{\lambda}$ 보다 더 크며, 여기서 F_D 는 10 또는 그 이상의 값을 포함하는 무차원 발산 계수이다.

(52) CPC특허분류

B23K 26/0608 (2013.01)

B23K 26/0648 (2013.01)

B23K 26/0676 (2013.01)

B23K 26/0869 (2013.01)

B23K 26/38 (2013.01)

B23K 26/53 (2018.08)

C03B 33/082 (2013.01)

C03B 33/102 (2013.01)

(72) 발명자

츠다, 세르지오

미국, 뉴욕 14845, 호스헤드스, 배링톤 로드 10

웨스트, 제임스 앤드류

미국, 뉴욕 14870, 페인티드 포스트, 채트필드 플
레이스 이스트 1

명세서

청구범위

청구항 1

투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법으로서, 상기 방법은:

상기 투명 워크피스 내에 결함을 포함하는 윤곽선을 투명 워크피스에 형성하는 단계를 포함하고, 여기서, 상기 윤곽선을 형성하는 단계는:

z-방향으로 빔 경로를 따라 배향되고, 상기 빔 경로로부터 방사상 방향으로 오프셋되어 위치한 비구면 광학 요소를 통해 빔 소스에 의해 출력된, 펄스 레이저 빔을 투명 워크피스로 지향시켜 상기 투명 워크피스로 지향된 펄스 레이저 빔의 일부분이 투명 워크피스 내에 유도 흡수를 발생하는 단계를 포함하며, 여기서, 상기 유도 흡수는 투명 워크피스 내에 결함을 생성하며, 상기 투명 워크피스로 지향된 펄스 레이저 빔의 일부는:

파장(λ);

상기 펄스 레이저 빔의 강도가 최대 빔 강도의 $1/e^2$ 로 감소되는 빔 전파 경로로부터 임의의 방향으로 최단 방사 거리로서 정의되는 유효 스폿 크기($W_{0,eff}$); 및

단면 x-방향의 최소 레일리 범위($Z_{Rx,min}$) 및 단면 y-방향의 최소 레일리 범위($Z_{Ry,min}$)를 포함하는 비-축대칭

빔 단면;을 포함하고, 여기서, 상기 $Z_{Rx,min}$ 와 $Z_{Ry,min}$ 중 더 작은 것이 $F_D \frac{\pi W_{0,eff}^2}{\lambda}$ 보다 더 크며, 여기서 F_D 는 10 또는 그 이상의 값을 가진 무차원 발산 계수인, 투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 윤곽선을 따라 상기 투명 워크피스와 펄스 레이저 빔을 서로에 대해 병진시켜, 상기 레이저가 투명 워크피스 내에 윤곽선을 따라 다수의 결함을 형성하는 단계를 더욱 포함하는, 투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법.

청구항 3

청구항 1에 있어서,

상기 비구면 광학 요소는 굴절 액시콘, 반사 액시콘, 왁시콘, 음의 액시콘, 공간 광 변조기, 회절 광학기, 또는 입방체 형상의 광학 요소를 포함하는, 투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법.

청구항 4

청구항 1에 있어서,

상기 무차원 발산 계수(F_D)는 50 내지 1500의 값을 갖는, 투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법.

청구항 5

청구항 1에 있어서,

상기 투명 워크피스로 지향된 펄스 레이저 빔의 일부분의 비-축대칭 빔 단면은 스폿 크기 파라미터($W_{0,max}$)를 가진 장축 및 스폿 크기 파라미터($W_{0,min}$)를 가진 단축을 포함하며, 여기서, $W_{0,max}$ 는 $W_{0,min}$ 보다 길고 종횡 비($W_{0,max}/W_{0,min}$)는 1.3보다 큰, 투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법.

청구항 6

투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법으로서, 상기 방법은:

상기 투명 워크피스 내에 결함을 포함하는 윤곽선을 투명 워크피스에 형성하는 단계를 포함하고, 여기서 상기 윤곽선을 형성하는 단계는:

z-방향으로 빔 경로를 따라 배향되고 비구면 광학 요소를 통해 그리고 광학 차단 요소 너머로 빔 소스에 의해 출력된 펄스 레이저 빔을 상기 투명 워크피스로 지향시켜, 상기 투명 워크피스로 지향된 펄스 레이저 빔의 일부가 투명 워크피스 내에 유도 흡수를 발생시키는 단계를 포함하고, 여기서, 상기 비구면 광학 요소와 광학 차단 요소는 빔 소스와 투명 워크피스 사이에 각각 위치하고, 상기 유도 흡수는 상기 투명 워크피스 내에 결함을 생성하며, 상기 투명 워크피스로 지향된 펄스 레이저 빔의 일부는:

파장(λ);

상기 펄스 레이저 빔의 강도가 최대 빔 강도의 $1/e^2$ 로 감소되는 빔 전파 경로로부터 임의의 방향으로 최단 방사 거리로서 정의되는 유효 스폿 크기($W_{0,eff}$); 및

단면 x-방향의 최소 레일리 범위($Z_{Rx,min}$) 및 단면 y-방향의 최소 레일리 범위($Z_{Ry,min}$)를 포함하는 비-축대칭 빔 단면;을 포함하고, 여기서, 상기 $Z_{Rx,min}$ 와 $Z_{Ry,min}$ 중 더 작은 것이 $F_D \frac{\pi W_{0,eff}^2}{\lambda}$ 보다 더 크며, 여기서 F_D 는 10 또는 그 이상의 값을 가진 무차원 발산 계수인, 투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법.

청구항 7

청구항 6에 있어서,

상기 방법은 상기 윤곽선을 따라 상기 투명 워크피스와 펄스 레이저 빔을 서로에 대해 병진시켜, 상기 레이저가 투명 워크피스 내에 윤곽선을 따라 다수의 결함을 형성하는 단계를 더욱 포함하는, 투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법.

청구항 8

청구항 6에 있어서,

상기 무차원 발산 계수(F_D)는 50 내지 1500의 값을 포함하는, 투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법.

청구항 9

투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법으로서, 상기 방법은:

상기 투명 워크피스 내에 결함을 포함하는 윤곽선을 투명 워크피스에 형성하는 단계를 포함하고, 여기서, 상기 윤곽선을 형성하는 단계는:

z-방향으로 빔 경로를 따라 배향되고 비구면 광학 요소를 통해 빔 소스에 의해 출력된 펄스 레이저 빔을 지향시키는 단계;

상기 빔 소스와 투명 워크피스 사이에 위치한 결어긋남 광학 요소를 이용하여 펄스 레이저 빔의 제2 빔 부분으로부터 펄스 레이저 빔의 제1 빔 부분을 결어긋나게 하는 단계, 여기서, 상기 펄스 레이저 빔의 제1 빔 부분은 상기 펄스 레이저 빔이 상기 결어긋남 광학 요소를 통과한 부분이며, 상기 제2 빔 부분은 그렇지 않은 부분임; 및

상기 펄스 레이저 빔의 제1 빔 부분과 제2 빔 부분을 투명 워크피스로 지향시켜, 상기 투명 워크피스로 지향된 펄스 레이저 빔의 제1 빔 부분 및 제2 빔 부분이 투명 워크피스 내에 유도 흡수를 발생시키는 단계, 여기서 상기 유도 흡수는 투명 워크피스 내에 결함을 형성하며, 상기 투명 워크피스로 지향된 제1 빔 부분 및 제2 빔 부분의 결합은:

파장(λ);

상기 펄스 레이저 빔의 강도가 최대 빔 강도의 $1/e^2$ 로 감소되는 빔 전파 경로로부터 임의의 방향으로 최단 방사

거리로서 정의되는 유효 스폿 크기($W_{o,eff}$); 및

단면 x-방향의 최소 레일리 범위($Z_{Rx,min}$) 및 단면 y-방향의 최소 레일리 범위($Z_{Ry,min}$)를 포함하는 비-축대칭 빔 단면;을 포함하고, 여기서, 상기 $Z_{Rx,min}$ 와 $Z_{Ry,min}$ 중 더 작은 것이 $F_D \frac{\pi W_{o,eff}^2}{\lambda}$ 보다 더 크며, 여기서 F_D 는 10 또는 그 이상의 값을 가진 무차원 발산 계수인, 투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법.

청구항 10

청구항 9에 있어서,

상기 윤곽선을 따라 상기 투명 워크피스와 펄스 레이저 빔을 서로에 대해 병진시켜, 상기 레이저가 투명 워크피스 내에 윤곽선을 따라 다수의 결함을 형성하는 단계를 더욱 포함하는, 투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법.

청구항 11

청구항 9에 있어서,

상기 무차원 발산 계수(F_D)는 10 내지 2000의 값을 포함하는, 투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법.

청구항 12

청구항 9에 있어서,

상기 결어긋남 광학 요소는 광학 지연 플레이트를 포함하고 상기 제2 빔 부분으로부터 제1 빔 부분을 결어긋나게 하는 단계는 상기 제2 빔 부분에 대해 제1 빔 부분의 광학 리타데이션을 유도하기 위해 상기 광학 지연 플레이트를 통해 펄스 레이저 빔의 제1 빔 부분을 지향시키는 단계를 포함하는, 투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법.

청구항 13

청구항 9에 있어서,

상기 제2 빔 부분으로부터 제1 빔 부분을 결어긋나게 하는 단계는:

상기 펄스 레이저 빔의 제1 빔 부분이 투명 워크피스에서 제1 편광을 포함하도록 펄스 레이저 빔의 제1 빔 부분을 편광시키는 단계; 및

상기 펄스 레이저 빔의 제2 빔 부분이 투명 워크피스에서 제2 편광을 포함하도록 펄스 레이저 빔의 제2 빔 부분을 편광시키는 단계, 여기서, 상기 제1 편광은 상기 제2 편광에 직교함;를 포함하는, 투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법.

청구항 14

삭제

청구항 15

삭제

청구항 16

삭제

청구항 17

삭제

청구항 18

삭제

청구항 19

삭제

청구항 20

삭제

청구항 21

삭제

청구항 22

삭제

청구항 23

삭제

청구항 24

삭제

청구항 25

삭제

청구항 26

삭제

청구항 27

삭제

청구항 28

삭제

청구항 29

삭제

청구항 30

삭제

청구항 31

삭제

청구항 32

삭제

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 출원은 2016년 9월 30일에 제출된 미국 가출원 번호 62/402,337의 우선권을 주장하며, 그 전체가 참고로서 본원에 포함된다.

[0002] 본 명세서는 일반적으로 투명 워크피스(workpiece)를 레이저 가공하기 위한 기기 및 방법에 대한 것이며, 더욱 구체적으로, 투명 워크피스를 분리하기 위한 투명 워크피스의 윤곽선 형성에 대한 것이다.

배경 기술

[0003] 재료의 레이저 가공 구역은 상이한 유형의 재료의 절삭, 드릴링, 밀링, 용접, 용융 등을 포함하는 광범위한 적용을 포괄한다. 이러한 공정 중에서, 특히 관심의 대상이 되는 것은 전자 장치를 위한 유리, 사파이어, 또는 박막 트랜지스터(TFT) 또는 디스플레이 재료용 융합 실리카(silica)와 같은 재료의 제조에 이용될 수 있는 공정에서 상이한 유형의 투명 기판을 절단 또는 분리하는 것이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0004] 공정 개발 및 비용 관점에서, 유리 기판의 절단 및 분리의 개선에 대한 많은 기회가 있다. 시장에서 현재 실행되고 있는 것보다 유리 기판을 분리하는 빠르고, 깨끗하고, 저렴하고, 반복 가능하며, 신뢰성 있는 방법을 갖는 것이 큰 관심사다. 따라서, 유리 기판을 분리하기 위한 대안적인 개선된 방법이 필요하다.

과제의 해결 수단

[0005] 하나의 실시예에 따라, 투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법은 투명 워크피스에 윤곽선을 형성하는 단계를 포함하며, 상기 윤곽선은 투명 워크피스의 결함을 포함한다. 윤곽선을 형성하는 단계는 빔 경로를 따라 배향되고 상기 빔 경로로부터 방사상 방향으로 오프셋(offset)되어 위치된 비구면 광학 요소를 통해 빔 소스(source)에 의해 출력된 펄스 레이저 빔(pulsed laser beam)을 투명 워크피스로 지향시켜, 상기 투명 워크피스로 지향된 펄스 레이저 빔의 일부가 투명 워크피스 내에서 유도 흡수를 발생하는 단계를 포함한다. 상기 유도 흡수는 투명 워크피스 내의 결함을 생성하고 투명 워크피스로 지향된 펄스 레이저 빔의 일부는 파장(λ), 유효 스폿 크기($W_{o,eff}$), 및 단면 x-방향의 최소 레일리 범위(Rayleigh range)($Z_{Rx,min}$) 및 단면 y-방향의 최소 레일리 범위

($Z_{Ry,min}$)를 포함하는 비-축대칭 빔 단면을 포함한다. 또한, $Z_{Rx,min}$ 와 $Z_{Ry,min}$ 중 더 작은 것이 $F_D \frac{\pi W_{o,eff}^2}{\lambda}$ 보다 더 크며, 여기서 F_D 는 10 또는 그 이상의 값을 포함하는 무차원 발산 계수이다.

[0006] 다른 실시예에서, 투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법은 투명 워크피스의 윤곽선을 형성하는 단계를 포함하고, 상기 윤곽선은 투명 워크피스의 결함을 포함한다. 윤곽선을 형성하는 단계는 빔 경로를 따라 그리고 비구면 광학 요소를 통해 빔 소스에 의해 출력되고, 및 광학 차단 요소 너머, 여기서, 상기 비구면 광학 요소와 광학 차단 요소는 빔 소스와 투명 워크피스 사이에 각각 위치됨, 그리고 투명 워크피스로 지향된 펄스 레이저 빔을 지향시키는 단계를 포함하여, 투명 워크피스로 지향된 상기 펄스 레이저 빔은 투명 워크피스 내에서 유도 흡수를 발생한다. 상기 유도 흡수는 투명 워크피스 내에 결함을 생성하고 투명 워크피스로 지향된 펄스 레이저 빔의 일부는 파장(λ), 유효 스폿 크기($W_{o,eff}$), 및 단면 x-방향의 최소 레일리 범위($Z_{Rx,min}$) 및 단면 y-방향의 최소 레일리 범위($Z_{Ry,min}$)를 포함하는 비-축대칭 빔 단면을 포함한다. 또한, $Z_{Rx,min}$ 와 $Z_{Ry,min}$ 중 더 작은 것

이 $F_D \frac{\pi W_{o,eff}^2}{\lambda}$ 보다 더 크며, 여기서 F_D 는 10 또는 그 이상의 값을 포함하는 무차원 발산 계수이다.

[0007] 다른 실시예에서, 투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법은 투명 워크피스의 윤곽선을 형성하는 단계를 포함하고, 상기 윤곽선은 투명 워크피스의 결함을 포함한다. 윤곽선을 형성하는 단계는 빔 경로를 따라 그리고 비구면 광학 요소를 통해 빔 소스에 의해 출력된 펄스 레이저 빔을 지향시키고, 상기 빔 소스와 투명 워크피스 사이에 위치한 결어긋남 광학 요소(decohering optical element)를 이용하여 펄스 레이저의 제2 빔 부분으로부터 펄스 레이저 빔의 제1 빔 부분을 결어긋나게 하고, 및 상기 펄스 레이저 빔의 제1 빔 부분과 제2 빔 부분을 지향시키는 단계를 포함하여, 상기 투명 워크피스로 지향된 펄스 레이저 빔의 제1 빔 부분과 제2 빔 부분이 투명 워크피스 내에서 유도 흡수를 발생한다. 상기 유도 흡수는 투명 워크피스 내에 결함을 생성하고 투명 워크피스로 지향된 제1 빔 부분과 제2 빔 부분의 결함은 파장(λ), 유효 스폿 크기($W_{o,eff}$), 및 단면 x-방향의 최소 레일리 범

위($Z_{Rx,min}$) 및 단면 y-방향의 최소 레일리 범위($Z_{Ry,min}$)를 포함하는 비-축대칭 빔 단면을 포함한다. 또한, $Z_{Rx,min}$ 와 $Z_{Ry,min}$ 중 더 작은 것이 $F_D \frac{\pi W_{0,eff}^2}{\lambda}$ 보다 더 크며, 여기서 F_D 는 10 또는 그 이상의 값을 포함하는 무차원 발산 계수이다.

[0008] 또 다른 실시예에서, 투명 워크피스에 펄스 레이저 빔을 국한시키는 단계를 포함하고, 상기 펄스 레이저 빔은 z-방향으로 전파되고(i) 파장(λ); (ii) 유효 스폿 크기($W_{o,eff}$); (iii) 투명 워크피스의 손상 임계값을 초과하기 충분한 펄스 에너지 및 펄스 지속시간; (iv) 제1 부분 및 제2 부분, 상기 제1 부분은 제2 부분에 대해 비간섭성임; 및(v) x-방향의 최소 레일리 범위($Z_{Rx,min}$) 및 y-방향의 최소 레일리 범위($Z_{Ry,min}$)를 가진 비-축대칭 빔 단면;을 포함한다. 또한, $Z_{Rx,min}$ 와 $Z_{Ry,min}$ 중 더 작은 것이 $F_D \frac{\pi W_{0,eff}^2}{\lambda}$ 보다 더 크며, 여기서 F_D 는 10 또는 그 이상의 값을 포함하는 무차원 발산 계수이다.

[0009] 본 발명은 또한 다음의 조항을 포함한다:

[0010] 1. 유리 기관과 같은 투명 워크피스를 레이저 가공하는 방법으로서, 상기 방법은:

[0011] 투명 워크피스를 제공하는 단계;

[0012] 상기 투명 워크피스 상에 레이저 빔을 지향시켜 윤곽선을 형성하고 상기 윤곽선을 따라 투명 워크피스가 분리되는 단계, 여기서, 상기 레이저 빔은 레이저 빔 소스에 의해 방출된 펄스 레이저 빔임, 여기서, 상기 펄스 레이저 빔은 투명 워크피스에 국한되고, 상기 펄스 레이저 빔은 z 방향의 빔 경로를 따라 전파됨;를 포함하고,

[0013] 여기서, 상기 펄스 레이저 빔은,

[0014] 파장(λ);

[0015] 비-축대칭 빔 단면;

[0016] 최대 빔 강도;

[0017] 유효 스폿 크기($W_{o,eff}$), 여기서, 상기 유효 스폿 크기는 빔 강도가 최대 빔 강도의 $1/e^2$ 로 감소되는 빔 전파 경로(z)로부터 임의의 방향으로 최단 방사 거리로서 정의됨;

[0018] 상기 투명 워크피스의 손상 임계값을 초과하여 투명 워크피스에 윤곽선을 형성하기 충분한 펄스 에너지 및 펄스 지속시간, 여기서, 상기 윤곽선은 투명 워크피스의 결함을 포함함;을 포함하고,

[0019] 여기서, 상기 축-비대칭 빔 단면은 x-방향의 최소 레일리 범위($Z_{Rx,min}$) 및 y-방향의 최소 레일리 범위

($Z_{Ry,min}$)를 가지며, 여기서, 상기 $Z_{Rx,min}$ 와 $Z_{Ry,min}$ 중 더 작은 것이 $F_D \frac{\pi W_{0,eff}^2}{\lambda}$ 보다 더 크며, 여기서 F_D 는 10 또는 그 이상의 값을 포함하는 무차원 발산 계수이고, 여기서, 상기 x 및 y 방향의 최소 레일리 범위들 중 더 작은 값은 빔의 광학 강도가 최대 빔 강도의 이분의 일로 감소하는 빔 경로를 따른 거리인, 방법.

[0020] 2. 조항 1에 있어서, 상기 레이저 빔은 상기 투명 워크피스의 손상 임계값을 초과하여 윤곽선을 형성하기 충분한 펄스 에너지 및 펄스 지속시간을 가지며, 상기 윤곽선은 투명 워크피스의 결함을 포함하고, 바람직하게 투명 워크피스와 펄스 레이저 빔을 서로에 대해 윤곽선을 따라 병진시켜, 투명 워크피스 내에 윤곽선을 따라 다수의 결함을 형성하는 단계를 더욱 포함하는, 방법.

[0021] 3. 조항 1 또는 2에 있어서, 상기 비-축대칭 빔 단면은 최대 스폿 크기 파라미터($W_{o,max}$), 최소 스폿 크기 파라미터($W_{o,min}$), 및 종횡비($W_{o,min}$)를 가지며, 여기서 상기 종횡비는 1.1, 1.3 또는 2.0 이상이며, 또는 1.2 내지 15.0 범위이고, 또는 1.5 내지 3.0 범위인, 방법.

[0022] 4. 조항 1 내지 3 중 어느 하나에 있어서, 상기 레이저 빔은 제1 및 제2 부분을 포함하고, 상기 제1 부분은 제2

부분에 대해 결어긋나는, 방법.

- [0023] 5. 조항 1 내지 4 중 어느 하나에 있어서, 상기 레이저 빔은 비구면 광학 요소를 통해 지향되어 레이저 빔은 투명 워크피스 내에서 유도 흡수를 발생하고, 바람직하게 여기서, 상기 비구면 광학 요소는 빔 경로로부터 방사상 방향으로 오프셋되어 위치되는, 방법.
- [0024] 6. 조항 5에 있어서,
- [0025] 상기 비구면 광학 요소는 오프셋 거리만큼 방사상 방향으로 빈 경로로부터 오프셋되며; 및
- [0026] 상기 오프셋 거리는 펄스 레이저 빔과 비구면 광학 요소 사이의 접촉 위치에서 펄스 레이저 빔의 단면 지름의 약 10% 내지 약 75%의 거리인, 방법.
- [0027] 7. 조항 1 내지 6 중 어느 하나에 있어서, 상기 무차원 발산 계수(F_D)는 약 10 내지 약 2000의 값을 포함하고, 바람직하게 여기서, 상기 무차원 발산 계수(F_D)는 약 50 내지 1500의 값을 포함하고, 더욱 바람직하게, 여기서 상기 무차원 발산 계수(F_D)는 약 100 내지 1000의 값을 포함하는, 방법.
- [0028] 8. 조항 1 내지 7 중 어느 하나에 있어서, 상기 결함은 중앙 결함 영역과 투명 워크피스로 지향된 펄스 레이저 빔의 비-축대칭 빔 단면의 장축을 따라 상기 중앙 결함 영역으로 외부로 연장된 적어도 하나의 방사상 아암(radial arm)을 포함하는, 방법.
- [0029] 9. 조항 1 내지 8 중 어느 하나에 있어서, 상기 빔 소스와 투명 워크피스 사이에 위치한 결어긋남 광학 요소를 이용하여 레이저 빔의 제2 부분으로부터 레이저 빔의 제1 부분을 결어긋나게 하는 단계를 더욱 포함하고, 바람직하게 여기서 상기 결어긋남 광학 요소는 비구면광학 요소와 투명 워크피스 사이에, 또는 빔 소스와 비구면 광학 요소 사이에 위치하는, 방법.
- [0030] 10. 조항 9에 있어서, 상기 결어긋남 광학 요소는 광학 지연 플레이트(optical delay plate)를 포함하고 상기 제2 빔 부분으로부터 제1 부분을 결어긋나게 하는 단계는 제2 빔 부분에 대해 제1 빔 부분의 광학 리타데이션(optical retardation)을 유도하기 위해 광학 지연 플레이트를 통해 펄스 레이저 빔의 제1 빔 부분을 지향시키는 단계를 포함하는, 방법.
- [0031] 11. 조항 10에 있어서, 상기 제2 빔 부분으로부터 제1 빔 부분을 결어긋나게 하는 단계는: 상기 펄스 레이저 빔의 제1 빔 부분이 투명 워크피스에 제1 편광(polarization)을 포함하도록 펄스 레이저 빔의 제1 빔 부분을 편광시키는 단계; 및 상기 펄스 레이저 빔의 제2 빔 부분이 투명 워크피스에 제2 편광을 포함하도록 펄스 레이저 빔의 제2 빔 부분을 편광시키는 단계;를 포함하며, 여기서, 상기 제1 편광은 제2 편광에 수직한, 방법.
- [0032] 12. 조항 1 내지 10 중 어느 하나에 따른 방법을 수행하는 시스템으로서, 상기 시스템은:
- [0033] 펄스 레이저 빔을 제공하는 레이저 빔 소스,
- [0034] 상기 소스로부터 비-축대칭 단면을 가진 레이저 빔으로 제공된 레이저 빔을 전환하기 위한 수단을 포함하고, 여기서, 상기 비-축대칭 레이저 빔은,
- [0035] 파장(λ);
- [0036] 최대 빔 강도;
- [0037] 유효 스폿 크기($w_{0,eff}$), 여기서, 상기 유효 스폿 크기는 빔 강도가 최대 빔 강도의 $1/e^2$ 로 감소되는 빔 전파 경로(z)로부터 임의의 방향으로 최단 방사 거리로서 정의됨;
- [0038] 상기 투명 워크피스의 손상 임계값을 초과하여 투명 워크피스에 윤곽선을 형성하기 충분한 펄스 에너지 및 펄스 지속시간, 여기서, 상기 윤곽선은 투명 워크피스의 결함을 포함함;을 포함하고,
- [0039] 여기서, 상기 축-비대칭 빔 단면은 x-방향의 최소 레일리 범위($Z_{Rx,min}$) 및 y-방향의 최소 레일리 범위($Z_{Ry,min}$)를 가지며, 여기서, 상기 $Z_{Rx,min}$ 와 $Z_{Ry,min}$ 중 더 작은 것이 $F_D \frac{\pi w_{0,eff}^2}{\lambda}$ 보다 더 크며, 여기서 F_D 는 10 또는 그 이상의 값을 포함하는 무차원 발산 계수이고, 여기서, 상기 x 및 y 방향의 최소 레일리 범위들 중 더 작은 값은 빔의 광학 강도가 최대 빔 강도의 이분의 일로 감소하는 빔 경로를 따른 거리인, 시스템.

- [0040] 13. 조항 12에 있어서, 상기 레이저 빔을 준 비-회절 레이저 빔으로 전환하는 수단을 더욱 포함하는, 시스템.
- [0041] 14. 조항 13에 있어서, 상기 소스로부터 비-축대칭 단면을 가진 레이저 빔으로 제공된 레이저 빔을 전환하는 수단과 상기 레이저 빔을 준 비-회절 레이저 빔으로 전환하는 수단은, 빔 전과 경로 및 빔 결어긋남 요소에 대해 오프셋된 비구면 요소, 바람직하게 액시콘 렌즈(axicon lens)를 포함하는, 시스템.
- [0042] 15. 조항 14에 있어서,
- [0043] 레이저 빔 소스,
- [0044] 레이저 빔을 순환적으로 편광시키는 제1 쿼터 파장 플레이트(quarter wave plate),
- [0045] 액시콘 렌즈,
- [0046] 시준 렌즈,
- [0047] 상기 레이저 빔의 2개의 부분의 결어긋남에 기초한 편광을 생성하기 위한 제2, 바람직하게 회전 가능한 스플릿 쿼터 파장 플레이트(rotatable split quarter wave plate), 및 상기 투명 워크피스 상에 레이저 빔을 초점 맞추기 위한 초점 렌즈를 차례차례로 포함하는, 시스템.
- [0048] 본원에 설명된 공정 및 시스템의 추가적인 특징 및 이점은 이하의 상세한 설명에서 설명될 것이며, 일부는 그 설명으로부터 당업자에게 명백할 것이고, 또는 다음의 상세한 설명, 청구항 및 첨부된 도면을 포함하는, 본 명세서에 기술된 실시예를 실시함으로써 인식 될 것이다.
- [0049] 전문한 일반적인 설명 및 다음의 상세한 설명 모두는 다양한 실시예를 설명하고 청구된 주제의 특성 및 특성을 이해하기 위한 개요 또는 프레임워크를 제공하기 위한 것임을 이해해야 한다. 첨부 도면은 다양한 실시예에 대한 이해를 돕기 위해 포함되며, 본 명세서에 통합되어 본 명세서의 일부를 구성한다. 도면은 본 명세서에 설명된 다양한 실시예를 예시하고, 설명과 함께 청구된 주제의 원리 및 동작을 설명하는 역할을 한다.

도면의 간단한 설명

- [0050] 도면에 기재된 실시예는 본질적으로 예시적이고 예시적인 것이며 청구 범위에 의해 정의된 주제를 제한하지 않는다. 예시적인 실시예들에 대한 다음의 상세한 설명은 다음의 도면들과 함께 읽혀질 때 이해될 수 있으며, 같은 구조는 같은 참조 번호로 나타낸다.
- 도 1a는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 결합의 윤곽선의 형성을 개략적으로 도시한다.
- 도 1b는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 투명 워크피스의 처리 중 예시의 펄스 레이저 빔 초점 선을 개략적으로 도시한다.
- 도 2는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 투명 워크피스의 윤곽선을 형성하기 위해 원하는 분리선을 가로지르는 비-축대칭 빔 스폿을 개략적으로 도시한다.
- 도 3은 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 펄스 레이저 가공을 위한 광학 조립체의 종래의 실시예를 개략적으로 도시한다.
- 도 4는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 오프셋 비구면 광학 요소를 포함하는 펄스 레이저 가공을 위한 광학 조립체의 실시예를 개략적으로 도시한다.
- 도 5a는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 광학 차단 요소를 포함하는 펄스 레이저 가공을 위한 광학 조립체의 실시예를 개략적으로 도시한다.
- 도 6은 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 광학 지연 플레이트를 포함하는 펄스 레이저 가공을 위한 광학 조립체의 실시예를 개략적으로 도시한다.
- 도 7a는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 스플릿 쿼터 파장 플레이트를 포함하는 펄스 레이저 가공을 위한 광학 조립체의 실시예를 개략적으로 도시한다.
- 도 7b는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 도 7a의 스플릿 쿼터 파장 플레이트를 개략적으로 도시한다.
- 도 7c는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 버

스트 내의 레이저 펄스의 상대적인 강도 대 시간을 도표로 도시한다.

도 7d는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 다른 예시의 펄스 버스트 내의 시간에 대한 레이저 펄스의 상대적인 강도를 도표로 도시한다.

도 8a는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.

도 8b는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 푸리에 변환 평면의 대수 강도 도표를 도시한다.

도 8c는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 근거리 현미경 사진을 도시한다.

도 9는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.

도 10은 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도를 도시한다.

도 11a는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 2차원 단면 강도 플롯을 도시한다.

도 11b는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 도 11a의 2차원 단면 강도 플롯의 1차원 수평 및 수직선 단면 세트를 도시한다.

도 11c는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 도 11a의 2차원 단면 강도 플롯의 다른 세트의 1차원 수평 및 수직선 단면을 도시한다.

도 11d는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 푸리에 변환 평면의 대수 강도 플롯을 도시한다.

도 11e는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 근거리 현미경 사진을 도시한다.

도 12a는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.

도 12b는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.

도 12c는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.

도 12d는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 도 12a-12c의 강도 플롯의 1차원 단면을 도표로 도시한다.

도 12e는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 Sgn 계단 함수의 푸리에 변환을 도표로 도시한다.

도 12f는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.

도 12g는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 도 12f의 2차원 단면 강도 플롯의 1차원 X 및 Y 단면을 도표로 도시한다.

도 12h는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.

도 12i는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 도 12f의 2차원 단면 강도 플롯의 1차원 X 및 Y 단면을 도표로 도시한다.

도 13a는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다

도 13b는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.

도 13c는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.

도 13d는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.

도 13e는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.

도 13f는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.

도 13g는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.

도 13h는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.

도 13i는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.

- 도 13j는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.
- 도 13k는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.
- 도 14는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 근거리 현미경 사진을 도시한다.
- 도 15는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 근거리 현미경 사진을 도시한다.
- 도 16은 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 광학 조립체에 위치한 광학 차단 요소에 의해 형성된 예시의 결과적인 비-축대칭 빔 스폿을 도시한다.
- 도 17a는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.
- 도 17b는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.
- 도 17c는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.
- 도 17d는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.
- 도 17e는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.
- 도 17f는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.
- 도 18은 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 광학 조립체에 위치한 2개의 광학 차단 요소에 의해 형성된 예시의 결과적인 비-축대칭 빔 스폿을 도시한다.
- 도 19a는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 이미지를 도시한다.
- 도 19b는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 이미지를 도시한다.
- 도 20a는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 이미지를 도시한다.
- 도 20b는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 도 20a의 2차원 단면 강도 플롯의 1차원 X 및 Y 단면을 도표로 도시한다.
- 도 21a는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.
- 도 21b는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 도 21a의 2차원 단면 강도 플롯의 1차원 X 및 Y 단면을 도표로 도시한다.
- 도 22a는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 펄스 레이저 빔의 단면 강도 플롯을 도시한다.
- 도 22b는 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 도 22a의 2차원 단면 강도 플롯의 1차원 X 및 Y 단면을 도표로 도시한다.
- 도 23은 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따른, 예시의 광학 조립체에 위치한 스플릿 쿼터 파장 플레이트에 의해 형성된 예시의 결과적인 비-축대칭 빔 스폿을 도시한다.
- 도 24는 비-축대칭 빔의 레일리 범위를 도시한다.
- 도 25는 비대칭 준 비-회절 빔을 생산하기 위한 광학 시스템을 도시한다.
- 도 26은 비대칭 준 비-회절 빔을 생산하기 위한 광학 시스템을 도시한다.
- 도 27은 스플릿 쿼터 파장 플레이트(SQWP)를 도시한다.
- 도 28은 빔을 걸어긋나게 하기 위한 편광 방법을 이용하여 비대칭 준 비-회절 빔(QNDB)의 생성을 개략적으로 나타낸다.
- 도 29는 나노-천공 및 균열 제어의 예시 이미지이다.
- 도 30은 4개의 상이한 SQWP 회전 각도에서 만들어진 나노-천공 라인을 가진 별모양 패턴을 나타낸다.
- 도 31은 준-비-회절 빔의 빔 프로파일을 측정하기 위한 광학 시스템을 나타낸다.
- 도 32는 준-비-회절 빔의 빔 단면의 이미지이다.
- 도 33은 광학 축을 따른 상이한 초점 위치에서 측정된 일련의 x-y 단면 이미지로부터 얻어진 피크 강도의 플롯

이다.

도 34는 도 32에 나타난 빔 단면의 중앙 부분의 확대도이다.

도 35는 도 32에 나타난 빔 단면의 중앙 부분의 확대도이다.

도 36은 도 34에 도시된 빔 단면에서 얻어진 x 및 y 방향의 강도 프로파일을 나타낸다.

도 37은 준-비-회절 빔의 빔 단면의 이미지이다.

도 38은 광학 축을 따른 상이한 초점 위치에서 측정된 일련의 x-y 단면으로부터 얻어진 피크 강도의 플롯이다.

도 39는 도 37에 도시된 빔 단면의 중앙 부분의 확대도이다.

도 40은 도 37에 도시된 빔 단면의 중앙 부분의 확대도이다.

도 41은 도 37에 도시된 빔 단면의 x 및 y 방향의 강도 프로파일을 나타낸다.

도 42는 축대칭 빔의 xy 단면을 나타낸다.

도 43은 축대칭 빔의 강도 프로파일 및 분산을 나타낸다.

도 44는 비대칭 빔의 xy 단면을 나타낸다.

도 45는 비대칭 빔의 강도 프로파일 및 분산을 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0051] 다음에서 유리 워크피스와 같은 투명 워크피스를 레이저 가공하기 위한 공정의 실시예를 상세하게 참조할 것이며, 그 예시는 첨부된 도면에 도시된다. 가능할 때마다, 동일한 도면 부호는 동일하거나 유사한 부분을 나타내기 위해 도면 전체에 걸쳐 사용될 것이다. 본원에 개시된 하나 이상의 실시예에 따라, 2개 이상의 부분으로의 투명 워크피스의 의도된 분리선을 정의하는 일련의 결함을 포함하는 투명 워크피스에 윤곽선을 형성하도록 투명 워크피스는 레이저 가공될 수 있다. 하나의 실시예에 따르면, 투명 워크피스 상에 장축 및 단축을 갖는 빔 단면을 갖는 비-축대칭 연장된 초점 선을 투영하는 펄스 레이저 빔은 투명 워크피스에 일련의 결함을 생성하여 윤곽선을 형성하기 위해 활용될 수 있다. 이러한 결함은 본원의 다양한 실시예에서, 워크피스의 선 결함, 천공, 또는 나노-천공으로 나타낼 수 있다. 또한, 이들 결함은 중앙 결함 영역 및 주로 비-축대칭 빔 스폿의 장축을 따라 형성되는 방사상 아암을 포함할 수 있다. 일부 실시예에서, 공정은, 예를 들어, 윤곽선에 인접한 투명 워크피스의 구역을 가열하거나 구부리거나, 스크라이브하거나(scribe), 그렇지 않으면 투명 워크피스에 다른 기계적 인 응력을 가하도록 구성된 적외선 레이저 또는 다른 레이저를 이용하여 윤곽선을 따라 투명 워크피스를 분리하는 단계를 더욱 포함할 수 있다. 다른 실시예에서, 투명 워크피스는 기계적으로 응력을 받아 분리를 일으키거나, 또는 분리가 자연스럽게 발생할 수 있다. 이론에 의해 제한되지는 않지만, 윤곽선에서 투명 워크피스에 응력을 가하는 것은 윤곽선을 따라 균열을 전파시킬 수 있다. 윤곽선을 따라 각 결함의 방사상 아암의 방향을 제어함으로써, 균열 전파가 더 잘 제어될 수 있다. 투명 워크피스를 처리하기 위한 방법 및 장치의 다양한 실시예가 첨부된 도면을 참조하여 구체적으로 기술될 것이다.

[0052] 본원에 사용된 "투명 워크피스"라는 용어는 투명한 유리 또는 유리-세라믹으로 형성된 워크피스를 의미하며, "투명한"이라는 용어는 재료가 재료 깊이의 mm 당 약 20% 이하의 광 흡수, 예컨대, 특정 펄스 레이저 파장에 대해 재료 깊이의 mm 당 약 10% 이하의 광 흡수, 또는 예컨대 특정 펄스 레이저 파장에 대해 재료 깊이의 mm 당 약 1% 이하의 광 흡수를 갖는 것을 의미한다. 하나 이상의 실시예에 따라, 투명 워크피스는 약 50 마이크로 내지 약 10 mm의 두께(예컨대 약 100마이크론 내지 약 5mm 또는 약 0.5mm 내지 약 3mm)를 가질 수 있다.

[0053] 하나 이상의 실시예에 따르면, 본 발명은 워크피스를 가공하는 방법을 제공한다. 본원에 사용된 바와 같이, "레이저 가공"은 워크피스에 윤곽선을 형성하고, 워크피스를 분리하거나, 또는 이들의 조합을 포함할 수 있다. 투명 워크피스는 붕규산 유리, 소다 - 석회 유리, 알루미늄노실리케이트(aluminosilicate) 유리, 알칼리 알루미늄노실리케이트(alkali aluminosilicate), 알칼리 토류 알루미늄노실리케이트(alkaline earth aluminosilicate) 유리, 알칼리 토류 보로-알루미늄노실리케이트 유리, 용융 실리카, 또는 사파이어, 실리콘, 갈륨 비소(gallium arsenide) 또는 이들의 조합과 같은 결정질 재료와 같은 유리 조성물로 형성된 유리 워크피스를 포함할 수 있다. 일부 실시예에서, 유리는 이온 교환 가능하여, 유리 조성물이 투명 워크피스를 레이저 가공하기 전 또는 후에 기계적 강화를 위해 이온 교환될 수 있다. 예를 들어, 투명 워크피스는 뉴욕 코닝 소재 코닝 인코포레이티드(Corning Incorporated of Corning)로부터 입수 가능한 코닝 고릴라(Corning Gorilla) 유리(예 : 코드 2318,

코드 2319 및 코드 2320)와 같은 이온 교환 및 이온 교환 가능한 유리를 포함할 수 있다. 또한, 이들 이온 교환된 유리는 약 6ppm/℃ 내지 약 10ppm/℃의 열팽창계수(CTE)를 가질 수 있다. 일부 실시예에서, 투명 워크시트의 유리 조성물은 약 1.0 mol.% 초과인 붕소 및/또는 이에 한정하지 않지만, B₂O₃를 포함하는 붕소를 함유하는 조성물을 포함할 수 있다. 또 다른 실시예에서, 투명 워크피스가 형성되는 유리 조성물은 약 1.0 mol.% 이하의 붕소 산화물 및/또는 붕소를 함유하는 조성물을 포함한다. 또한, 투명 워크시트는 레이저의 파장에 대해 투과성인 다른 구성 요소, 예를 들어 사파이어 또는 아연 셀레나이드(zinc selenide)와 같은 결정을 포함할 수 있다.

[0054] 일부 투명 워크피스는 디스플레이 및/또는 TFT(박막 트랜지스터) 기관으로서 활용될 수 있다. 디스플레이 또는 TFT 사용을 위한 이러한 유리 또는 유리 조성물의 일부 예시는 뉴욕, 코닝 인코포레이티드로부터 이용 가능한 EAGLE XG®, CONTEGO, 및 CORNING LOTUS™ 이다. 알칼리 토류 붕소-알루미늄실리케이트 유리 조성물은, 제한없이, TFT 용 기관을 포함하는 전자 활용을 위한 기관으로서 사용하기에 적합하도록 제형화될 수 있다. TFT와 함께 사용되는 유리 조성물은 전형적으로 실리콘과 유사한 CTE(예를 들어, $5 \times 10^{-6}/K$ 이하, 또는 $4 \times 10^{-6}/K$ 이하, 예를 들어 약 $3 \times 10^{-6}/K$, 또는 약 $2.5 \times 10^{-6}/K$ 내지 약 $3.5 \times 10^{-6}/K$)를 가지며, 유리 내의 알칼리 수 준이 낮다. 알칼리 도펀트(dopant)가, 일부 조건하에서, 유리에서 침출되어 TFT를 오염시키거나 "유독성"화하여 TFT가 작동 불능이 될 가능성이 있기 때문에 TFT 용도에 낮은 수준의 알칼리(예컨대, 약 0 wt.% 내지 2 wt.%, 예컨대 1 wt.% 미만, 예를 들어, 0.5 wt.% 미만과 같은 미량)가 사용될 수 있다. 실시예에 따르면, 본원에 기술된 레이저 커팅 공정은 무시할 수 있는 파편, 최소 결함, 및 에지에 대한 낮은 표면 손상을 갖는 제어된 방식으로 투명 워크피스를 분리하여, 워크피스 무결성 및 강도를 보존하는데 사용될 수 있다.

[0055] 본원에 사용되는 "윤곽선"이라는 문구는 투명 워크피스의 표면상의 원하는 분리선을 따라 형성된 선(예컨대, 선, 곡선 등)을 의미하며, 이를 따라 투명 워크피스가 적절한 공정 조건에 노출되면 여러 부분으로 분리된다. 윤곽선은 일반적으로 다양한 기술을 사용하여 투명 워크피스에 도입된 하나 이상의 결함으로 구성된다. 본원에 사용된 바와 같이, "결함"은 적외선 레이저 가공, 기계적인 응력, 또는 다른 분리 공정과 같은 부가적인 공정에 의한 분리를 가능하게 하는 투명 워크피스의 변형된 재료(벌크 재료에 비해), 빈공간(void space), 스크래치, 흠집, 구멍, 또는 다른 변형의 구역을 포함할 수 있다. 또한, 각각의 결함은 중앙 결함 영역과 투명 워크피스의 이미지 표면을 따른 중앙 결함 영역으로부터 바깥쪽으로 연장되는 하나 이상의 방사상 아암을 포함할 수 있다. 본원에 사용되는, 투명 워크피스의 "이미징 표면"은 펄스 레이저 빔이 초기에 투명 워크피스와 접촉하는 투명 워크피스의 표면이다. 아래에서 보다 상세히 설명되는 바와 같이, 하나 이상의 방사상 아암의 반경 방향 길이는 펄스 레이저 빔에 의해 투명 워크피스 상에 투영된 빔 스폿의 형상에 의해 제어될 수 있다. 하나의 예시로서, 장축 및 단축을 일반적으로 포함하는 비-축대칭 빔 스폿을 포함하는 펄스 레이저 빔은 투명 워크피스의 이미징 평면을 조사하여 비-축대칭 빔 스폿의 장축과 단축의 교차점에 형성된 중심 결함 영역과 상기 비-축대칭 빔 스폿의 장축 방향에 형성된 하나 이상의 방사상 아암을 포함하는 결함을 발생할 수 있다.

[0056] 유리 기관 등의 투명 워크피스는 먼저 워크피스의 표면 상에 윤곽선을 형성하고, 이후, 예를 들어, 적외선 레이저를 사용하여 윤곽선 상의 워크피스 표면을 가열하고 워크피스에 열 응력과 같은 응력을 생성하여, 여러 부분으로 분리될 수 있다. 응력은 궁극적으로 윤곽선을 따라 워크피스의 자발적 분리를 야기한다. 또한, 빔 축의 장축이 원하는 분리선을 따라 연장되도록 배향된 비-축대칭 빔 스폿을 갖는 펄스 레이저 빔을 사용하여 각각의 결함이 형성될 때, 윤곽선을 따라 투명 워크피스에 결함 응력을 가함으로써 야기되는 균열 전파는 원하는 분리선으로 연장될 수 있다. 원하는 분리선의 방향으로 연장되는 방사상 아암을 갖는 결함을 형성하는 것은 결함이 윤곽선이 분리 전 존재하는 분리된 투명 워크피스의 에지에 대한 손상 없이, 무작위로 연장되는 방사상 아암 또는 비 방사상 아암을 가진 결함보다 더 큰 간격으로 이격되게 할 수 있다. 또한, 원하는 분리선 방향으로 연장되는 방사상 아암을 갖는 결함을 형성하는 것은 윤곽선이 분리 전 존재한 분리된 투명 워크피스의 에지에 대한 손상을 제한하며, 워크피스에 적용된, 작은 응력, 예컨대, 열 에너지와 같은 작은 에너지에 의해 균열 전파가 발생되게 할 수 있다. 대조적으로, 결함이 무작위로 연장되는 방사상 아암 또는 비 방사상 아암을 포함하는 경우, 균열은 분리된 투명 워크피스의 에지에 일반적으로 수직인 방향으로(즉, 윤곽선으로 표시된 의도된 분리선에 대체로 수직인) 분리된 에지로부터 전파될 수 있으며, 이는 분리된 투명 워크피스의 에지를 약화시킬 수 있다.

[0057] 예시의 방식으로 도 1a 및 1b를 참고하면, 유리 워크피스 또는 유리-세라믹 워크피스와 같은 투명 워크피스는 본원에 개시된 방법에 따른 가공을 받는 것이 개략적으로 도시된다. 도 1a 및 1b는 투명 워크피스(160)의 윤곽선(170)의 형태를 도시하며, 이는 병진 방향(101)의 투명 워크피스에 대해 펄스 레이저 빔(112)을 병진시킴으로써 형성될 수 있다. 도 1a 및 1b는 펄스 레이저 빔(112)이 렌즈(예컨대, 하기 설명된 제2 렌즈(132))에 의해 투명 워크피스(160) 내에 펄스 레이저 빔 초점선(113)으로 집중될 수 있도록 지향된 빔 경로(111)를 따른 펄스 레

이저 빔(112)을 도시한다. 또한, 펄스 레이저 빔 초점선(113)은 하기에 더욱 자세히 설명된 것처럼, 준 비-회절 빔의 일부분이다. 도 1a 및 1b는 펄스 레이저 빔(112)이 투명 워크피스(160)의 이미징 표면(162) 상에 투영된 비-축대칭 빔 스폿(114)을 형성하는 것을 도시한다. 또한, 펄스 레이저 빔 초점선(113)은 펄스 레이저 빔(112)의 전파 축에 수직한(예컨대, 빔 경로(111)에 수직한) 펄스 레이저 빔 초점선(113)의 단면에서 비-축대칭이다. 본원에 사용된 것처럼, 축대칭은 중심축에 대해 형성된 임의의 회전 각도에 대해 대칭 형태를 나타내며, 또는 동일함을 나타내고, "비-축대칭"은 중심축에 대해 형성된 임의의 회전 각도에 대해 대칭이 아닌 형상을 나타낸다. 회전축(예컨대, 중심축)은 레이저 빔의 전파축으로서 가장 빈번하게 취해진다. 또한 본원에 사용된 바와 같이, "빔 스폿"은 워크피스(예컨대, 투명 워크피스(160))와의 제1 접촉 지점에서 레이저 빔(예컨대, 펄스 레이저 빔(112))의 단면을 나타낸다.

[0058] 또한 도 2를 참고하면, 윤곽선(170)은 원하는 분리선(165)을 따라 연장되고, 투명 워크피스(160)가 두 개 이상으로 분리될 수 있는 의도된 분리선을 묘사한다. 윤곽선(170)은 투명 워크피스(160)의 표면으로 연장되고 투명 워크피스(160)를 윤곽선(170)을 따라 개별 부분들로 분리하기 위한 균열 전파 경로를 설정하는 복수의 결합(172)을 포함한다. 윤곽선(170)이 도 1a 및 도 2에 실질적으로 선형으로 도시되었지만, 다른 구성이 고려되고, 이에 한정하지 않지만, 곡선, 패턴, 규칙적인 기하학적 형상, 불규칙한 형상 등을 포함하는 것이 가능하다는 것을 이해해야 한다.

[0059] 도 2에 도시된 바와 같이, 각 결합(172)은 중앙 결합 영역(174) 및 빔 경로(111)에 실질적으로 수직한 방향으로(예컨대, 도 1A, 1B, 및 2에 도시된 바와 같은 X 및/또는 Y 방향으로) 밖으로 연장되는 하나 이상의 방사상 아암(176)을 포함한다. 작동시, 윤곽선(170)의 결합(172)이, 예를 들어, 본원에 설명된 방법 및 시스템을 사용하여 형성된 후에, 결합(172)은 후속하는 분리 단계에서 추가로 작용하여 윤곽선(170)을 따른 투명 워크피스(160)의 자발적인 분리를 유도할 수 있다. 후속 분리 단계는 투명 워크피스(160)의 유형, 두께 및 구조에 따라서, 기계적인 힘, 힘에 의해 유도된 열 응력, 또는 투명 워크피스에 존재하는 응력으로 인해 일어난 자발적인 파괴를 이용하는 것을 포함할 수 있다. 예를 들어, 응력은 추가 가열 또는 기계적인 분리 단계 없이 자발적인 분리를 야기할 수 있다.

[0060] 도 1a 및 도 2를 참조하면, 본원에 설명된 실시예에서, (투명 워크피스(160) 상에 투영된 비-축대칭 빔 스폿(114)을 갖는) 펄스 레이저 빔(112)은(예컨대, 투명 워크피스(160)의 두께의 적어도 일부를 관통하는 높은 종횡 비 선 초점으로 응축되어)투명 워크피스(160)로 지향될 수 있다. 이것은 비-축대칭 빔 스폿(114)과 상관된 비-축대칭 단면을 갖는 펄스 레이저 빔 초점선(113)을 형성한다. 특히, 비-축대칭 빔 스폿(114)은 펄스 레이저 빔 초점선(113)의 예시적인 단면이고, 펄스 레이저 빔 초점선(113)은 펄스 레이저 빔 초점선(113)이 투명 워크피스(160)의 적어도 일부를 관통할 때 비-축대칭을 유지한다. 또한, 펄스 레이저 빔(112)은 투명 워크피스(160)에 대해 병진되어(예컨대, 병진 방향(101)으로) 윤곽선(170)의 다수의 결합을 형성할 수 있다. 펄스 레이저 빔(112)을 투명 워크피스(160)로 향하게 하는 것은, 예를 들어, 결합(172)을 형성하기 위해 원하는 분리선(165)을 따른 이격된 위치에서 투명 워크피스(160)의 화학적 접촉을 파괴하기 충분한 에너지가 배치되어, 투명 워크피스(160)의 일부가 파열되게 한다. 하나 이상의 실시예에 따르면, 펄스 레이저 빔은 투명 워크피스(160)의 움직임(예컨대, 투명 워크피스(160)에 결합된 병진 스테이지(190)의 움직임)에 의해, 펄스 레이저 빔의 움직임(예컨대, 펄스 레이저 빔 초점선의 움직임)에 의해, 또는 투명 워크피스(160)와 펄스 레이저 빔 초점선(113) 모두의 움직임에 의해 투명 워크피스를 가로질러 병진될 수 있다. 펄스 레이저 빔 초점선(113)을 병진시킴으로써, 다수의 결합(172)이 투명 워크피스(160)에 형성될 수 있다.

[0061] 도 2에 도시된 바와 같이, 비-축대칭 빔 스폿(114)은 장축(116), 단축(115), 비-축대칭 빔 스폿(114)의 중앙에 위치될 수 있는 축 교차점(118), 및 빔 스폿 둘레(119)를 포함한다. 장축(116)은 비-축대칭 빔 스폿(114) 내에서 중심으로부터 가장 긴 거리를 갖는 비-축대칭 빔 스폿(114)의 축으로서 정의되고, 단축(115)은 비-축대칭 빔 스폿(114) 내의 중심으로부터의 최단 거리를 가진 비-축대칭 빔 스폿(114)의 축으로 정의된다. 비-축대칭 빔 스폿(114)이 도 2에서 타원으로 도시되었지만, 비-타원형과 같은 임의의 비-축대칭 형태가 고려된다는 것을 이해해야 한다. 또한, 비-축대칭 빔 스폿(114)은 다중 빔 스폿의 집합을 포함할 수 있다. 또한, 비-축대칭 빔 스폿(114)이 본원에서 실질적으로 논의되지만, 투명 워크피스(160) 내의 펄스 레이저 빔 초점선(113)의 다른 단면이 또한 비-축대칭이며 또한 비-축대칭 빔 스폿(114)에 대하여 전술한 바와 같은 단축 및 장축을 포함한다.

[0062] 예를 들어, 장축을 따른 비-축대칭 빔 스폿(114)의 중심으로부터 거리는 약 0.25 μ m 내지 약 20 μ m, 예컨대 약 1 μ m 내지 약 10 μ m, 약 2 μ m 내지 약 8 μ m, 또는 약 3 μ m 내지 약 6 μ m일 수 있다. 또한, 단축을 따른 비-축대칭 빔 스폿(114)의 중심으로부터의 거리는 약 0.01 μ m 내지 약 10 μ m, 약 0.1 μ m 내지 약 10 μ m, 또는 약 0.7 μ m 내지 약 3 μ m를 포함할 수 있다. 예를 들어, 비-축대칭 빔 스폿(114)의 중심으로부터 단축을 따른 거리는 비-축대칭

빔 스폿(114)의 중심으로부터 장축을 따르는 거리의 약 5 % 내지 약 95 %, 예컨대, 약 10 % 내지 약 50 %, 약 20 % 내지 약 45 %, 또는 약 30 % 내지 약 40 %일 수 있다. 빔 스폿 크기를 결정하기 위한 방법은 하기에 개시된다.

[0063] 도 1b 및 도 3에 도시된 광학 조립체는, 축 대칭을 갖는 가우스 빔 레이저를 사용하여 작동될 때(예컨대, 빔 스폿(110)가 가우스 빔(Gaussian beam)을 출력할 때), 가우스-베셀 빔(Gauss-Bessel beam)으로서 공지된 투명 위크피스(160)에서 광학 빔을 형성할 것이다. 이러한 빔은 준 비-회절 빔(이하 상세히 정의된)의 한 형태이다. 가우스 빔의 축 대칭이 깨졌을 때, 심지어 약간만 깨지더라도, 빔은 비-축대칭 가우스-베셀 빔으로 불릴 수 있다. 그러나, 본원에 기술된 원리 및 효과는 가우스-베셀 강도 프로파일을 갖는 빔을 넘어 확장되고 일반적으로 비-축대칭 준 비-회절 레이저 빔으로 확장된다. 그러나, 준 비-회절 빔의 비대칭 측정은 전통적인 가우스 빔의 비대칭 측정과 같이 간단하게 수행될 수 없다는 것을 알아야 한다. 예를 들면, 준 비-회절 빔은 일반적으로 단조롭게 감소하는, 가우스 빔에 비해, 진동하는 횡단 프로파일을 갖는다. 가우스 빔의 직경은 일반적으로 강도의 $1/e^2$ 강하에 의해 정의된다. 대조적으로, 준 비-회절 빔의 강도는 방사상 거리의 함수로서 $1/e^2$ 강도 임계값의 위아래로 여러 번 변동할 수 있다. 따라서 방사상으로 대칭인 준 비-회절 빔의 크기를 정의하는 것은 어렵다.

[0064] 또한, 비대칭 가우스 빔은 공지되어 있지만, 이들은 단일 스폿으로 가장 많이 논의되는데, 가우스 빔은 예를 들어, y-방향보다 x-방향으로 더 큰 직경을 가질 수 있다. 그러나, 고차원 가우스 빔과 준 비-회절 빔의 경우 빔 단면이 단일의 단조롭게 감소하는 코어 또는 스폿을 가질 수 없다. 이러한 상황에서 빔의 "긴" 또는 "짧은" 단면 축이 쉽게 나타나지 않아, 빔의 비대칭을 측정하는 방법을 더 어렵게 만든다.

[0065] 이론에 의해 제한되는 것을 의도하지는 않지만, 준 비-회절 빔 및 준 비-회절 빔의 비대칭을 측정하는 방법 모두를 정의하기 위한 다음의 설명이 상기 동기 부여와 함께 이루어진다. 이 논의는 단조로운 강도 프로파일을 갖는 단순한 저차원의 가우스 빔이든 또는 다중 스폿을 투영하거나 진동 방식으로 거동하는 더 복잡한 준 비-회절 빔이든, 모든 형태의 레이저 빔에 광범위하게 적용된다. 가우스 빔의 경우, 결과는 스폿 크기 및 레일리 범위를 정의하기 위한 가우스 빔 문헌에 익숙한 보다 간단한 형태로 감소한다.

[0066] 도 1a 내지 도 2를 다시 참고하면, 결합(172)을 형성하는데 사용된 펄스 레이저 빔(112)은 강도 분포 $I(X,Y,Z)$ 를 더욱 구비하며, 여기서 Z는 펄스 레이저 빔(112)의 전파 방향이고, X 및 Y는 도면에서 도시된 바와 같이, 전파 방향에 직교한 방향이다. X-방향 및 Y-방향은 또한 단면 방향으로 나타낼 수 있고 X-Y 평면은 단면 평면으로 나타낼 수 있다. 단면 평면의 펄스 레이저 빔(112)의 강도 분포는 단면 강도 분포로서 나타낼 수 있다.

[0067] 도 2를 도한 참고하면, 비-축대칭 빔 스폿(114)은 비-축대칭인 단면 강도 분포를 포함한다. 예를 들어, 비-축대칭 빔 스폿(114)은 더 큰 강도를 가지며 이로써 비-축대칭 빔 스폿(114)의 단축(115)을 따른 것보다 비-축대칭 빔 스폿(114)의 장축(116)을 따른 구역에서 펄스 레이저 빔(112)으로부터 누적된 에너지의 더 큰 분포를 가질 수 있다. 즉, 비-축대칭 빔 스폿(114)의 장축(116)이 원하는 분리선(165)과 정렬될 때, 펄스 레이저 빔(112)은 원하는 분리선(165) 인근의 구역 상으로보다 원하는 분리선(165)을 따라 더 많은 에너지를 전달할 수 있으며, 원하는 분리선(165)을 따르지 않는 방향으로 연장되는 방사상 아암(176)보다 원하는 분리선(165)을 따라 연장되는 더 긴 방사상 아암(176)을 포함하는 결합(172)을 형성한다. 본원에 사용된 것처럼, "누적된 에너지"는 펄스 레이저 빔(112)이 투명 위크피스(160)를 조사할 때 펄스 레이저 빔(112)에 의해 투명 위크피스(160)의 특정 구역상으로 전달된 모든 에너지를 나타낸다.

[0068] 또한, 비-축대칭 빔 스폿(114)에서의 펄스 레이저 빔(112)은 도 3-7a에 도시된 광학 조립체(100)와 관련하여 아래에서 보다 상세히 설명되는 것처럼, 비구면 광학 요소(120)를 통해 펄스 레이저 빔(112)을 전파함으로써, 예를 들어 수학적으로 정의된 바와 같이 낮은 빔 발산을 갖는 빔과 같은, 준 비-회절 빔을 포함할 수 있다. 빔 발산은 빔 전파 방향(즉, Z 방향)으로 빔 단면의 확대 비율을 지칭한다. 본원에서 사용되는 "빔 단면"이라는 문구는 예를 들어 X-Y 평면을 따라 펄스 레이저 빔(112)의 전파 방향에 수직인 평면을 따르는 펄스 레이저 빔(112)의 단면을 지칭한다. 본원에서 논의된 하나의 예시적인 빔 단면은 투명 위크피스(160) 상에 투영된 펄스 레이저 빔(112)의 빔 스폿(예컨대, 비-축대칭 빔 스폿(114))이다.

[0069] 회절은 펄스 레이저 빔(112)의 발산을 유도하는 하나의 요인이다. 다른 요인은 펄스 레이저 빔(112)을 형성하는 광학 시스템 또는 인터페이스에서의 굴절 및 산란에 의해 야기된 초점 조정(focusing) 또는 초점 이탈(defocusing)을 포함한다. 윤곽선(170)의 결합(172)을 형성하기 위한 펄스 레이저 빔(112)은 작은 발산 및 약한 회절을 갖는 작은 비-축대칭 빔 스폿(114)을 가질 수 있다. 펄스 레이저 빔(112)의 발산은 펄스 레이저 빔(112)의 강도 분포 및 빔 전파 계수(M^2)의 분산(σ^2)과 관련된, 레일리 범위(Z_R)를 특징으로 한다. 하기 설명에서,

수식은 데카르트 좌표계를 사용한다. 다른 좌표계에 대한 상응하는 표현은 당업자에게 공지된 수학적 기술을 이용하여 얻을 수 있다. 빔 발산에 대한 추가 정보는 A.E. Siegman의 "New Developments in Laser Resonators"(SPIE Symposium Series Vol. 1224, p. 2(1990)) 및 R. Borghi와 M. Santarsiero의 "M² factor of Bessel-Gauss beams"(Optics Letters, Vol. 22(5), 262(1997))에 기재되어 있으며, 그 전체가 참고로 본원에 포함된다. 추가 정보는 "Lasers and laser-related equipment—Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios—Part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams"라는 제목의 국제 기준 ISO 11146-1:2005(E), 및 "Lasers and laser-related equipment—Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios—Part 3: Intrinsic and geometrical laser beam classification, propagation and details of test methods"라는 제목의 ISO 11146-3:2004(E)에서 찾을 수 있고, 그 전체가 참조로 본원에 포함된다.

[0070] 시간-평균 강도 프로파일 $I(x, y, z)$ 를 갖는 펄스 레이저 빔(112)의 강도 프로파일의 중심의 공간 좌표는 다음의 식으로 주어진다:

[0071]
$$\bar{x}(z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} xI(x,y,z) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x,y,z) dx dy} \quad (1)$$

[0072]
$$\bar{y}(z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} yI(x,y,z) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x,y,z) dx dy} \quad (2)$$

[0073] 이들은 또한 위그너 분포(Wigner distribution)의 제1 모멘트로서 알려져 있으며 ISO 11146-2 : 2005(E)의 3.5 절에 설명되어 있다. 그 측정은 ISO 11146-2 : 2005(E)의 7 절에 설명되어 있다.

[0074] 분산은 빔 전파 방향으로 위치(z)의 함수로서 펄스 레이저 빔(112)의 강도 분포의, 횡단면(X-Y) 평면에서의, 폭의 척도이다. 임의의 레이저 빔의 경우, X 방향의 분산은 Y 방향의 분산과 다를 수 있다. $\sigma_x^2(z)$ 와 $\sigma_y^2(z)$ 는 각각 X 방향과 Y 방향의 분산을 나타낸다. 특히 관심의 대상은 근거리 장 및 원거리 장 한계에서의 분산이다. 근거리 장 한계에서 $\sigma_{0x}^2(z)$ 와 $\sigma_{0y}^2(z)$ 는 각각 X 방향과 Y 방향의 분산을 나타내며, $\sigma_{\infty x}^2(z)$ 와 $\sigma_{\infty y}^2(z)$ 는 원거리 장 한계에서의 각각 X 방향과 Y 방향의 분산을 나타낸다. 푸리에 변환 $I(v_x, v_y)$ 여기에서, v_x 및 v_y 는 각각 X 방향 및 Y 방향의 공간 주파수이다)을 갖는 시간-평균 강도 프로파일 $I(x, y, z)$ 를 갖는 레이저 빔에 대해, x 방향 및 y 방향의 근거리 장 및 원거리 장 분산은 다음의 식으로 주어진다:

[0075]
$$\sigma_{0x}^2(z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^2 I(x,y,z) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x,y,z) dx dy} \quad (3)$$

[0076]
$$\sigma_{0y}^2(z) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} y^2 I(x,y,z) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x,y,z) dx dy} \quad (4)$$

[0077]
$$\sigma_{\infty x}^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} v_x^2 \bar{I}(v_x, v_y) dv_x dv_y}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{I}(v_x, v_y) dv_x dv_y} \quad (5)$$

[0078]
$$\sigma_{\infty y}^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} v_y^2 \bar{I}(v_x, v_y) dv_x dv_y}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{I}(v_x, v_y) dv_x dv_y} \quad (6)$$

[0079] 분산량 $\sigma_{0x}^2(z)$, $\sigma_{0y}^2(z)$, 및 $\sigma_{\infty x}^2$ 및 $\sigma_{\infty y}^2$ 는 위그너 분포의 대각선 요소로도 알려져 있다(ISO 11146-2 : 2005(E)). 이러한 분산은 ISO 11146-2 : 2005(E)의 7 절에 설명된 측정 기술을 사용하여 실험용 레이저 빔에 대해 정량화할 수 있다. 간단히 말해서, 측정은 선형 불포화 픽셀 검출기를 사용하여 분산 및 중심 좌표를 정의하는 적분 방정식의 무한 적분 구역을 근사하는 유한 공간 영역에서 $I(x, y)$ 를 측정한다. 측정 구역, 배경 차감 및 검출기 픽셀 해상도의 적절한 규모는 ISO 11146-2 : 2005(E)의 7절에 설명된 반복 측정 절차의 수렴에 의해 결정된다. 수식 1-6에 의해 주어진 표현의 수치 값은 픽셀화된 검출기에 의해 측정된 강도 값의 배열로부터 수치적으로 계산된다.

[0080] 수식 3 내지 수식 6에 사용된 x, y 좌표계의 원점은 레이저 빔의 중심임을 알아야 한다.

[0081] 임의의 광학 빔에 대한 횡방향 진폭 프로파일($\tilde{u}(x, y, z)$)(여기서 $I(x, y, z) \equiv |\tilde{u}(x, y, z)|^2$ 임)과 임의의 광학 빔에 대한 공간-주파수 분포($\tilde{P}(v_x, v_y, z)$)(여기서, $I(v_x, v_y) \equiv |\tilde{P}(v_x, v_y, z)|^2$ 임) 사이의 푸리에 변환 관계를 통해, 다음과 같이 나타낼 수 있다:

[0082]
$$\sigma_x^2(z) = \sigma_{0x}^2(z_{0x}) + \lambda^2 \sigma_{\infty x}^2(z - z_{0x})^2 \quad (7)$$

[0083]
$$\sigma_y^2(z) = \sigma_{0y}^2(z_{0y}) + \lambda^2 \sigma_{\infty y}^2(z - z_{0y})^2 \quad (8)$$

[0084] 수식(7) 및(8)에서, $\sigma_{0x}^2(z_{0x})$ 및 $\sigma_{0y}^2(z_{0y})$ 는 각각 x 방향 및 y 방향에서의 허리 위치 z_{0x} 및 z_{0y} 에서 일어나는, $\sigma_{0x}^2(z)$ 와 $\sigma_{0y}^2(z)$ 의 최소값이며, λ 는 빔의 파장이다. 수식(7) 및 (8)은 $\sigma_x^2(z)$ 및 $\sigma_y^2(z)$ 가 빔의 허리 위치와 관련된 최소값으로부터 어느 방향으로 z 와 함께 2차적으로 증가하는 것을 나타낸다.

[0085] 수식(7) 및 (8)은 x 방향과 y 방향에 대해 개별 빔 전파 계수 M_x^2 와 M_y^2 가 다음과 같이 정의되는 경우, 빔 전파 계수 M^2 의 관점에서 다시 쓸 수 있다:

[0086]
$$M_x^2 \equiv 4\pi\sigma_{0x}\sigma_{\infty x} \quad (9)$$

[0087]
$$M_y^2 \equiv 4\pi\sigma_{0y}\sigma_{\infty y} \quad (10)$$

[0088] 수식(9) 및 (10)의 재배열 및 수식(7) 및 (8)로의 치환은 다음과 같이 산출된다:

[0089]
$$\sigma_x^2(z) = \sigma_{0x}^2(z_{0x}) + \frac{\lambda^2 M_x^4}{(4\pi\sigma_{0x})^2} (z - z_{0x})^2 \quad (11)$$

[0090]
$$\sigma_y^2(z) = \sigma_{0y}^2(z_{0y}) + \frac{\lambda^2 M_y^4}{(4\pi\sigma_{0y})^2} (z - z_{0y})^2 \quad (12)$$

[0091] 여기서, 다음과 같이 재작성될 수 있다:

[0092]
$$\sigma_x^2(z) = \sigma_{0x}^2(z_{0x}) \left[1 + \frac{(z - z_{0x})^2}{Z_{Rx}^2} \right] \quad (13)$$

[0093]
$$\sigma_y^2(z) = \sigma_{0y}^2(z_{0y}) \left[1 + \frac{(z - z_{0y})^2}{Z_{Ry}^2} \right] \quad (14)$$

[0094] 여기서, x 방향 및 y 방향의 레일리 범위 Z_{Rx} 및 Z_{Ry} 는 각각, 다음으로 주어진다:

[0095]
$$Z_{Rx} = \frac{4\pi\sigma_{0x}^2}{M_x^2\lambda} \quad (15)$$

[0096]
$$Z_{Ry} = \frac{4\pi\sigma_{0y}^2}{M_y^2\lambda} \quad (16)$$

[0097] 레일리 범위는 레이저 빔의 분산이 2배(빔 허리의 위치의 분산에 대해)가 되는 거리(ISO 11146-1 : 2005(E)의 3.12절에 정의된 바와 같이 빔 허리 위치에 대한 거리)에 상응하며 레이저 빔의 단면적의 발산의 척도이다. 레일리 범위는 빔의 허리 위치(최대 강도의 위치)에서 관찰된 값의 절반으로 광학 강도가 감소하는 빔 축을 따른 거리로 관찰될 수도 있다. 레일리 범위가 큰 레이저 빔은 발산이 낮으며 레일리 범위가 작은 레이저 빔보다 전과 방향의 거리로 더 천천히 확장된다.

[0098] 상기 수식은 레이저 빔을 설명하는 강도 프로파일 $I(x, y, z)$ 을 이용하여 임의의 레이저 빔(가우스 빔만이 아닌)에 적용될 수 있다. 가우스 빔의 TEM₀₀ 모드의 경우, 강도 프로파일은 다음으로 주어진다:

[0099]
$$I(x,y) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} w_0 e^{-\frac{2(x^2+y^2)}{w_0^2}} \quad (17)$$

[0100] 여기서, w_0 는 빔 허리 위치(z_0)에서 빔의 최대 빔 강도의 $1/e^2$ 로 빔 강도가 감소하는 반경으로 정의된 반경이다. 수식(17) 및 상기 수식으로부터, TEM₀₀ 가우스 빔에 대해 다음 결과를 얻는다:

[0101]
$$\sigma_{0x}^2 = \sigma_{0y}^2 = \frac{w_0^2}{4} \quad (18)$$

[0102]
$$\sigma_{\infty x}^2 = \sigma_{\infty y}^2 = \frac{1}{4\pi^2 w_0^2} \quad (19)$$

[0103]
$$M_x^2 = 4\pi\sigma_{0x}\sigma_{\infty x} = 1 \quad (20)$$

[0104]
$$M_y^2 = 4\pi\sigma_{0y}\sigma_{\infty y} = 1 \quad (21)$$

[0105]
$$Z_{Rx} = \frac{4\pi\sigma_{0x}^2}{M_x^2\lambda} = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (22)$$

[0106]
$$Z_{Ry} = \frac{4\pi\sigma_{0y}^2}{M_y^2\lambda} = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (23)$$

[0107]
$$w^2(z) = w_0^2 + \frac{\lambda^2}{(\pi w_0)^2} (z - z_0)^2 = w_0^2 \left[1 + \frac{(z - z_0)^2}{Z_R^2} \right] \quad (24)$$

[0108] 여기서, $Z_R = Z_{Rx} = Z_{Ry}$ 이다. 가우스 빔에 대해, $M^2 = M_x^2 = M_y^2 = 1$ 임을 또한 알아야 한다.

[0109] 빔 단면은 모양 및 치수로 특징지어진다. 전술한 바와 같이, 비-축대칭 빔 스폿(114)인 투명 워크피스(160) 상에 빔 스폿을 투영하는 것이 바람직할 수 있다. 비-축대칭 단면의 예는 타원형 단면을 포함한다. 빔 단면의 치수는 빔의 스폿 크기에 의해 특징지어진다. 가우스 빔의 경우, 스폿 크기는 빔의 강도가 최대값의 $1/e^2$ 로 감소하는 방사상 범위로 정의되는 경우가 많으며, 수식(17)에 w_0 으로 표시된다. 가우스 빔의 최대 강도는 강도 분포의 중심($x = 0$ 및 $y = 0$ (데카르트 좌표), 또는 $r = 0$ (원통형 좌표))에서 일어나고 스폿 크기 측정에 사용된 방사상 범위는 중심에 대해 측정된다.

[0110] 축대칭을 가진 빔(즉, 빔 전파 축 Z 를 중심으로 회전 대칭) 단면은 ISO 11146-1 : 2005(E)의 3.12절에 명시된 빔 허리 위치에서 측정되는 단일 치수 또는 스폿 크기로 특징지어질 수 있다. 가우스 빔에 대해, 수식 (17)은 스폿 크기가 w_0 와 동일하며, 식 (18)으로부터 $2\sigma_{0x}$ 또는 $2\sigma_{0y}$ 에 해당한다는 것을 보여준다. 스폿 크기는 축대칭 빔과 달리 $\sigma_{0x} \neq \sigma_{0y}$ 인 비-축대칭 빔 단면에 대해 유사하게 정의될 수 있다. 결과적으로, 두 개의 스폿 크기 파라미터를 가진 비-축대칭 빔의 단면 치수를 특징지을 필요가 있으며, 여기서, x 방향 및 y 방향으로 각각 w_{0x} 및 w_{0y} 는 다음과 같다.

[0111]
$$w_{0x} = 2\sigma_{0x} \quad (25)$$

[0112]
$$w_{0y} = 2\sigma_{0y} \quad (26)$$

[0113] 비-축대칭 빔에 대한 축방향(즉, 임의의 회전 각도) 대칭이 없다는 것은 σ_{0x} 및 σ_{0y} 의 값의 계산 결과가 x 축 및 y 축의 방향 선택에 따라 것임을 의미한다. 예를 들어, 일부 실시예에서, x 축은 비-축대칭 빔 스폿(114)의 장축(116)일 수 있고, y 축은 단축(115)일 수 있다. 다른 실시예에서, x 축은 단축(115)이고 y 축은 장축(116)일 수 있다. ISO 11146-1:2005(E)는 이들 기준 축을 전력 밀도 분포의 주축(3.3-3.5절)으로 언급하고 다음의 설명에서 x 축과 y 축이 이 주축과 정렬된 것을 상정할 것이다. 또한, 단면 평면에서 x 축 및 y 축이 회전될 수 있는 각도(Φ)(예컨대, 각각 x 축 및 y 축에 대한 기준 위치에 대한 x 축 및 y 축의 각도)는 축-비대칭 빔에 대

한 스폿 크기 파라미터의 최소값($W_{o,min}$) 및 최대값($W_{o,max}$)을 정의하는데 사용될 수 있다:

[0114] $W_{o,min} = 2\sigma_{o,min}$ (27)

[0115] $W_{o,max} = 2\sigma_{o,max}$ (28)

[0116] 여기서, $2\sigma_{o,min} = 2\sigma_{0x}(\phi_{min,x}) = 2\sigma_{0y}(\phi_{min,y})$ 및 $2\sigma_{o,max} = 2\sigma_{0x}(\phi_{max,x}) = 2\sigma_{0y}(\phi_{max,y})$ 이다. 빔 단면의 축방향 비대칭의 크기는 종횡비로 정량화될 수 있으며, 상기 종횡비는 $W_{o,max}$ 대 $W_{o,min}$ 의 비율로 정의된다. 축대칭 빔 단면은 종횡비가 1.0인 반면, 타원형 및 다른 비-축대칭 빔 단면은 1.0보다 큰 종횡비, 예를 들어 1.1보다 크고, 1.2보다 크고, 1.3보다 크고, 1.4보다 크고, 1.5보다 크고, 1.6보다 크고, 1.7보다 크고, 1.8보다 크고, 1.9보다 크고, 2.0보다 크고, 동일 수 있다.

[0117] 빔 단면은 투명 워크피스(160) 내의 펄스 레이저 빔(112)에 의해 형성된 결함(172)의 단면 형상에 영향을 미친다. 결함(172)의 단면 형상은 펄스 레이저 빔(112)의 전파 방향에 수직인 방향으로의 결함의 형상을 나타낸다. 예를 들어, 레이저 빔이 투명 워크피스(160)의 이미징 표면(162)에 정상적으로 입사되는 경우, 결함(172)의 단면 형상은 이미징 표면(162)의 평면의 결함의 형상(172), 또는 투명 워크피스의 이미징 표면(162)의 평면에 평행한 임의의 평면의 결함(172)의 형상에 상응한다. 하나의 예시로서, 원형 빔 단면을 가진 레이저 빔은 원형의 결함(172)을 형성하고 비-원형 빔 단면의 레이저 빔은 비-원형의 결함(172)을 형성한다.

[0118] 빔 단면의 제어는 분리된 부분에서 더 효과적인 절단, 적은 결함 및 더 높은 에지 강도를 유도한다. 빔 단면의 제어는 스폿 크기, 단면 형상 및 빔 단면의 방향 제어를 포함한다. 이론에 구속되지를 바라지 않고, 원하는 분리선(165)을 따라(또는 대략적으로) 배향된 최대 스폿 크기 파라미터($W_{o,max}$)를 갖는 비-축대칭 빔 단면은 절단 궤도를 따라 균열 방향을 지향시킴으로써 절단을 개선한다고 여겨진다. 축대칭 빔 단면의 경우, 손상 영역의 형성과 관련된 응력이 손상 영역 근처에 집중되지만, 무작위 방향으로 집중된다고 여겨진다. 임의의 응력 방향은 의도된 절단 궤도에서 멀어지는 방향으로 파단을 야기하고, 분리된 부분의 미세 균열 및 다른 결함으로 나타난다. 이러한 미세 균열 및 결함은 분리된 부분의 벌크(bulk) 및/또는 에지의 기계적 강도를 감소시키는 것으로 여겨진다. 비-축대칭 빔 단면 및 빔 스폿을 사용하고 원하는 분리선(165)을 따라 최대 스폿 크기($W_{o,max}$) (예컨대, 장축(116))의 방향을 배향시킴으로써, 성형 손상 영역과 관련된 결함 또는 균열이 원하는 분리선(165)으로부터 멀어지는 방향으로 더 적은 균열 또는 결함을 형성하면서 절단부를 따라 지향될 수 있다고 여겨진다. 원하는 분리선(165)과 정렬된 균열의 결함은 원하는 분리선(165)으로부터 멀어지는 방향으로 지향된 결함 또는 균열에 대해 바람직하다.

[0119] 결함(172)을 형성하는데 사용된 펄스 레이저 빔(112)의 빔 단면의 종횡비($\frac{W_{o,max}}{W_{o,min}}$) (예컨대, 비-축대칭 빔 스폿(114)의 종횡비)는 1.1 초과, 1.3 초과, 1.5 초과, 2.0 초과, 2.5 초과, 3.0 초과, 3.5 초과, 4.0 초과, 5.0 초과, 7.5 초과, 10.0 초과일 수 있고, 1.1 내지 20.0의 범위, 1.2 내지 15.0의 범위, 1.3 내지 10.0의 범위, 1.3 내지 7.5의 범위, 1.3 내지 5.0의 범위, 1.5 내지 7.5의 범위, 1.5 내지 5.0의 범위, 1.5 내지 3.0의 범위, 1.75 내지 5.0의 범위, 2.0 내지 4.0의 범위에 있을 수 있다.

[0120] 레이저 전파 방향에서 결함(172)의 균일성(예컨대, 투명 워크피스(160)의 깊이 치수)을 증진시키기 위해, 발산이 낮은 펄스 레이저 빔(112)이 사용될 수 있다. 하나 이상의 실시예에서, 발산이 작은 비-축대칭 레이저 빔은 결함(172)을 형성하는데 이용될 수 있다. 전술한 바와 같이, 발산은 레일리 범위에 의해 특징지어질 수 있다. 비-축대칭 빔의 경우, 주축 X 및 Y에 대한 레일리 범위는 각각 x 방향 및 y 방향에 대해 식(15) 및 (16)에 의해 정의되며, 여기서 임의의 실제 빔에 대해 $M_x^2 > 1$ 및 $M_y^2 > 1$ 이고, 여기서 σ_{0x}^2 와 σ_{0y}^2 는 레이저 빔의 강도 분포에 의해 결정되는 것을 보여줄 수 있다. 대칭 빔의 경우, 레일리 범위는 X 방향 및 Y 방향에서 동일하며, 가우스 강도 분포를 갖는 빔에 대해, 수식(22) 또는 수식(23)에 의해 표현된다. 낮은 발산은 레일리 범위의 큰 값과 레이저 빔의 약한 회절과 관련이 있다.

[0121] 가우스 강도 프로파일을 갖는 빔은, 결함을 형성하기 위해 레이저 가공에 덜 바람직 할 수 있는데, 그 이유는, 유리와 같은 재료를 수정하기 위해 사용 가능한 레이저 펄스 에너지를 가능하게 하기 위해 충분히 작은 스폿 크기(예컨대 약 1 내지 5 마이크로 또는 약 1-10 마이크로와 같은, 마이크로 범위의 스폿 크기)에 초점 맞춰질 때, 짧은

전과 거리에서 크게 회절하고 상당히 발산한다. 낮은 발산을 달성하기 위해, 회절을 감소시키기 위해 펄스 레이저 빔의 강도 분포를 제어하거나 최적화하는 것이 바람직하다. 펄스 레이저 빔은 비-회절 또는 약-회절일 수 있다. 약하게 회절되는 레이저 빔은 준-비-회절 레이저 빔을 포함한다. 대표적인 약-회절 레이저 빔에는 베셀 빔(Bessel beams), 가우스-베셀 빔(Gauss-Bessel beams), 에어리 빔(Airy beams), 웨버 빔(Weber beams) 및 마티유 빔(Mathieu beams)이 포함된다.

[0122] 비-축대칭 빔에 대해, 레일리 범위 Z_{Rx} 와 Z_{Ry} 가 동일하지 않다. 수식(15)와(16)은 Z_{Rx} 와 Z_{Ry} 가 각각 σ_{0x} 와 σ_{0y} 에 의존한다는 것을 나타내며 σ_{0x} 와 σ_{0y} 의 값은 X 축과 Y 축의 방향에 따라 달라진다. 따라서 Z_{Rx} 와 Z_{Ry} 의 값은 주축에 상응하는 최소값과 최대값을 가지며, Z_{Rx} 의 최소값은 $Z_{Rx, min}$ 으로 표시되고 Z_{Ry} 의 최소값은 $Z_{Ry, min}$ 으로 표시된다. 축방향으로 대칭인 가우스 빔의 레일리 범위를 특징으로 하는 수식(수식(22) 또는(23))과 유사한 방식으로, 임의의 빔 프로파일 $Z_{Rx, min}$ 및 $Z_{Ry, min}$ 는 다음과 같이 주어진다:

[0123]
$$Z_{Rx, min} = \frac{4\pi\sigma_{0, min}^2}{M_x^2\lambda} \quad (29)$$

[0124]
$$Z_{Ry, min} = \frac{4\pi\sigma_{0, min}^2}{M_y^2\lambda} \quad (30)$$

[0125] 가우스 빔에 대해 이러한 곡선은 Z_{0x} 에 대해 대칭이 될 것으로 예상될 것이다.

[0126] 비대칭의 경우(도 24에 도시된 바와 같이), $Z_{Rx, min}$ 및 $Z_{Rx, max}$ 가 존재하는데, 둘 모두가 Z_{0x} 에서의 최소값으로부터 $\sigma_{0x, min}$ 가 $\sqrt{2}$ 의 계수에 의해 증가된 z 값까지 측정된다. $Z_{Rx, min}$ 은 명확히 두 값 중 작은 값이며 반면 $Z_{Rx, max}$ 는 더 큰 값이다. 수직 y 축에 대해서도 동일한 분석을 수행할 수 있다.

[0127] 레이저 빔의 발산이 가장 작은 레일리 범위를 가진 방향으로 짧은 거리에서 발생하기 때문에, 절단에 사용된 펄스 레이저 빔의 강도 분포는 Z_{Rx} 및 Z_{Ry} 의 최소값이 가능한 한 크도록 제어될 수 있다. Z_{Rx} 의 최소값 $Z_{Rx, min}$ 과 Z_{Ry} 의 최소값 $Z_{Ry, min}$ 은 비-축대칭 빔에 대해 다르기 때문에, 손상 영역을 성형할 때 $Z_{Rx, min}$ 과 $Z_{Ry, min}$ 중 더 작은 것을 가능한 한 크게 만드는데 강도 분포를 갖는 레이저 빔이 사용될 수 있다.

[0128] 상이한 실시예에서, $Z_{Rx, min}$ 및 $Z_{Ry, min}$ 중 더 작은 것은 50 μm 이상, 100 μm 이상, 200 μm 이상, 300 μm 이상, 500 μm 이상, 1 mm 이상, 2 mm 이상, 3 mm 이상, 5 mm 이상, 50 μm 내지 10 mm의 범위, 100 μm 내지 5 mm의 범위, 200 μm 내지 4 mm의 범위, 300 μm 내지 2 mm의 범위 등이다.

[0129] 본원에 명시된 $Z_{Rx, min}$ 및 $Z_{Ry, min}$ 중 더 작은 값 및 범위는 수식(27)에서 정의된 스폿 크기 파라미터 $W_{0, min}$ 의 조정을 통해 워크피스가 투명한, 상이한 파장에 대해 달성될 수 있다. 상이한 실시예에서, 스폿 크기 파라미터 $W_{0, min}$ 는 0.25 μm 이상, 0.50 μm 이상, 0.75 μm 이상, 1.0 μm 이상, 2.0 μm 이상, 3.0 μm 이상, 5.0 μm 이상, 0.25 μm 내지 10 μm 범위, 0.25 μm 내지 5.0 μm 범위, 0.25 μm 내지 2.5 μm 범위, 0.50 μm 내지 10 μm 범위, 0.50 μm 내지 5.0 μm 범위, 0.50 μm 내지 2.5 μm 범위, 0.75 μm 내지 10 μm 범위, 0.75 μm 내지 5.0 μm 범위, 0.75 μm 내지 2.5 μm 범위 등이다.

[0130] 손상 영역을 형성하는데 사용되는 레이저 빔의 레일리 범위는 동일한 파장을 갖는 가우스 빔의 레일리 범위보다 클 수 있다. 따라서, 공통 파장(λ)에서, 가우스 빔의 레일리 범위 Z_R (수식(22) 또는(23) 중 어느 하나에 명시된 바와 같이)에 대한 $Z_{Rx, min}$ 및 $Z_{Ry, min}$ 중 더 작은 값의 비율은 2 이상, 5 이상, 10 이상, 25 이상, 50 이상, 100 이상, 250 이상, 500 이상, 1000 이상, 2 내지 1500 범위, 5 내지 1250 범위, 10 내지 1000 범위, 25 내지 1000 범위, 100 내지 1000 범위 동일 수 있다.

[0131] 비-회절 또는 준 비-회절 빔은 일반적으로 반경에 비해 비-단조적으로 감소하는 것과 같은 복잡한 강도 프로파일을 갖는다. 가우스 빔과 유사하게, 유효 스폿 크기 $W_{0, eff}$ 는 강도가 최대 강도의 $1/e^2$ 로 감소하는 최대 강도($r=0$)의 방사상 위치로부터 임의의 방향으로 최단 방사상 거리로서 비-축대칭 빔에 대해 정의될 수 있다. 유효 스폿 크기 $W_{0, eff}$ 에 기반한 레일리 범위에 대한 기준은 다음과 같이 손상 영역을 형성하기 위한 비-회절 또는

준 비-회절 빔에 대해 지정될 수 있다:

[0132] $Z_{R_x, \min}$ 및 $Z_{R_y, \min}$ 중 더 작은 값 $> F_D \frac{\pi \omega_{0, \text{eff}}^2}{\lambda}$ (31)

[0133] 여기서, F_D 는 10 또는 그 이상의 값을 가지며, 더욱 구체적으로 F_D 는 적어도 10, 적어도 50, 적어도 100, 적어도 250, 적어도 500, 적어도 1000, 10 내지 2000의 범위, 50 내지 1500의 범위의 값을 갖는 무차원 발산 계수이다. 수식(31)과 수식(22) 또는 (23)을 비교하면, 비-회절 또는 준 비-회절 빔에 대해, 수식(31)의 $Z_{R_x, \min}$ 및 $Z_{R_y, \min}$ 중 더 작은 값인, 유효 빔 크기가 두 배가 되는 거리가 통상적인 가우스 빔 프로파일이 사용된 경우 예상되는 거리의 F_D 배가 되는 것을 볼 수 있다.

[0134] 레일리 범위는 또한 전술한 바와 같이, 빔의 피크 강도가 2의 계수까지 떨어지는 거리를 측정함으로써 결정될 수 있다. 이를 레일리 범위를 결정하기 위한 강도 방법으로서 본원에 나타낸다.

[0135] 발명자들은 유효 스폿 크기 $\omega_{0, \text{eff}}$ 에 기초한 레일리 범위에 대한 기준이 다음과 같이 손상 영역을 형성하기 위한 비-회절 또는 준 비-회절 빔으로 지정될 수 있음을 발견했다:

[0136] $Z_{R, \min} > F_D \frac{\pi \omega_{0, \text{eff}}^2}{\lambda}$ (31')

[0137] 레일리 범위를 결정할 때, 분산 방법, 즉 수식(31) 또는 (31')이 사용될 수 있거나 또는 강도 방법이 사용될 수 있다. 강도 방법을 사용할 때, 단지 하나의 대답, 즉 x와 y 사이에 차이가 없기 때문에, 최소 레일리 범위에 대해 하나의 값이 존재한다.

[0138] 무차원 발산 계수(F_D)는 레이저 빔이 준 비-회절인지 여부를 결정하기 위한 기준을 제공한다. 본원에서 사용된 바와 같이, 레이저 빔의 특성이 $F_D \geq 10$ 의 값을 갖는 수식(31)을 만족하는 경우, 레이저 빔은 준 비-회절인 것으로 간주된다. F_D 의 값이 증가함에 따라, 레이저 빔은보다 거의 완벽하게 비-회절 상태에 도달한다.

[0139] 도 3-7a를 참조하면, 광학 조립체(100)는 준 비-회절인 펄스 레이저 빔(112)(도 3-7a)를 생성하고, 일부 실시예에서, 투명 워크피스(160)에서 비-축대칭 빔 스폿(114)(도 4-7a)을 생성한다. 예를 들어, 도 3은, 예를 들어, 준 비-회절 인 펄스 레이저 빔(112)을 생성하기 위한, 펄스 레이저 가공을 위한 종래의 광학 조립체(100)를 도시한다. 또한, 도 4-7a 각각은 투명 워크피스(160)에서 비-축대칭 빔 스폿(114)을 형성하기 위한, 도 3에 존재하지 않는 부가적인 구성요소 및 배열을 포함하는 광학 조립체(100)를 도시한다. 예를 들어, 도 4의 광학 조립체(100)는 빔 경로(111)에 대해 오프셋된 비구면 광학 요소(120)를 포함하고, 도 5a 및 5b의 광학 조립체는 빔 경로(111)에 위치한 하나 이상의 광학 차단 요소(140)를 포함한다. 또한, 도 6 및 도 7a 각각의 광학 조립체(100)는 펄스 레이저 빔(112)의 제2 빔 부분으로부터 펄스 레이저 빔(112)의 제1 부분을 절어긋나게 하도록 구성된 하나 이상의 절어긋남 광학 요소를 포함한다. 특히, 도 6의 광학 조립체(100)의 절어긋남 광학 요소는 빔 경로(111)에 위치한 광학 지연 플레이트(142)를 포함하고, 도 7a의 광학 조립체(100)의 절어긋남 광학 요소는 빔 경로(111)에 위치한 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150)(또한 도 7b에 도시됨)를 포함한다. 본원에 사용된 바와 같이, "절어긋남"은 펄스 레이저 빔의 제1 부분을 펄스 레이저 빔의 제2 부분과 절어긋나게 만드는 것을 의미한다.

[0140] 도 3-7a 각각은 빔 소스(110), 비구면 광학 요소(120)(예컨대, 액시콘 렌즈), 제1 렌즈(130), 및 제2 렌즈(132)를 포함한다. 또한, 빔 소스(110)에 의해 출력된 펄스 레이저 빔(112)이, 예를 들어, 비구면 광학 요소(120)를 가로지르고, 이후 제1 및 제2 렌즈(130, 132) 모두를 가로지른 후, 투명 워크피스(160)를 조사하도록 위치될 수 있다. 광학 축(102)은 Z 축을 따라 빔 소스(110)와 투명 워크피스(160) 사이에서 연장한다. 또한, 도 3-7a의 광학 조립체(100)는 빔 경로(111)의 비구면 광학 요소(120)와 투명 워크피스(160) 사이에 위치한 도브 프리즘(180, dove prism)을 선택적으로 포함할 수 있다. 도브 프리즘(180)이 도 5a, 5b 및 6에 도시되어 있지만, 본원에 설명된 임의의 광학 조립체(100)이 도브 프리즘(180)을 포함할 수 있다는 것을 이해해야 한다. 또한, 광학 축(102) 주위의 도브 프리즘(180)의 회전은 펄스 레이저 빔(예컨대, 비-축대칭 빔 스폿(114))의 빔 단면을 회전시킬 수 있다. 비-축대칭 빔 스폿(114)의 회전은 투명 워크피스(160)의 원하는 분리선(165)을 따라 비-축대칭 빔 스폿(114)의 장축(116)을 배향시키는 것을 용이하게 한다. 하기 실시예에서 설명된 바와 같이, 비-축대칭 빔 스폿(114)을 회전시키는 다른 방법이 고려된다.

- [0141] 도 3-7a를 더 참조하면, 빔 소스(110)는 어떤 공지되거나 또는 아직 개발되지 않은 펄스 레이저 빔(112)을 출력하도록 구성된 빔 소스(110)를 포함할 수 있다. 작동시, 윤곽선(170)의 결합(172)은 투명 워크피스(160)와 빔 소스(110)에 의해 출력된 펄스 레이저 빔(112)의 상호 작용에 의해 생성된다. 일부 실시예에서, 빔 소스(110)는, 예를 들어, 1064nm, 1030nm, 532nm, 530nm, 355nm, 343nm, 266nm 또는 215nm의 파장을 포함하는 펄스 레이저 빔(112)을 출력할 수 있다. 또한, 투명 워크피스(160)에 결합(172)을 형성하는데 사용되는 펄스 레이저 빔(112)은 선택된 펄스 레이저 파장에 대해 투명한 재료에 매우 적합할 수 있다.
- [0142] 결합(172)을 형성하기 위한 적절한 레이저 파장은 투명 워크피스(160)에 의한 흡수 및 산란의 결합된 손실이 충분히 낮은 파장이다. 실시예에서, 파장에서 투명 워크피스(160)에 의한 흡수 및 산란으로 인한 결합된 손실은 20 %/mm 미만, 또는 15 %/mm 미만, 또는 10 %/mm 미만, 또는 5 %/mm 미만, 또는 1 %/mm 미만이며, 여기서, 치수단위 "/mm"는 펄스 레이저 빔(112)의 전파 방향(예컨대, Z 방향)으로 투명 워크피스(160) 내의 거리 밀리미터 당을 의미한다. 많은 유리 워크피스에 대한 대표적인 파장은 Nd³⁺의 기본 및 고조파 파장(harmonic wavelengths)(예컨대, 1064 nm 근처의 기본 파장 및 532 nm, 355 nm, 및 266 nm 근처의 고차 고조파 파장을 가진 Nd³⁺:YAG 또는 Nd³⁺:YVO₄)을 포함한다. 주어진 기관 재료에 대한 결합된 흡수 및 산란 손실 요건을 충족시키는 스펙트럼의 자외선, 가시광선 및 적외선 부분의 다른 파장도 사용될 수 있다.
- [0143] 작동시, 빔 소스(110)에 의해 출력된 펄스 레이저 빔(112)은 투명 워크피스(160)에 다중-광자 흡수(MPA)를 생성할 수 있다. MPA는 하나의 상태(보통 기저 상태)에서 높은 에너지 전자 상태(즉, 이온화)로 분자를 여기(excite)시키는 2개 이상의 동일하거나 또는 상이한 주파수의 광자의 동시 흡수이다. 분자의 관련된 하부 및 상부 상태 사이의 에너지 차이는 관련된 광자의 에너지의 합과 동일하다. 유도 흡수라고도 불리는 MPA는 예를 들어 선형 흡수보다 몇 차 더 약한 2차 또는 3차 과정(또는 더 고차의)일 수 있다. 2차 유도 흡수의 강도가 광 강도의 제곱에 비례할 수 있다는 점에서 선형 흡수와 다르며, 예를 들어, 따라서 비선형 광학 과정이다.
- [0144] 윤곽선(170)을 생성하는 천공 단계는 도 3a-7a와 관련하여 하기에 기술되고 설명된 광학기(optics)와 결합하여 빔 소스(110)(예컨대, 초단 펄스 레이저)를 이용하여, 투명 워크피스(160) 상에 비-축대칭 빔 스폿(114)을 투영하고 도 1b의 펄스 레이저 빔 초점선(113)을 발생할 수 있다. 펄스 레이저 빔 초점선(113)은 투명 워크피스(160)에 일련의 결합(172)을 형성하기 위해 투명 워크피스(160)를 완전히 천공하기 위해, 전술한 바와 같은, 비-축대칭 가우스-베셀 빔과 같은, 준 비-회절 빔을 포함한다. 일부 실시예에서, 개별 펄스의 펄스 지속 기간은 약 1 psec 내지 약 100 psec, 예컨대, 약 5 psec 내지 약 20 psec의 범위에 있으며, 개별 펄스의 반복율은 약 1kHz 내지 4MHz, 예컨대, 약 10kHz 내지 약 3MHz, 또는 약 10kHz 내지 약 650kHz의 범위에 있을 수 있다.
- [0145] 도 7c 및 도 7d를 또한 참고하면, 전술한 개별 펄스 반복 속도에서의 단일 펄스 작동에 더하여, 펄스는 2개의 펄스(500A) 또는 그 이상의 펄스 버스트(500)로 생성될 수 있다(예컨대, 펄스 버스트(500) 당 3 펄스, 4 펄스, 5 펄스, 10 펄스, 15 펄스, 20 펄스 또는 그 이상). 펄스 버스트(500) 내의 펄스(500A)는 약 1 nsec 내지 약 50 nsec, 예컨대 약 10nsec 내지 약 30nsec의 범위, 예컨대 약 20nsec의 지속 기간에 의해 분리될 수 있다. 다른 실시예에서, 펄스 버스트(500) 내의 펄스(500A)는 최대 100 psec까지의 지속 기간(예를 들어, 0.1 psec, 5 psec, 10 psec, 15 psec, 18 psec, 20 psec, 22 psec, 25 psec, 30 psec, 50 psec, 75 psec 또는 이들 사이의 임의의 범위)으로 분리될 수 있다. 주어진 레이저에 대해, 펄스 버스트(500) 내의 인접한 펄스(500A)들 사이의 시간 분리(Tp)(도 7d)는 비교적 균일할 수 있다(예컨대, 서로 약 10 % 이내). 예를 들어, 일부 실시예에서, 펄스 버스트(500) 내의 각 펄스(500A)는 후속 펄스로부터 약 20nsec(50MHz)만큼 시간상 분리된다. 예를 들어, 각각의 펄스 버스트(500) 사이의 시간은 약 0.25 마이크로초내지 약 1000 마이크로초, 예컨대, 약 1 마이크로초 내지 약 10 마이크로초, 또는 약 3 마이크로초 내지 약 8 마이크로초일 수 있다.
- [0146] 본원에 기술된 빔 소스(110)의 예시적인 실시예들 중 일부에서, 시간 분리(Tb)(도 7d)는 빔 소스(110)가 약 200kHz의 버스트 반복 속도를 포함하는 펄스 레이저 빔(112)을 출력하는 경우 약 5 마이크로초이다. 레이저 버스트 반복 속도는 후속 버스트의 제1 펄스에 대한 버스트의 제1 펄스 사이의 시간(Tb)(레이저 버스트 반복 속도 = 1/Tb)과 관련이 있다. 일부 실시예에서, 레이저 버스트 반복 속도는 약 1kHz 내지 약 4MHz의 범위일 수 있다. 실시예에서, 레이저 버스트 반복 속도는 예를 들어, 약 10kHz 내지 650kHz 범위일 수 있다. 후속 버스트의 제1 펄스에 대한 각 버스트의 제1 펄스 사이의 시간(Tb)은 약 0.25 마이크로초(4 MHz 버스트 반복 속도) 내지 약 1000 마이크로초(1 kHz 버스트 반복 속도), 예를 들어 약 0.5 마이크로초(2 kHz 버스트 반복 속도) 내지 약 40 마이크로초(25 kHz 버스트 반복 속도), 또는 약 2 마이크로초(500 kHz 버스트 반복 속도) 내지 약 20 마이크로초(50 kHz 버스트 반복 속도)의 범위 내에 있을 수 있다. 정확한 타이밍, 펄스 지속 시간 및 버스트 반복 속도는 레이저 설계에 따라 다를 수 있지만, 고강도의 짧은 펄스(Td < 20 psec 및 일부 실시예에서는 Td ≤ 15

psec)가 특히 잘 작동하는 것으로 나타났다.

[0147] 버스트 반복 속도는 약 1kHz 내지 약 2kHz, 예컨대 약 1kHz 내지 약 200kHz 범위일 수 있다. 펄스 버스트(500)의 버스팅(Bursting) 또는 생성은 펄스(500A)의 방출이 균일하고 일정한 스트림이 아닌 펄스 버스트(500)의 긴 밀한 클러스터에 있는 레이저 작동의 하나의 유형이다. 펄스 버스트 레이저 빔은 투명 워크피스(160)의 재료와 과정에서 실질적으로 투명하도록 작동되는 투명 워크피스(160)의 재료에 기초하여 선택된 과정을 가질 수 있다. 재료에서 측정된 버스트 당 평균 레이저 출력은 재료 두께의 mm 당 적어도 약 40 μJ일 수 있다. 예를 들어, 실시예에서, 버스트 당 평균 레이저 출력은 약 40 μJ/mm 내지 약 2500 μJ/mm, 또는 약 500 μJ/mm 내지 약 2250 μJ/mm일 수 있다. 특정 예시에서, 두께가 0.5 mm 내지 0.7 mm인 코닝 EAGLE XG[®] 투명 워크피스에 대해, 약 300 μJ 내지 약 600 μJ의 펄스 버스트가 워크피스를 절단 및/또는 분리할 수 있으며, 이것은 약 428 μJ/mm 내지 약 1200 μJ/mm의 예시의 범위에 해당한다(즉, 0.7mm EAGLE XG[®] 유리의 경우 300 μJ/0.7mm, 0.5mm EAGLE XG[®] 유리의 경우 600 μJ/0.5mm).

[0148] 투명 워크피스(160)를 수정하는데 필요한 에너지는 버스트 에너지(즉, 각각의 펄스 버스트(500)가 일련의 펄스(500A)를 포함하는 펄스 버스트(500) 내에 포함된 에너지), 또는 단일 레이저 펄스 내에 포함된 에너지(그 중 다수가 버스트를 포함할 수 있음)에 관해서 설명될 수 있다. 펄스 버스트 당 에너지는 약 25 μJ 내지 약 750 μJ, 예컨대, 약 50 μJ 내지 약 500 μJ, 또는 약 50 μJ 내지 약 250 μJ 일 수 있다. 일부 유리 조성물의 경우, 펄스 버스트 당 에너지는 약 100 μJ 내지 약 250 μJ 일 수 있다. 그러나, 디스플레이 또는 TFT 유리 조성물의 경우, 펄스 버스트 당 에너지는(예컨대, 투명 워크피스(160)의 특정 유리 조성물에 따라 약 300 μJ 내지 약 500 μJ, 또는 약 400 μJ 내지 약 600 μJ)더 높을 수 있다. 이러한 버스트를 발생할 수 있는 펄스 레이저 빔(112)의 사용은 투명한 재료, 예를 들어 유리를 절단 또는 변형시키는데 유리하다. 단일 펄스 레이저의 반복 속도에 의해 시간상으로 이격된 단일 펄스의 사용과는 달리, 버스트 내에서 펄스의 빠른 시퀀스에 걸쳐 레이저 에너지를 퍼지게 하는 버스트 시퀀스의 사용은 단일-펄스 레이저로 가능한 것보다 재료와의 높은 강도 상호 작용의 더 큰 기간에 대한 접근을 허용한다.

[0149] 도 3-7a를 다시 참조하면, 비구면 광학 요소(120)는 빔 소스(110)와 투명한 워크피스(160) 사이의 빔 경로(111) 내에 위치된다. 작동시, 비구면 광학 요소(120)를 통한 펄스 레이저 빔(112), 예컨대, 인입 가우스 빔은 전술한 바와 같이, 비구면 광학 요소(120)를 넘어 전파하는 펄스 레이저 빔(112)의 일부가 준 비-회절이 되도록 펄스 레이저 빔(112)을 변경시킬 수 있다. 비구면 광학 요소(120)는 비구면 형상을 포함하는 임의의 광학 요소를 포함할 수 있다. 일부 실시예에서, 비구면 광학 요소(120)는, 액시콘 렌즈와 같은, 예를 들어, 음의 굴절 액시콘 렌즈, 양의 굴절 액시콘 렌즈, 반사 액시콘 렌즈, 회절 액시콘 렌즈, 프로그램 가능한 공간 광 변조기 액시콘 렌즈(예컨대, 위상 액시콘), 등과 같은 광학 요소를 생성하는 원뿔형 파면(conical wavefront)을 포함할 수 있다.

[0150] 일부 실시예에서, 비구면 광학 요소(120)는 그 형태가

$$z' = \left(\frac{cr^2}{1} \right) + (1 - (1+k)(c^2r^2))^{1/2} + (a_1r + a_2r^2 + a_3r^3 + a_4r^4 + a_5r^5 + a_6r^6 + a_7r^7 + a_8r^8 + a_9r^9 + a_{10}r^{10} + a_{11}r^{11} + a_{12}r^{12})$$

와 같이 수학적 으로 설명되는 적어도 하나의 비구면 표면을 포함하고, 여기서 z' 는 비구면 표면의 표면 세그(sag)이며, r 은 비구면 표면과 방사상 방향(예컨대, x-방향 또는 y-방향)의 광학축(102) 사이의 거리이고, c 는 비구면 표면의 표면 곡률(즉, $c_i=1/R_i$, 여기서, R 은 비구면 표면의 표면 반경임)이고, k 는 원뿔 상수(conic constant)이며, 계수 a_i 는 비구면 표면을 설명하는 1차 내지 12차 비구면 계수 또는 고차의 비구면 계수(다항식 비구면)이다. 하나의 예시의 실시예에서, 비구면 광학 요소(120)의 적어도 하나의 비구면 표면은 각각: -0.085274788; 0.065748845; 0.077574995; -0.054148636; 0.022077021; -0.0054987472; 0.0006682955;인 계수 a_1 - a_7 를 포함하고, 비구면 계수 a_8 - a_{12} 는 0이다. 이 실시예에서, 적어도 하나의 비구면 표면은 원뿔 상수 $k = 0$ 을 갖는다. 그러나 a_1 계수는 0이 아닌 값을 가지므로, 원뿔 상수 k 가 0이 아닌 값을 갖는 것과 동일하다. 따라서, 등가 표면은 0이 아닌 원뿔 상수 k , 0이 아닌 계수 a_1 , 또는 0이 아닌 k 와 0이 아닌 계수 a_1 의 조합을 명시함으로써 설명될 수 있다. 또한, 일부 실시예에서, 적어도 하나의 비구면 표면은 0이 아닌 a_2 - a_{12} (즉, 적어도 하나의 $a_2, a_3 \dots, a_{12} \neq 0$)을 갖는 적어도 하나의 고차 비구면 계수에 의해 설명되거나 정의된다. 하나의 예시적인 실시예에서,

비구면 광학 요소(120)는 0이 아닌 계수 α_3 을 포함하는, 입방체 형상의 광학 요소와 같은 3차 비구면 광학 요소를 포함한다.

[0151] 일부 실시예에서, 비구면 광학 요소가 액시콘을 포함하는 경우, 액시콘은, 펄스 레이저 빔(112)이 액시콘 렌즈로 들어갈 때 레이저 입력 표면(124)(평평한 표면)에 대해 측정된 각도에 대해, 예컨대, 약 0.5° 내지 약 5° , 또는 약 1° 내지 약 1.5° 또는 심지어는 약 0.5° 내지 약 20° 와 같이, 약 1.2° 의 각도를 갖는 레이저 출력 표면(126)(예컨대, 원뿔 표면)을 가질 수 있다. 또한, 레이저 출력 표면(126)은 원뿔형 팁(conical tip)으로 끝난다. 또한, 비구면 광학 요소(120)는 레이저 입력 표면(124)으로부터 레이저 출력 표면(126)까지 연장되고 원뿔형 팁에서 끝나는 중심선 축(122)을 포함한다. 다른 실시예에서, 비구면 광학 요소(120)는 왁시콘(waxicon), 공간 광 변조기와 같은 공간 위상 변조기, 또는 회절 광학 격자를 포함할 수 있다. 작동시, 비구면 광학 요소(120)는 인입 펄스 레이저 빔(112)(예컨대, 인입 가우스 빔)을, 결국 제1 렌즈(130) 및 제2 렌즈(132)를 통해 지향되는 준 비-회절 빔으로 형성한다.

[0152] 또한 도 3-7a를 참조하면, 제1 렌즈(130) 및 제2 렌즈(132)는 제1 렌즈(130)와 제2 렌즈(132) 사이의 시준 공간(134) 내에서 펄스 레이저 빔(112)을 시준할 수 있다. 또한, 제2 렌즈(132)는 이미징 평면(104)에 위치할 수 있는, 투명 워크피스(160)로 펄스 레이저 빔(112)을 초점 맞출 수 있다. 일부 실시예에서, 제1 렌즈(130) 및 제2 렌즈(132)는 각각 평평-볼록 렌즈를 포함한다. 제1 렌즈(130) 및 제2 렌즈(132)가 평평한 렌즈를 포함하는 경우, 제1 렌즈(130) 및 제2 렌즈(132)의 곡률은 각각 시준 공간(134)을 향하게 될 수 있다. 다른 실시예에서, 제2 렌즈(132)는 메니스커스 렌즈(meniscus lens), 비구면, 또는 다른 고차 보정된 초점 렌즈를 포함할 수 있다.

[0153] 또한, 제1 렌즈(130)는 제1 초점 길이(F1)를 포함하고, 제2 렌즈(132)는 제2 초점 길이(F2)를 포함한다. 본원에 사용된 바와 같이, "초점 길이"는 렌즈와 렌즈의 초점 사이의 거리로 정의된다. 일부 실시예에서, 제1 초점 길이(F1) 및 제2 초점 길이(F2)는 동일할 수 있다. 다른 실시예에서, 제1 초점 길이(F1)와 제2 초점 길이(F2)는 다를 수 있으며, 예를 들어 제2 초점 길이(F2)는 제1 초점 길이(F1)보다 작거나 또는 대안적으로 제2 초점 길이(F2)보다 클 수 있다. 일부 실시예에서, 제1 및 제2 렌즈(130, 132)는 초점 길이(F1, F2)를 가질 수 있으며, 각각 약 10 mm 내지 약 200 mm일 수 있다(예컨대, 약 25 mm 내지 약 200 mm, 또는 약 50 mm 내지 150 mm 또는 약 75 mm 내지 약 100 mm, 또는 약 25 mm 내지 약 50 mm 등).

[0154] 일부 실시예에서, 제1 렌즈(130)는 공통 초점 표면(105)이 제1 렌즈(130) 및 제2 렌즈(132) 사이의 시준 공간(134)에 위치하도록 제1 초점 길이(F1)와 제2 초점 길이(F2)의 합에 의해 제2 렌즈(132)로부터 이격될 수 있다. 그러나, 다른 공간 배치가 고려될 수 있다. 공통 초점 평면(105)은 제1 렌즈(130)로부터 하류에 제1 초점 길이(F1)만큼 이격되고 제2 렌즈(132) 상류에 제2 초점 길이(F2)만큼 이격된 제1 렌즈(130)와 제2 렌즈(132) 사이의 빔 경로(111)를 따른 위치이다. 본원에 사용된 "상류" 및 "하류"는 빔 소스(110)에 대한 빔 경로(111)를 따른 두 위치 또는 구성요소의 상대적인 위치를 나타낸다. 예를 들어, 펄스 레이저 빔(112)이 제2 구성요소를 지나가기 전에 제1 구성요소를 지나가는 경우 제1 구성요소는 제2 구성요소로부터 상류이다. 또한, 펄스 레이저 빔(112)이 제1 구성요소를 지나가기 전에 제2 구성요소를 지나가면 제1 구성요소는 제2 구성요소로부터 하류에 있다.

[0155] 이제 도 4를 참조하면, 광학 조립체(100)의 실시예는 방사상 방향(예컨대, 펄스 레이저 빔(112)의 반경을 따르는 방향)으로 펄스 레이저 빔(112)의 빔 경로(111)에 대해 오프셋되어 위치한 비구면 광학 요소(120)를 포함하는 것으로 도시된다. 빔 경로(111)에 대해 비구면 광학 요소(120)를 오프셋시킴으로써, 투명 워크피스(160) 상에 투영된 결과적인 빔 스폿은 도 2에 도시된 비-축대칭 빔 스폿(114)을 포함할 수 있다. 비구면 광학 요소(120)는 오프셋 거리(a)만큼 빔 경로(111)로부터 오프셋되어(예컨대, X-Y 평면에서 오프셋) 위치될 수 있다. 특히, 오프셋된 거리(a)는 펄스 레이저 빔이 비구면 광학 요소(120)의 레이저 입력 표면(124)을 조사하면서, 비구면 광학 요소(120)의 중심선 축(122)과 펄스 레이저 빔의 단면 중심 사이의 XY 평면에서의 거리이다. 비구면 광학 요소(120)와 빔 경로 사이의 상대적인 오프셋은 비구면 광학 요소(120)를 XY 평면을 따라 시프트하거나, 빔 소스(110)를 XY 평면을 따라 시프트하거나, 또는 둘 다에 의해 달성될 수 있다. 결과적인 빔 스폿의 대칭성을 충분히 파괴시키는데 필요한 오프셋의 크기는 펄스 레이저 빔(112)의 직경의 함수이며, 더 작은 입력 레이저 빔 직경은 대칭을 충분히 파괴하기 위해 더 적은 오프셋을 필요로 한다. 일부 실시예들에서, 오프셋 거리(a)는 약 10 마이크로미터 내지 약 500 마이크로미터, 예를 들어, 20 마이크로미터, 50 마이크로미터, 100 마이크로미터, 250 마이크로미터 등을 포함할 수 있다. 일부 실시예에서, 오프셋 거리(a)는 약 20 마이크로미터 내지 약 100 마이크로미터, 또는 약 50 마이크로미터 내지 약 100 마이크로미터 등일 수 있다. 일부 실시예에서, 오프셋 거리는 펄스 레이저 빔(112)과 비구면 광학 요소(120) 사이의 접

축 위치에서(예컨대, 비구면 광학 요소(120)의 레이저 입력 표면(124)에서) 펄스 레이저 빔(112)의 단면 직경의 약 10 % 내지 약 75 %의 거리를 포함할 수 있다.

[0156] 빔 경로(111)에 대해 비구면 광학 요소(120)를 오프셋시킴으로써, 결과적인 펄스 레이저 빔(112)은 예를 들어 약 4의 계수까지 감소된 전체 강도를 포함할 수 있다. 또한 펄스 레이저 빔(112)의 단면은 약 1.2 내지 약 2의 계수, 예를 들어, 1.4, 1.6, 1.8 등의 계수까지, XY 평면에서 X 방향, Y 방향 또는 이들의 조합으로 확장될 수 있다. 펄스 레이저 빔(112)의 단면을 넓히는 것은 확장 방향으로 장축(116)을 갖는 비-축대칭 빔 스폿(114)을 형성한다. 결과적인 펄스 레이저 빔(112)은 제1 렌즈(130)를 가로지른 후 시준 공간(134)에서 비-축대칭 링을 형성하는 비-축대칭 원추형 광선(ray)을 포함할 수 있다. 또한, 펄스 레이저 빔(112)의 단면은(예컨대, 비-축대칭 빔 스폿(114)) 비구면 광학 소자(120)를 광학 축(102)을 중심으로 회전시킴으로써 회전될 수 있다.

[0157] 이제 도 5a 및 도 5b를 참조하면, 광학 조립체(100)의 실시예는 빔 경로(111)를 따라 하나 이상의 차단 위치(141)에 위치되고, 빔 소스(110)와 투명 워크피스(160) 사이에서 전파되는 펄스 레이저 빔(112)의 일부분을 차단하는, 하나 이상의 광학 차단 요소(140)(예컨대, 불투명 광학 요소)를 포함하는 것으로 도시된다. 일부 실시예에서, 광학 차단 요소(140)는 애퍼처(aperture)를 더욱 포함할 수 있는 불투명 플레이트를 포함할 수 있다. 예를 들어, 광학 차단 요소(140)는 파괴되거나 손상되지 않고 펄스 레이저 빔(112)의 에너지를 견딜 수 있는 금속 플레이트 또는 다른 기판을 포함할 수 있다. 광학 차단 요소(140)는 광학 차단 요소(140)가 펄스 레이저 빔(112)의 빔 강도의 약 5 % 내지 약 95 %, 예를 들어, 적어도 약 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 85 %, 90 % 등을 차단하도록 빔 경로(111)에 위치될 수 있다. 하나의 예시로서, 광학 차단 요소(140)는 펄스 레이저 빔(112)의 빔 강도의 약 25 % 내지 약 80 %를 차단한다. 펄스 레이저 빔(112)의 빔 강도의 더 큰 비율을 차단하는 것은 비-축대칭 빔 스폿(114)의 단축(115)의 길이에 대해 비-축대칭 빔 스폿(114)의 장축(116)의 길이를 증가시키는 것이다. 그러나, 펄스 레이저 빔(112)의 빔 강도의 큰 비율을 차단하는 것은 광학 차단 요소(140)에서 손실된 펄스 레이저 빔(112)의 전력량을 증가시키는 것이다.

[0158] 일부 실시예에서, 광학 차단 요소(140)는 펄스 레이저 빔(112)의 단면 섹터(즉, 펄스 레이저 빔(112)의 중심 위치로부터 펄스 레이저 빔(112)의 최 외곽 직경으로 연장되는 펄스 레이저 빔(112)의 방위각 범위 또는 "파이 슬라이스(pie slice)"에 의해 정의된 섹터)를 차단할 수 있다. 섹터의 형태인 광학 차단 요소(140)는 펄스 레이저 빔(112)의 모든 반경에서 광선의 동일한 비율이 차단된다는 이점을 갖는다. 이러한 광학 조립체에서, 광학기는 펄스 레이저 빔 초점선(113)을 따라 상응하는 특정 위치에 대해 특정 반경의 광선을 맵핑(map)한다. 도 5a 및 도 5b에 도시된 예시의 실시예에서, 비구면 광학 요소(120) 근방의 낮은 반경 광선은 펄스 레이저 광선 초점선(113)의 상류 단부에서의 위치에 맵핑되고, 비구면 광학 요소(120) 부근의 높은 반경 광선은 펄스 레이저 빔 초점선(113)의 하류 단부 근처의 위치에 맵핑된다. 광학 차단 요소(140)가 큰 반경보다 작은 반경에서 광선의 큰 부분을 절단하면, 펄스 레이저 빔 초점선(113)의 단면의 타원율의 크기 또는 중형비는(하나의 예시로서, 비-축대칭 빔 스폿(114))그 길이를 통해 변한다. 이와 같이, 파이 슬라이스의 형태로 광학 차단 요소(140)를 형성하는 것은 펄스 레이저 빔 초점선(113)의 결과적인 단면이 펄스 레이저 빔 초점선(113)의 전체 길이를 통해 일정한 타원율을 유지할 것을 보장한다.

[0159] 다른 실시예에서, 광학 차단 요소(140)는 펄스 레이저 빔(112)의 단면 코드 부분을 차단할 수 있으며, 여기서, 펄스 레이저 빔(112)의 횡단면 코드 부분은 펄스 레이저 빔(112)의 단면 환경의 일부분 및 펄스 레이저 빔(112)의 임의의 단면 코드에 의해 접경된다. 또한, 이 예시적인 실시예에서, 빔 경로(111)에 위치된 광학 차단 요소(140)의 부분은 임의의 단면 코드와 접해있다. 또한, 광학적 차단 요소(140)는 펄스 레이저 빔(112)의 임의의 단면 부분을 차단할 수 있음을 알아야 한다.

[0160] 또한, 광학 저지 요소(140)는 빔 소스(110)와 투명 워크피스(160) 사이에 위치된다. 광학 차단 요소(140)가 빔 소스(110)와 투명 워크피스(160) 사이에 위치하기 때문에, 작동시, 펄스 레이저 빔(112)은 비구면 광학 요소(120)를 통과하고 광학 차단 요소(140)를 넘어 이동할 것이다(예컨대, 펄스 레이저 빔(112)의 차단되지 않은 부분은 광학 차단 요소(140)를 넘어 이동하지만, 펄스 레이저 빔(112)의 차단된 부분은 광학 차단 요소(140)를 넘어 이동하지 못한다). 또한, 펄스 레이저 빔(112)은 빔 전파 방향(예컨대, z 방향)을 따라 비구면 광학 요소(120) 및 광학 차단 요소(140)의 상대적인 순서에 상관없이 비구면 광학 요소(120)를 통해 그리고 광학 차단 요소(140) 너머 이동한다. 예를 들어, 광학 차단 요소(140)는 비구면 광학 요소(120)의 상류에 위치되어, 광학 차단 요소(140)가 빔 소스(110)와 비구면 광학 요소(120) 사이에 위치될 수 있다. 또한, 광학 차단 요소(140)가 비구면 광학 요소(120)의 하류에 위치되어, 광학 차단 요소(140)는 비구면 광학 요소(120)와 투명 워크피스(160) 사이에 위치될 수 있다.

- [0161] 일부 실시예에서, 광학 차단 요소(140)는, 예를 들어, 공통 초점 평면(105)에서 제1 및 제2 렌즈(130, 132) 사이의 시준 공간(134)에 위치될 수 있다. 또한, 펄스 레이저 비 축점선(113)의 단면(예컨대, 비-축대칭 빔 스폿(114))은 광학 축(102)에 대해 광학 차단 요소(140)를 회전시킴으로써 회전될 수 있다. 일부 실시예에서, 비-축대칭 빔 스폿(114)은 비구면 광학 요소(120)를 광학 경로(111)에 대해 오프셋하고 광학 차단 요소(140)로 펄스 레이저 빔(112)의 일부분을 차단함으로써 형성될 수 있다. 비구면 광학 요소(120)의 오프셋이 광학 차단 요소(140)을 지나간 레이저 빔 에너지의 많은 부분을 지향시키는데 사용되는 경우, 오프셋과 차단이 이러한 조합은 광학 차단 요소(140)에 의해 야기된 전력 손실량을 낮출 수 있으면서 타원형 또는 비-축대칭 빔 스폿(114)이 투명 워크피스(160) 상에 발생되고 투영되는 것을 계속 보장할 수 있다.
- [0162] 또한, 도 5b에 도시된 바와 같이, 일부 실시예에서, 광학 조립체(100)는 제1 광학 차단 요소(140a) 및 제2 광학 차단 구성 요소(140b)를 포함할 수 있다. 제1 광학 차단 요소(140a)는 제1 차단 위치(141a)에서 빔 경로(111)에 위치되고, 제2 광학 차단 요소는 제2 차단 위치(141b)에서 빔 경로(111)에 위치된다. 제1 광학 차단 요소(140a) 및 제2 광학 저지 요소(140b)는 빔 경로(111)의 일부분, 예를 들어, 빔 경로(111)의 상이한 부분을 각각 차단하도록 배치될 수 있다. 일부 실시예에서, 제1 광학 저지 요소(140a) 및 제2 광학 저지 요소(140b)는 각각 펄스 레이저 빔(112)의 상이한 단면 세그먼트를 차단할 수 있다. 예를 들어, 광학 차단 요소(140a, 140b)는 펄스 레이저 빔(112)의 단면의 반대 측을 차단하도록 평행하게 위치한 각각의 차단된 단면 세그먼트의 단면 코드 부분을 형성할 수 있다. 또는, 다른 예시에서, 광학 차단 요소(140a, 140b)는 원의 다른 섹터를 형성하여, 펄스 레이저 빔(112)의 단면의 반대 측을 차단할 수 있다.
- [0163] 일부 실시예에서, 제1 및 제2 차단 위치(141a, 141b)는 도 5b에 도시된 바와 같이, 광학 축(102)을 따라 동일한 Z 축 위치에 위치된다. 다른 실시예에서, 제1 및 제2 차단 위치(141a, 141b)는 광학 축(102)을 따라 상이한 위치일 수 있다. 또한, 제1 및 제2 광학 차단 요소(140a, 140b)는 펄스 레이저 빔(112)의 강도의 약 5% 내지 75%를 총괄적으로 차단할 수 있다. 또한, 제1 및 제2 광학 차단 요소(140a, 140b)는 펄스 레이저 빔(112)의 강도의 동등한 비율 또는 펄스 레이저 빔(112)의 강도의 상이한 비율을 차단할 수 있다.
- [0164] 또한, 도 5a 및 도 5b의 차단 위치(141, 141a, 141b)는 빔 소스(110)와 비구면 광학 요소(120) 사이에 각각 도시되어 있지만, 차단 위치(141, 141a, 141b)는 빔 소스(110)와 투명 워크피스(160) 사이, 예를 들어, 제1 렌즈(130) 및 제2 렌즈(132), 예를 들어, 공통 초점 평면(105) 사이의 임의의 위치일 수 있다. 이론적으로 제한하고자 하는 것은 아니지만, 다수(예컨대, 2개)의 광학 차단 요소(140)를 가진 펄스 레이저 빔(112)을 차단하는 것은 다수의 빔 스폿이 도 2에 도시된 바와 같이, 투명 워크피스(160)에서 비-축대칭 빔 스폿(114)을 집합적으로 정의하도록 형성된 투명 워크피스의 이미징 표면(162) 상에 다수의 빔 스폿을 투영할 수 있다.
- [0165] 이제 도 6을 참조하면, 빔 소스(110)와 투명 워크피스(160) 사이에 위치한 하나 이상의 광학 지연 플레이트(142)를 포함하는 것으로 광학 조립체(100)의 예시적인 실시예가 도시된다. 작동시, 광학 지연 플레이트(142)를 빔 경로(111)에 위치시키는 것은 제1 빔 부분의 광학 리타레이션을 유도하기 위해 광학 지연 플레이트를 통해 펄스 레이저 빔(112)의 제1 부분을 지향시킴으로써 제2 빔 부분으로부터 펄스 레이저 빔(112)의 제1 빔 부분을 걸어긋나게 하기 위해 펄스 레이저 빔(112)의 일부분 내에 광학 지연을 유도함으로써 도 2에 도시된 비-축대칭 빔 스폿(114)을 형성할 수 있다. 광학 지연 플레이트(142)는 펄스 레이저 빔(112)의 약 50%(예컨대, 펄스 레이저 빔(112)의 강도의 약 50%)가 광학 지연 플레이트(142)를 가로지르도록 빔 경로(111) 내에 위치될 수 있다. 이론에 한정하려는 것은 아니지만, 펄스 레이저 빔(112) 절반 이상의 광학 지연은 투명 워크피스(160)에서 비-축대칭 빔 스폿(114)을 집합적으로 정의하는 2개의 빔을 형성할 수 있다. 또한, 펄스 레이저 빔(112)의 단면(예컨대, 비-축대칭 빔 스폿(114))은 광학 축(102)에 대해 광학 지연 플레이트(142)를 회전시킴으로써 회전될 수 있다. 또한, 광학 지연 플레이트(142)는 비구면 광학 요소(120)의 상류 또는 하류에 위치될 수 있다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 광학 지연 플레이트(142)는 비구면 광학 요소(120)와 투명 워크피스(160) 사이에 위치하며, 다른 실시예에서, 광학 지연 플레이트(142)는 빔 소스(110)와 비구면 광학 요소(120) 사이에 위치한다.
- [0166] 펄스 레이저 빔(112)의 일부분(예를 들어, 1/2)을 광학적으로 지연시키는 것은 광학 지연 플레이트(142)를 가로지르는 빔의 부분 및 광학 지연 플레이트(142)를 가로지르지 않는 빔의 일부가 비간섭적으로(incoherently) 결합된 경우 단일 비-축대칭 빔 스폿(114)을 형성할 수 있다. 비간섭성을 달성하기 위해, 펄스 레이저 빔(112)의 간섭성 길이(coherence time)는 광학 지연 플레이트(142)의 광학 두께보다 짧을 수 있다. 이러한 경우, 2개 빔의 광학 지연은 어떤 정확한 양으로 설정되거나 또는 정확하게 제어될 필요가 없다; 광학 지연은 레이저 펄스의 간섭성 시간보다 클 수 있다. 이는 레이저 빔의 두 부분 사이의 광학적 위상 차를 랜덤화하는 것과 실질적으로 동일하다. 개별 레이저 펄스의 간섭성 시간(T_c)은 당업계에 공지된 방법을 이용하여 계산될 수 있으며,

$$T_c = \lambda^2 / c\Delta\lambda$$

로 수학적으로 설명되고, 여기서, λ 는 방사의 파장이고, c 는 빛의 속도이며, $\Delta\lambda$ 는 레이저 펄스의 스펙트럼 대역폭이다. 광학 지연 플레이트(142)에 의해 공급된 두께차는 레이저 펄스의 간섭성 시간보다 더 크거나, 또는 동등하게, 플레이트의 레이저 펄스의 간섭성 길이보다 더 두꺼울 수 있으며, 이는

$$L_c = \sqrt{2 \ln 2 / \pi n (\lambda^2 / \Delta\lambda)}$$

와 같이 수학적으로 설명되고, 여기서, n 은 광학 플레이트(142)의 재료의 굴절률이다. 예를 들어, 12.2 nm 스펙트럼 펄스 폭의 1030 nm 레이저에 대해, 간섭성 시간(T_c)은 약 290 psec이며, 빔을 걸어긋나게 하기 위한 $n=1.5$ 유리 플레이트의 필요한 두께는 38 마이크로미터보다 클 것이다. 다른 예시에서, 0.38 nm 스펙트럼 펄스 폭의 1064 nm 레이저에 대해, 간섭성 시간은 약 290 psec이며, 빔을 걸어긋나게 하기 위한 굴절률 $n=1.5$ 유리 플레이트의 필요한 두께는 1.3 mm보다 클 것이다.

[0167] 이론에 한정하려는 것은 아니지만, 정확한 간섭성 시간 및 간섭성 길이는 레이저 펄스의 정확한 시간 및 스펙트럼 형태의 함수이며, 상기 식은 근사치이다. 따라서, 상기 식에 의해 계산된 값보다 약간 작을 수 있는(예를 들어, 약 10 % 이하, 약 25 % 이하, 약 50 % 이하, 또는 약 10 % 이하, 등) 두께로 지연 플레이트의 충분한 걸어긋남 기능을 달성할 수 있다.

[0168] 또한, 일부 실시예에서, 빔의 두 부분을 걸어긋나게 하는 것 대신, 광학 지연 플레이트(142)는 특정 광학 지연을 유도하도록 구성될 수 있으며, 예를 들어, 광학 지연 플레이트(142)는 펄스 레이저 빔(112)의 절반 이상의 π 의 광학 리타데이션을 유도하고(여기서, 레이저 파장의 한 광학 주기는 광학 위상의 2π 라디안(radians)을 커버하도록 고려되므로, π 의 광학 리타데이션은 광학 주기의 1/2의 지연이다), 펄스 레이저 빔(112)의 절반 이상의 0.845π 의 광학 리타데이션, 및 일부 실시예에서, 레이저 빔의 절반 이상의 0.5π 의 광학 리타데이션을 유도할 수 있다. 빔의 강도 단면적의 정확한 프로파일은, 빔의 두 부분 사이의 정확한 광학 위상 지연을 간단히 조정함으로써, 빔의 중심 근처의 두 개의 동일한 고강도 스폿의 강도 프로파일에서 변경될 수 있으며, 더 큰 강도를 가진 하나의 스폿과 빔의 중심 근처의 더 작은 강도를 가진 다른 스폿을 가진 강도 프로파일에서 변경될 수 있다. 광학 지연 플레이트(142)에 의해 유도된 특정 광학 리타데이션은 광학 지연 플레이트(142)의 광학 두께와 상관관계가 있다. 그러나, 이러한 시스템이 비-축대칭 빔 스폿(114)을 생성하는 동안, 결과적인 빔 스폿은 두 빔 부분의 정확한 광학 경로 길이에 민감하며, 이는 온도 및 습도와 같은 환경적 변화에 의해 변경될 수 있다. 더욱이, 이러한 다중-스폿 패턴은 복잡한 다중-축 응력 집중을 가지며, 이는 타원형 코어를 갖는 빔처럼 균열 형성을 제어하기 위해 응력 집중이 유용하지 않을 수 있다.

[0169] 이제 도 7a 및 도 7b를 참조하면, 광학 조립체(100)의 실시예는 빔 소스(110)와 투명 워크피스(160) 사이에 위치된 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150)를 포함하는 것으로 도시된다. 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150)는 제1 고속축(156a, fast axis) 및 제1 저속축(158a, slow axis)을 가진 제1 플레이트 부분(152)을 포함한다. 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150)는 또한 제2 고속축(156b) 및 제2 저속축(158b)을 갖는 제2 플레이트 부분(154)을 포함한다. 또한, 제1 고속축(156a)은 제2 고속축(156b)에 직교하고, 제1 저속축(158a)은 제2 저속축(158b)에 직교한다. 펄스 레이저 빔(112)이 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150)를 가로지르는 때, 제1 고속축(156a) 및 제1 저속축(158a)을 갖는 제1 플레이트 부분(152)은 펄스 레이저 빔(112)의 제1 빔 부분을 제1 편광(예컨대, 특정 수평, 수직, 또는 원형 편광)으로 편광시키며, 제2 고속축(156b)을 갖는 제2 플레이트 부분(154)은 펄스 레이저 빔(112)의 제2 빔 부분을 제2 편광(예컨대, 또 다른 특정한 수평, 수직 또는 원형 편광)으로 편광시킨다. 제1 빔 부분을 제1 편광으로 편광시키고, 제2 빔 부분을 제2 빔 부분과 직교하는 제2 편광으로 편광시키는 것은 제2 빔 부분으로부터 제1 빔 부분을 걸어긋나게 한다.

[0170] 또한, 제1 편광은 제2 편광과 직교하므로 제1 빔 부분 및 제2 빔 부분은 도 2에 도시된 비-축대칭 빔 스폿(114)을 형성하도록 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150)로부터 비간섭적으로 하향으로 결합한다. 이론에 제한되는 것을 의도하지는 않지만, 직교하는 편광(예컨대, 수직 및 수평, 우원형(right-handed circular) 및 좌원형(left-handed circular))을 갖는 두 개의 펄스 레이저 빔 부분은 간섭하지 않으며, 각각이 투명한 워크피스(160) 상에 투영될 때, 각각의 빔 부분은 비간섭적으로 결합되어 집합적으로 비-축대칭 빔 스폿(114)(예컨대, 타원)을 형성한다. 예시적인 예시로서, 제1 편광 및 제2 편광은 각각 직각이 되도록 약 90° 만큼 떨어져 위치한 푸앵카레 구(Poincare sphere)의 위치를 포함한다. 제1 및 제2 빔 부분 사이의 비간섭성 결합은 임의의 2개의 직교하는 편광으로 발생할 수 있음을 이해해야 한다.

[0171] 도 7a에 도시된 바와 같이, 광학 조립체(100)는 편광자(144) 및 쿼터 파장 플레이트(146)를 더욱 포함할 수 있

다. 편광자(144) 및 쿼터 파장 플레이트(146)는 각각 빔 소스(110)와 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150) 사이의 빔 경로(111)에 위치되므로 펄스 레이저 빔(112)은 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150)를 지나가기 전에 편광자(144)와 쿼터 파장 플레이트(146)를 지나간다. 작동중, 편광자(144)는 편광자(144)를 지나가는 것으로부터 하나 이상의 특정 편광을 필터링할 수 있다. (예컨대, 막을 수 있다) 쿼터 파장 플레이트(146)는 단일 편광으로 펄스 레이저 빔(112)을 편광시키므로 펄스 레이저 빔(112)이 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150)에 도달할 때, 펄스 레이저 빔(112)은 예컨대, 우원형 편광, 또는 좌원형 편광 같은 단일 편광을 포함한다. 또한, 도 7a에 도시된 바와 같이, 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150)는 쿼터 파장 플레이트(146)와 투명 위크피스(160) 사이의 빔 경로(111)에 위치된다. 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150)는 비구면 광학 요소(120)의 상류 또는 하류에 위치될 수 있다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150)는 비구면 광학 요소(120)와 투명 위크피스(160) 사이에 위치하며, 다른 실시예에서, 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150)는 빔 소스(110)와 비구면 광학 요소(120) 사이에 위치한다.

[0172] 도 7a에 도시된 비 제한적인 예시에서, 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150)는, 펄스 레이저 빔(112)의 최소 전력량이 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150)의 제1 플레이트 부분(152)과 제2 플레이트 부분(154) 사이의 접촉 위치에서의 상호작용으로 인해 손실되도록, 예를 들어 공통 초점 평면(105)에 위치한 제1 렌즈(130)와 제2 렌즈(132) 사이의 시준 공간(134)에 위치될 수 있다.

[0173] 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150)는 2개의 플레이트 부분(예컨대, 제1 및 제2 플레이트 부분(152, 154))을 포함하는 것으로 도시되어 있지만, 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150)의 다른 실시예는 임의의 수의 플레이트 부분을 포함할 수 있다. 전술한 차단 요소와 같이, 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150)의 이들 부분은 단면 코드 부분의 형태, 또는 보다 바람직하게는 섹터의 형태로 만들어질 수 있다. 이들 실시예에서, 제1 복수의 플레이트 부분은 제1 고속축(156a) 및 제1 저속축(158a)을 포함하고 제2 복수의 플레이트 부분은 제2 고속축(156b) 및 제2 저속축(158b)을 포함한다. 또한, 제1 복수의 플레이트 부분은 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150)의 약 50 %를 집합적으로 포함할 수 있고, 제2 복수의 플레이트 부분은 스플릿 쿼터 파장 플레이트(150)의 또 다른 50 %를 집합적으로 포함할 수 있다.

[0174] 도 1a 및 도 7b를 다시 참조하면, 원하는 분리선(165)을 따라 결합(172)을 포함하는 윤곽선(170)을 형성하는 방법은 빔 경로(111)를 따라 배향되고 빔 소스(110)에 의해 출력된 펄스 레이저 빔(112)을 투명 위크피스(160)로 지향시키는(예컨대, 국소화시키는) 단계를 포함하여, 투명 위크피스로 지향된 펄스 레이저 빔(112)의 부분이 투명 위크피스(160) 내에서 유도 흡수를 생성하고 유도 흡수는 투명 위크피스(160) 내에 결합(172)을 생성한다. 예를 들어, 펄스 레이저 빔(112)은 투명 위크피스(160)의 손상 임계값을 초과하기 충분한 펄스 에너지와 펄스 지속시간을 포함할 수 있다. 일부 실시예에서, 펄스 레이저 빔(112)을 투명 위크피스(160)로 지향하게 하는 단계는 빔 소스(110)에 의한 출력으로부터의 펄스 레이저 빔(112)을 빔 전파 방향(예컨대, Z 축)을 따라 배향된 펄스 레이저 빔 초점선(113)으로 초점 맞추는 단계를 포함한다. 투명 위크피스(160)는 펄스 레이저 빔(112)의 펄스 레이저 빔 초점선(113)과 적어도 부분적으로 겹치도록 빔 경로(111)에 위치된다. 따라서, 펄스 레이저 빔 초점선(113)은 투명 위크피스(160)로 지향된다. 펄스 레이저 빔(112), 예컨대, 펄스 레이저 빔 초점선(113)은 투명 위크피스(160)에 결합(172)을 형성하기 위해 투명 위크피스(160) 내에 유도 흡수를 발생한다. 일부 실시예에서, 제1 렌즈(130) 및/또는 제2 렌즈(132)는 펄스 레이저 빔(112)에 초점을 맞출 수 있다. 다른 실시예에서, 예를 들어, 제1 렌즈(130) 및 제2 렌즈(132)를 포함하지 않는 실시예에서, 비구면 광학 요소(120)(예컨대, 액시콘 렌즈)는 펄스 레이저 빔(112)에 초점을 맞출 수 있다. 일부 실시예에서, 개별 결합(172)은 수백 킬로헤르츠의 속도로 생성될 수 있다(즉, 초당 수십만 개의 결합).

[0175] 작동중, 펄스 레이저 빔 초점선(113)의 위치는 광학 조립체(100)의 파라미터를 적절하게 선택하는 것뿐만 아니라 투명 위크피스(160)에 대해 펄스 레이저 빔(112)을 적절히 위치시키거나 및/또는 정렬함으로써 제어될 수 있다. 또한, 펄스 레이저 빔 초점선(113)은 약 0.1mm 내지 약 100mm의 범위 또는 약 0.1mm 내지 약 10mm의 범위의 길이를 가질 수 있다. 다양한 실시예는 약 0.1mm, 약 0.2mm, 약 0.3mm, 약 0.4mm, 약 0.5mm, 약 0.7mm, 약 1mm, 약 2mm, 약 3mm, 약 4mm 또는 약 5mm, 예를 들어, 약 0.5mm 내지 약 5mm의 길이(1)를 갖는 펄스 레이저 빔 초점선(113)을 갖도록 구성될 수 있다.

[0176] 또한 도 1a-7a를 참고하면, 원하는 분리선(165)을 따라 결합(172)을 포함하는 윤곽선(170)을 형성하는 방법은 펄스 레이저 빔(112)에 대해 투명 위크피스(160)를 병진시키는 단계를 포함하여(또는, 펄스 레이저 빔(112)은 예를 들어, 도 1a 및 2에 도시된 병진 방향(101)으로 투명 위크피스(160)에 대해 병진될 수 있다) 원하는 결합(172)을 가진 부분의 형태를 추적하는 윤곽선(170)을 형성할 수 있다. 결합(172)은 유리의 전체 깊이를 관통할 수 있다. 가끔 "구멍" 또는 "구멍 같은"으로 설명되지만, 본원에 개시된 결합(172)은 일반적인 빈공간이

아니라, 본원에 개시된 레이저 가공에 의해 수정된 워크피스의 일부라는 점을 알아야 한다. 일부 실시예에서, 결합(172)은 일반적으로 약 5 미크론 내지 약 20 미크론의 거리만큼 서로 이격될 수 있다. 예를 들어, 결합(172) 사이의 적절한 간격은, TFT/디스플레이 유리 조성물의 경우, 약 0.1 미크론 내지 약 30 미크론, 예컨대 약 5 미크론 내지 약 15 미크론, 약 5 미크론 내지 약 12 미크론, 약 7 미크론 내지 약 15 미크론, 또는 약 7 미크론 내지 약 12 미크론일 수 있다. 또한, 펄스 레이저 빔(112)에 대한 투명 워크피스(160)의 병진은 하나 이상의 병진 스테이지(190)를 사용하여 투명 워크피스(160) 및/또는 빔 소스(110)를 이동시킴으로써 수행될 수 있다.

[0177] 단일 투명 워크피스(160)의 천공 이후, 공정은 유리 시트의 적층(stack)과 같은 투명 워크피스(160)의 적층을 천공하는데 사용될 수 있으며, 단일 레이저 패스(pass)로 수 mm의 전체 높이까지의 유리 적층을 완전히 천공할 수 있다. 단일 유리 적층은 적층 내에 다양한 유리 유형, 예를 들어 코닝 코드 2318 유리의 하나 이상의 층으로 층을 이루는 소다-석회 유리의 하나 이상의 층을 포함할 수 있다. 유리 적층은 부가적으로 다양한 위치에서 공기 갭(gap)을 가질 수 있다. 또 다른 실시예에 따르면, 접착제와 같은 연성 층이 유리 적층 사이에 배치될 수 있다. 그러나, 본원에 기술된 펄스 레이저 공정은 이러한 적층의 상부 및 하부 유리 층을 모두, 단일 통과로, 완전히 관통할 것이다.

[0178] 또한, 투명 워크피스(160)에 윤곽선(170)을 형성한 후에, 기계적 또는 열적 소스와 같은 응력 유도 소스는 윤곽선(170)을 따라 투명 워크피스(160)를 분리하는데 활용될 수 있다. 실시예에 따라서, 적외선 레이저와 같은 열 소스는 열 응력을 생성하여 윤곽선(170)에서 투명 워크피스(160)를 분리하는데 사용될 수 있다. 실시예에서, 적외선 레이저는 자발적인 분리를 개시하기 위해 사용될 수 있고, 그 다음에 분리는 기계적으로 마무리될 수 있다. 유리에 열 응력을 생성시키는 데 적합한 적외선 레이저는 전형적으로, 1.2 미크론 내지 13 미크론 범위의 파장, 예를 들어 4 미크론 내지 12 미크론의 범위를 갖는 유리에 의해 쉽게 흡수되는 파장을 가질 것이다. 이산화탄소 레이저("CO₂ 레이저"), 일산화탄소 레이저("CO 레이저"), 고체 상태 레이저, 레이저 다이오드, 또는 이들의 조합에 의해 생성된 레이저 빔과 같은 적외선 레이저 빔은 윤곽선(170)에서 또는 그 근처에서 투명 워크피스(160)의 온도를 빠르게 증가시키는 제어된 열원이다. 이러한 급속 가열은 윤곽선(170) 상에 또는 그에 인접한 투명 워크피스(160)에 압축 응력을 형성할 수 있다. 가열된 유리 표면의 구역이 투명 워크피스(160)의 전체 표면 구역에 비해 상대적으로 작기 때문에, 가열된 구역은 상대적으로 빠르게 냉각된다. 결과적인 온도 구배는 윤곽선(170)을 따라 그리고 투명 워크피스(160)의 두께를 통해 균열을 전파시키기에 충분한 인장 응력을 투명 워크피스(160)에 유도하여, 윤곽선(170)을 따라 투명 워크피스(160)를 완전히 분리시킨다. 이론에 구애되지 않고, 인장 응력은 높은 국부 온도를 갖는 워크피스의 부분에서 유리의 팽창(즉, 변화된 밀도)에 의해 야기될 수 있다고 여겨진다.

[0179] 전술한 설명의 관점에서, 원하는 분리선을 따른 결합을 포함하는 윤곽선의 형성은 광학 조립체에 의해 형성되는 펄스 레이저 빔을 이용함으로써 향상될 수 있으므로, 펄스 레이저 빔은 원하는 분리선을 따라 워크피스에 비-축대칭 빔 스폿을 투영한다.

[0180] 예시

[0181] 예시 1

[0182] 예시 1은 빔 경로와 정렬된(예컨대, 오프셋되지 않은) 비구면 광학 요소를 가진 예시의 광학 조립체로 출력된 532 nm 파장을 가진 펄스 레이저 빔의 모델링된 결과이다. 펄스 레이저 빔은 대칭 가우스 빔으로 출력되고 비구면 광학 요소에 의해 준 비-회절 빔으로 형성된다. 도 8a는 펄스 레이저 빔 초점선(예컨대, 주 비-회절 펄스 레이저 빔 초점선)의 예시의 단면 강도 플롯을 도시한다. 도 8a에 도시된 바와 같이, 오프셋 없이, 빔 스폿은 방사상으로 대칭이다. 도 8a의 단면 강도 플롯의 전체 폭의 절반 최대(FWHM)는 3.8 미크론이다. 도 8b는 오프셋 없이 형성된 준-비-회절 펄스 레이저 빔 초점선의 푸리에 변형 평면의 대수 강도를 도시한다. 또한, 도 8c는 피크 선-초점 위치에서 오프셋 없이 형성된 준 비-회절 펄스 레이저 빔 초점선의 실험용 근거리 현미경 사진을 도시한다.

[0183] 예시 2

[0184] 예시 2는 X 방향으로 20 미크론의 오프셋 거리만큼 빔 경로에 대해 오프셋된 비구면 광학 요소를 갖는 예시적인 광학 조립체로 출력된 1064 nm 파장을 가진 펄스 레이저 빔의 모델링된 결과이다. 펄스 레이저 빔은 축대칭 가우스 빔으로서 출력되고 비구면 광학 요소에 의해 준 비-회절 빔으로 형성된다. 도 9는 비구면 광학 요소와 빔 경로 사이의 오프셋에 의해 형성된 결과적인 비-축대칭 펄스 레이저 빔 초점선의 예시적인 단면 강도 플롯을 나

타낸다.

[0185] 예시 3

[0186] 예시 3은 X 방향으로 50 마이크론의 오프셋 거리만큼 빔 경로에 대해 오프셋된 비구면 광학 요소를 갖는 예시적인 광학 조립체로 출력된 1064 nm 파장을 갖는 펄스 레이저 빔의 모델링된 결과이다. 펄스 레이저 빔은 축대칭 가우스 빔으로서 출력되고 비구면 광학 요소에 의해 준 비-회절 빔으로 형성된다. 도 10은 비구면 광학 요소와 빔 경로 사이의 오프셋에 의해 형성된 결과적인 비-축대칭 펄스 레이저 빔 초점선의 예시적인 단면 강도 플롯을 나타낸다.

[0187] 예시 4

[0188] 예시 4는 빔 경로에 대해 X 방향으로 100 μm의 오프셋 거리만큼 오프셋된 비구면 광학 요소를 갖는 예시적인 광학 조립체로 출력되는 1064 nm 파장을 갖는 펄스 레이저 빔의 모델링되고 실험된 결과를 포함한다. 펄스 레이저 빔은 축대칭 가우스 빔으로서 출력되고 비구면 광학 요소에 의해 준 비-회절 빔으로 형성된다. 도 11a는 비구면 광학 요소와 빔 경로 사이의 오프셋에 의해 형성된 모델링된 결과적인 비-축대칭 펄스 레이저 빔 초점선의 예시적인 단면 강도 플롯을 나타낸다. 도 11b는 펄스 레이저 빔 초점선의 길이를 따라 대략 중간 위치의 최적 초점 축 위치에서 도 11a의 모델링된 결과의 단면 강도 플롯의 X 및 Y 단면을 도시한다. 도 11c는 도 11b의 최적 초점 축 위치로부터 약 200 마이크론까지 쉬프트된 축 위치에서 도 11a의 모델링된 결과의 단면 강도 플롯의 단면을 도시한다. 또한, 도 11d는 100 마이크론 오프셋되어 형성된 펄스 레이저 빔의 푸리에 변환 평면(예컨대, 준 비-회절 펄스 레이저 빔)의 모델링된 대수 강도 플롯을 도시한다. 도 11d에 도시된 바와 같이, 대수 강도 플롯은 균일하지 않다. 또한, 도 11e는 피크 선-초점 위치에서 예시 4의 펄스 레이저 빔 초점선의 실험용 근거리 현미경 사진을 도시한다.

[0189] 예시 5

[0190] 예시 5는 예시적인 광학 조립체의 모델링된 결과로서, 비구면 광학 요소로서의 액시콘 및 광학 차단 요소가 펄스 가우스-베셀 빔의 강도의 50%를 차단하도록 제1 및 제2 렌즈 사이에 위치된 광학 차단 요소를 포함한다. 펄스 가우스-베셀 빔의 강도의 50%를 차단하는 것은 1차원 헤비사이드(Heaviside) 계단 함수에 의해 펄스 가우스-베셀 빔의 푸리에 변환과 곱하는 것과 같이 동일한 수학적 결과를 얻을 수 있다. 2D 이미지 공간에서 이는 1D 헤비사이드 계단 함수 H(x)의 푸리에 변환으로 컨벌루션된(convolved) 2D 가우스-베셀 빔을 발생한다. 헤비사이드 계단 함수는 $H(x) = 1/2(\text{Sgn}(x) + 1)$ 에 의해 Sgn 계단 함수와 관련된다. 푸리에 변환의 표는 2차원으로 다음과 같이 나타낸다:

[0191]
$$\mathfrak{F}_{xy}(\text{Sgn}(k_x)) = \frac{-i}{\pi x} \delta(k_y) \quad (32)$$

[0192]
$$\mathfrak{F}_{xy}(H(k_x)) = \frac{1}{2}(\delta(x) + \mathfrak{F}_{xy}(\text{Sgn}(k_x)))\delta(y) \quad (33)$$

[0193] 델타 함수와 컨벌루션된 가우스-베셀 빔은 원점에서 가우스-베셀을 수학적으로 설명한다. 예시를 위해, 도 12a는 델타 함수와 컨벌루션된 베셀 - 가우스 빔의 단면 강도 플롯(X-Y 평면을 따라)을 도시한다. 또한, 도 12b는 $i/2\pi x$ 로 컨벌루션된 가우스-베셀 빔의 단면 강도 플롯(X-Y 평면을 따라)을 도시한다. 또한, 수식(33)은 가우스-베셀 빔의 강도의 50%를 차단하는 것과 수학적으로 동일한 Sgn 함수의 푸리에 변환과 함께 가우스-베셀 빔의 컨벌루션(convolution)을 수학적으로 설명한다. 도 12c는 수식(33)에서 수학적으로 설명된 바와 같이 헤비사이드 계단 함수의 푸리에 변환과 컨벌루션된 가우스-베셀 빔의 단면 강도 플롯(X-Y 평면을 따라)을 도시한다. 도 12c의 단면 강도 플롯(X-Y 평면을 따라)은 또한 빔 경로의 50%를 차단함으로써 형성된 펄스 레이저 빔 초점선의 결과적인 단면 강도이다. 따라서, 결과적인 비-축대칭 펄스 레이저 빔 초점선에서의 스폿 또는 피크의 간격은 액시콘 각도 및 망원경 배율(예컨대, 렌즈(130)의 초점 길이에 대한 렌즈(132)의 초점 길이의 비율에 의해 발생된 배율)에 의해 통제되지만 광학기의 틸트, 오프셋, 또는 수차에 의해서는 통제되지 않는다. 또한, 도 12d는 도 12a-12c의 강도 플롯의 X축 단면을 그래프로 도시한다. 도 12e는 예시의 Sgn 계단 함수의 푸리에 변환을 그래프로 도시한다.

[0194] 도 12f는 펄스 레이저 빔이 액시콘을 가로지르고 펄스 레이저 빔의 빔 세기의 50%가 제1 렌즈 및 제2 렌즈 사이에 빔 경로의 중간을 따라 위치된 광학 차단 요소에 의해 차단될 때 형성된 결과적인 비-축대칭 펄스 레이저 빔 초점선의 단면 강도 플롯을 도시한다. 도 12g는 도 12f의 강도 플롯의 X 및 Y 단면을 그래프로 설명한다. 도

12h는 빔 강도의 50 %가 빔 소스에 위치된(예컨대, $Z = 0$ 에 위치된) 광학 차단 요소에 의해 차단되는 경우 결과적인 비-축대칭 펄스 레이저 빔 초점선의 단면 강도를 도시한다. 도 12i는 도 12h의 강도 플롯의 X 및 Y 단면을 그래프로 설명한다. 도 12f-12i에 도시된 바와 같이, 빔 경로를 따른 광학 차단 요소의 Z-축 위치는 결과적인 펄스 레이저 빔 초점선에 최소한의 영향을 미친다. 이것은 광학 차단 요소가 액시콘 전의 공간, 또는 두 렌즈(130 및 132) 사이의 시준 공간(134)과 같은 액시콘 후의 공간에 배치되는지 여부에 상관없이 효과적일 수 있음을 나타낸다. 따라서, 광학 차단 요소를 사용하여 비-축대칭 펄스 레이저 빔 초점선을 생성하는 것이 바람직할 수 있다.

[0195] **예시 6**

[0196] 예시 6은 600미크론 $1/e^2$ 직경을 갖는 펄스 레이저 빔의 단면 세그먼트를 점증적으로 차단하는 모델링된 결과이다. 특히, 예시 6은 증가된 최대 차단 폭을 각각 갖는 펄스 레이저 빔의 상이한 단면 세그먼트를 차단하는 것을 포함하며, 여기서, "최대 차단 폭"은 차단된 단면 세그먼트의 단면 코드 부분의 중심점으로부터 수직으로 측정된 펄스 레이저 빔(예컨대, 빔 경로의 차단된 부분)의 차단된 부분의 폭으로 정의된다. 도 13a는 펄스 레이저 빔을 차단하지 않고, 결과적인 펄스 레이저 빔의 초점선의 X-Y 평면에서의 예시적인 강도 플롯을 도시한다. 도 13a에 도시된 바와 같이, 차단이 없으면, 단면 펄스 레이저 빔 초점선은 축 대칭이다. 도 13b-13k는 증가된 최대 차단 폭을 갖는 차단된 단면 세그먼트를 갖는 X-Y 평면에서의 예시적인 강도 플롯을 설명한다. 예를 들어, 도 13b의 최대 차단 폭은 50 미크론이고, 도 13c의 최대 차단 폭은 100 미크론이고, 도 13d에서의 최대 차단 폭은 150 미크론이고, 도 13e에서의 최대 차단 폭은 200 μm 이고, 도 13f의 최대 차단 폭은 250 미크론이며, 도 13g의 최대 차단 폭은 300 미크론(예컨대, 펄스 레이저 빔의 절반을 차단)이고, 도 13h에서의 최대 차단 폭은 350 미크론이고, 도 13i에서의 최대 차단 폭은 400 미크론이며, 도 13j에서의 최대 차단 폭은 450 미크론이며, 도 13k의 최대 차단 폭은 500 미크론이다.

[0197] **예시 7**

[0198] 예시 7에서, 532nm의 파장을 가진 준-비-회절 펄스 레이저 빔은 광학 차단 요소가 펄스 레이저 빔의 50 %를 차단하도록 배치된 광학 차단 요소를 갖는 예시적인 광학 조립체로 출력된다. 도 14는 예시 7에서 펄스 레이저 빔의 50 %를 차단함으로써 형성된 비-축대칭 펄스 레이저 빔 초점선의 단면의 근거리 현미경 사진을 도시한다.

[0199] **예시 8**

[0200] 예시 8에서, 532nm의 파장을 가진 준-비-회절 펄스 레이저 빔은 광학 차단 요소가 펄스 레이저 빔의 75 %를 차단하도록 배치된 광학 차단 요소를 갖는 예시적인 광학 조립체로 출력된다. 도 15는 예시 8에서 펄스 레이저 빔의 75 %를 차단함으로써 형성된 비-축대칭 펄스 레이저 빔 초점선의 단면의 근거리 현미경 사진을 도시한다. 예시 8의 비-축대칭 펄스 레이저 빔 초점선은 예시 7의 비-축대칭 펄스 레이저 빔 초점선보다 더 큰 중횡비를 포함한다.

[0201] **예시 9**

[0202] 예시 9에서, 광학 차단 요소는 광학 차단 요소가 단면 펄스 레이저 빔의 쿼터 섹터를 차단하도록(따라서 펄스 레이저 빔의 강도의 25 %를 차단하도록) 예시적인 광학 조립체에 위치된다. 도 16은 광학 축을 중심으로(예를 들어, 펄스 레이저 빔의 전파 방향에 대해) 광학 차단 요소의 증가하는 45° 회전에서 광학 차단 요소에 의해 형성된 비-축대칭 펄스 레이저 빔 초점선의 예시의 결과적인 단면을 도시한다.

[0203] **예시 10**

[0204] 예시 10은(예시 6과 관련하여 상기 정의된 바와 같이) 평행한 코드에서 각각 끝나고 동일한 최대 차단된 폭을 각각 가진 펄스 레이저 빔의 단면 코드를 차단하도록 배향된 2개의 광학 차단 요소를 사용하여 제1 렌즈와 제2 렌즈 사이의 공통 초점 평면에서 600 미크론 $1/e^2$ 직경을 갖는 펄스 레이저 빔의 2개의 단면 세그먼트를 차단하는 모델을 모델링한다. 도 17a는 펄스 레이저 빔을 차단하지 않고, 결과적인 펄스 레이저 빔의 초점선의 X-Y 평면에서의 예시적인 강도 플롯을 나타낸다. 도 17a에 도시된 바와 같이, 차단이 없으면, 펄스 레이저 빔 초점선의 단면은 축대칭이다. 또한, 도 17b-17f는 증가하며 동일한 최대 블로킹 폭을 갖는 2개의 평행한 차단 단면 세그먼트를 갖는 X-Y 평면에서의 예시적인 강도 플롯을 나타낸다. 예를 들어, 도 17b에서의 각 최대 차단 폭은 50 미크론이고, 도 17c의 각 최대 차단 폭은 100 미크론이며, 도 17d의 각 최대 차단 폭은 150 미크론이고, 도 17e에서의 각 최대 차단 폭은 200 미크론이며, 17f에서의 각 최대 차단 폭은 250 미크론이다. 도 17a-17f의 펄스 레이저 빔 초점선 단면은 다수의 주변부(fringe)를 보여주고, 레이저 에너지의 대부분은 도 17b에 대해서도, 펄스

레이저 빔 초점선의 중심 코어 스폿의 외부로 분출된다. 이는 중심 스폿이 더 낮은 강도를 가지며 더 많은 레이저 출력이 투명 워크피스를 쉽게 절단하기 위해 광학 시스템의 입력에 필요할 수 있음을 의미한다. 도 17b-17f의 중심 주변부에 존재하는 많은 양의 에너지는 광학 에너지가 대부분 중앙 타원에 포함될 때뿐만 아니라 응력을 집중시키지 않는 투명 워크피스에서 다른 응력 프로파일을 생성할 것이다.

[0205] **예시 11**

[0206] 예시 11은 예시 10의 모델링된 결과의 실험적 확인이며, 632 nm HeNe 레이저를 포함하는 예시적인 광학 조립체로 수행된다. 예시 11에서, 2개의 광학 차단 요소가 예시적인 광학 조립체 내에 위치되어 각각의 광학 차단 요소가 2개의 렌즈(130 및 132) 사이의 시준 공간(134) 내에서 펄스 레이저 빔의 단면을 차단하도록 예시의 광학 조립체에 위치되고, 여기서, 시준된 빔 링의 지름은 약 22mm이고 각각의 광학 차단 요소에 의해 형성된 단면 코드 부분은 각각의 광학적 차단 요소에 의해 형성된 단면 코드 부분은 평행하게 위치되고 약 9mm만큼 이격된 코드에서 끝난다. 도 18은 광학축을 중심으로(예컨대, 펄스 레이저 빔의 전파 방향에 대해) 하는 예시의 광학 차단 요소의 증가하는 45° 회전에서 DP시의 광학 차단 요소 각각에 의해 형성된 비-축대칭 펄스 레이저 빔 초점선(각각 다중 빔 스폿을 포함)의 예시의 결과적인 단면을 도시한다.

[0207] **예시 12**

[0208] 예시 12에서, 광학 차단 요소는 펄스 레이저 빔의 광학 경로에 대해 오프셋된 비구면 광학 요소를 또한 포함하는 예시적인 광학 조립체에 위치된다. 예를 들어, 도 19a는 펄스 레이저 빔이 50 마이크로미터 빔 경로로부터 오프셋된 액시콘 및 비-오프셋 시스템에서 펄스 레이저 빔의 50%를 차단하도록 위치한 절반 에퍼처 광학 차단 요소를 가로지른 후 펄스 레이저 빔의 단면 이미지를 도시한다. 도 19b는 도 19a에 도시된 블록 및 시프트 배치에 의해 형성된 결과적인 비-축대칭 펄스 레이저 빔 초점선의 예시적인 단면 강도 플롯을 도시한다.

[0209] **예시 13**

[0210] 예시 13에서, 광학 지연을 유도하는 광학 지연 플레이트는 빔 경로 내에 배치되어, 펄스 레이저 빔의 50%가 광학 지연 플레이트를 가로지르고 π 의 광학 지연을 겪는다. 도 20a는 펄스 레이저 빔의 50%의 π 의 광학 지연에 의해 형성된 결과적인 비-축대칭 펄스 레이저 빔 초점선의 단면 강도 플롯을 도시한다. 도 20b는 도 20a의 단면 강도 플롯의 단면을 도시한다.

[0211] **예시 14**

[0212] 예시 14에서, 0.875π 의 광학 지연을 유도하는 광학 지연 플레이트는 펄스 레이저 빔의 50%가 광학 지연 플레이트를 가로지르고 π 의 광학 지연을 겪도록 빔 경로 내에 위치된다. 도 21a는 펄스 레이저 빔의 50%의 광학 지연에 의해 형성된 결과적인 비-축대칭 펄스 레이저 빔 초점선의 단면 강도 플롯을 도시한다. 도 21b는 도 21a의 단면 강도 플롯의 단면을 도시한다.

[0213] **예시 15**

[0214] 예시 15에서, 0.5π 의 광학 지연을 유도하는 광학 지연 플레이트는, 펄스 레이저 빔의 50%가 광학 지연 플레이트를 가로지르고 π 의 광학 지연을 겪도록 빔 경로 내에 위치된다. 도 22a는 펄스 레이저 빔의 50%의 광학 지연에 의해 형성된 결과적인 비-축대칭 펄스 레이저 빔 초점선의 횡단면 강도 플롯을 도시한다. 도 22b는 도 22a의 단면 강도 플롯의 단면을 도시한다.

[0215] **예시 16**

[0216] 예시 16에서, 전술한 바와 같은 스플릿 쿼터 파장 플레이트는 HeNe 레이저 빔의 제1 빔 부분이 제1 편광으로 편광되고 HeNe 레이저 빔의 제2 빔 부분이 제1 편광에 직교하는 제2 편광으로 편광되도록 HeNe 레이저에 의해 출력된 레이저 빔의 빔 경로에 위치될 수 있다. 도 23은 광학축에 대해(예컨대, 펄스 레이저 빔의 전파 방향에 대해) 예시적인 스플릿 쿼터 파장 플레이트의 증가하는 45° 회전에서 스플릿 쿼터 파장 플레이트에 의해 형성된 결과적인 비-축대칭 펄스 레이저 빔 초점선을 도시한다.

[0217] **예시 17**

[0218] 이 예시는 편광 방법을 이용하는 비대칭 준 비-회절 빔을 생성하는 광학 시스템을 설명한다. 이 예시의 개요는 다음과 같다:

[0219] **개요:**

- [0220] A. 사용된 시스템
- [0221] - 광학기 및 거리
- [0222] - 레이저 빔
- [0223] - 스플릿 쿼터 파장 플레이트(SQWP)
- [0224] B. 나노-천공 및 균열 방향 제어의 예시 결과
- [0225] C. 빔이 비대칭 QNDB인 경우를 설정하기 위한 빔 측정 방법
- [0226] - 스캔된 LFC 설명
- [0227] - 빔 프로파일의 실험적 측정
- [0228] D. 결과
- [0229] - 실험적 측정
- [0230] o $W_{o,eff}$
- [0231] o 강도 방법을 이용하는 레일리 범위
- [0232] o 적용에서 수식(31)을 만족하는 F_D
- [0233] - 모델링된 결과
- [0234] o 빔 분산 방법을 이용한 레일리 범위
- [0235] **사용된 시스템.** 도 25에 도시된 광학 시스템은 일반적으로 빔 비대칭을 파괴하기 위해 편광 방법을 사용하여 비대칭 준 비-회절 빔을 생성하는데 사용될 수 있는 시스템을 개략적으로 설명한다. 이 광학 시스템은 유리와 같은 기관 절단에 적합하다.
- [0236] *광학기/레이저 빔.* 대표적인 레이저는 선형 편광(예컨대, Coherent Hyper-Rapid 50)을 가진 가우스-형태의 출력 빔을 제공하는 9psec 펄스 폭을 갖는 1064nm 펄스 레이저이다. 망원경을 사용하여 빔을 액시콘에 들어가기 전에 5.5mm $1/e^2$ 직경으로 시준한다. 빔은 액시콘에 입사하기 전에 원형으로 편광되도록 쿼터 파장 플레이트를 통과한다. 쿼터 파장 플레이트(QWP)에서 액시콘, 스플릿 쿼터 파장 플레이트(SQWP) 및 렌즈를 통과하여 연장되는 전체 광학 시스템은 입력 가우스 빔을 비대칭 준 비-회절 빔(QNDB)으로 변환하도록 설계된다. 그 자체로, 액시콘과 렌즈는 가우스-베셀 빔으로 알려진 빔을 형성하며, 이는 축대칭 강도 분포를 갖는 QNDB이다. 쿼터 파장 플레이트는 SQWP와 함께 시스템의 회전 대칭성을 파괴하는 역할을 하며, 비대칭 QNDB를 생성할 수 있는 요소이다.
- [0237] 도 25에 도시된 보다 일반적인 시스템과 대조적으로, 본 명세서의 후반부에 사용되는 특정 시스템에서, 2개의 $f = 150\text{mm}$ 렌즈가 액시콘 이후에 광을 시준하는데 사용된다. 이 시스템은 도 26에 도시된다. 2개의 $f = 150\text{mm}$ 렌즈는 한 쌍으로 작용하며, 첫 번째 렌즈는 주로 필드 렌즈(액시콘 초점에 가까운 위치에 있기 때문에 광 파워가 거의 없는)로 작용하며, 그 사이의 거리가 주어지면 액시콘에서 약 1 초점 길이 떨어진 단일 140mm 초점 길이 렌즈의 그물 효과를 생성한다. 이 정확한 렌즈 선택은 중요하지 않다. 렌즈의 다양한 많은 초점 길이와 스타일이 가능하다. 시준 렌즈의 포인트는 최종 초점 렌즈 이후에 초점선의 확대된(또는 축소된) 이미지를 생성하기 위해 액시콘 바로 뒤에 형성된 초점선을 광학적으로 전달하는(지름, 길이)망원경으로 작용하기 위해 대물 렌즈와 결합하는 것이다. 이것은 액시콘을 변경할 필요없이 초점선의 크기를 보다 유연하게 조정할 수 있으며, 또한 액시콘과 바로 인접한 초점선보다 생산 환경에서 훨씬 편리한, 최종 광학기로부터 상대적으로 큰 물리적 분리 또는 작동 거리를 갖는 위치로 초점선을 투영한다.
- [0238] 이 예시에서 보여지는 설정은 전체 패키지 크기를 상대적으로 짧게 유지하면서, 시준 렌즈의 긴 효과적인 초점 길이를 허용하도록 선택된다. 이것이 2개의 시준 렌즈가 접근하는 이유이며, 제1 렌즈는 "필드 렌즈"로서 작용하는 경우, 구성이 사용되었다. 이 특정 시준 렌즈 선택은 QNDB 또는 비대칭 QNDB를 만들기 위해 필요하지 않다. 단일 시준 렌즈가 또한 사용될 수 있으며, 또는 다른 초점 길이의 렌즈가 사용될 수 있다.
- [0239] 빔은 본원에 설명된 바와 같이 편광 변경을 통해 빔의 대칭성을 파괴하는 역할을 하는, SQWP에 들어가는 것에 따라 원형으로 대략 시준된다. SQWP는 비대칭 초점 스폿의 바람직한 방위각 방향을 변경하기 위해 시스템의 광

학축을 중심으로 회전할 수 있다. 함께 부착된 원형 파장 플레이트의 두 개의 절반으로 구성된 SQWP의 경우, 형성된 비대칭 스폿의 장축은 SQWP의 분할선에 수직이 된다. SQWP의 회전은 동력화될 수 있으며 방향 각도는 기관에서 원하는 절단 경로 방향을 따르도록 동기화될 수 있다.

[0240] 베셀과 같은 빔으로 환형을 초점 맞추기 위해 도 26에 도시된 시스템에서 f=30mm 더블릿(doublet) 렌즈가 사용되며, 이는 SQWP(2개의 별개의 조각으로 분리된 쿼터 파장 플레이트, 그 중 하나는 반전됨)의 효과로 인해 타원 단면을 가진 것으로 만들어진다.

[0241] 이 실시예에서 사용된 SQWP는 비대칭 QNDB를 생성하는데 중요하다. SQWP는 레이저 빔의 두 섹션의 겹어긋남에 기초한 편광을 생성한다. SQWP는 그림 7b에서 더 자세히 설명되어 있지만, 그림 23에서보다 명확하게 도시되어 있다. SQWP는 쿼터 파장 플레이트의 두 섹션으로 구성되어 있으며, 각 섹션의 광학 축이 SQWP의 다른 섹션의 광학 축에 직교하도록 조립된다. 원형 편광된 광이 SQWP에 입사할 때, SQWP의 각 부분은 각 부분을 통과하는 광을 다른 부분으로부터의 편광과 항상 직교하는 편광으로 변환시킨다. 예를 들어, 제1 부분에 의해 방출된 광은 선형 수직일 수 있고, 제2 부분에 의해 방출된 광은 선형 수평일 수 있다. 또는 제1 부분에 의해 방출된 광은 우원형일 수 있으며, 제2 부분에 의해 방출된 광이 좌원형이다. 두 개의 직교하게 편광된 빔 부분이 결합될 때, 이들은 간섭할 수 없다. 이러한 겹어긋남은 빔의 두 부분이 독립적으로 거동하여 QNDB의 대칭성을 파괴하게 만드는 것이다. 빔 부분이 간섭성으로 결합되면, 강한 간섭 효과가 발생하고, 이러한 간섭 효과가 비대칭 QNDB의 확장된 레일리 범위를 망칠 것이다 - 간섭으로 인해 피크가 있으며 밸리(valley)가 발생된다. SQWP 방법의 핵심 특징은, SQWP의 가능한 모든 회전 방향에서, 원형 편광된 광이 SQWP에 입사된 것이 제공되어, 두 부분에서 나오는 광의 직교성이 보장된다는 것이다.

[0242] 도 27은 SQWP 및 SQWP를 구성하는 방법을 도시한다. 두 부분은 좌측(해시된(hashed)) 절반이 우측 절반(이 이미지의 명확한 부분)의 고속 광학 축에 수직인 고속 광학 축을 갖도록 조립된다. SQWP는 두 개의 동일한 반쪽일 필요는 없다. 그러나 두 섹션의 광학 축의 직교성이 중요하다.

[0243] 도 28은 빔을 겹어긋나게 하기 위해 편광 방법을 사용하는 비대칭 QNDB의 개략적인 제조를 도시한다. 기본 메커니즘은 다음과 같다:

[0244] * 선형 편광된 광은 쿼터 파장 플레이트에 입사된다.

[0245] * 액시쿤은 초점선을 형성한다.

[0246] * 시준 렌즈(또는 렌즈)가 링 또는 환형의 광을 생성한다.

[0247] * 환형은 SQWP를 통과한다.

[0248] * 초점 렌즈는 초점선 또는 QNDB를 형성하기 위해 광을 재초점 맞춘다. QNDB는 SQWP가 더 이상 간섭성으로 결합할 수 없는 빔의 두 개의 직교 편광 부분을 생성하기 때문에 비대칭(또는 타원형)일 것이다.

[0249] 도 26에 도시된 시스템의 빔의 개구수(NA)는 30mm 더블릿 이후 대략 0.37이다. 이는 빔의 짧은 축(또는 최소 단면)을 가로지르는 예상된 스폿 크기가 약 2 마이크로미터라는 것을 의미한다. 초점된 빔에 대한 예상된 스폿 크기는 빔의 NA의 함수이며, 다음 수식으로 주어진다:

$$d = \frac{2.405\lambda_0}{2\pi N A n_0}$$

[0250] 여기서, d는 스폿 지름이고, λ_0 은 파장이며, n_0 은 매체의 굴절률이다. 즉, 스폿 크기는 파장, NA, 및 빔 형상과 관련된 정수의 함수이다.

[0252] **나노-천공 및 균열 방향 제어의 예시 결과.** 도 29는 도 26의 광학 시스템을 통해 만들어진 나노-천공 및 균열 제어의 예시 이미지를 나타낸다. SQWP 광학 시스템을 사용하여 만들어진 비-이온 교환된 코닝 코드 2318 유리의 나노 천공된 구멍이 도시된다. 구멍의 "십자가" 표시는 각 이미지에서 만들어지며, 수직(y) 방향과 수평(x) 방향을 가로지르는 스테이지/레이저 빔을 보여준다. 각 이미지에서 편향된 균열 방향은 스테이지의 움직임의 x 또는 y 방향과 독립적인 것을 보여줄 수 있으며 - 이 균열 방향은 빨간색 화살표로 강조된다. 각 이미지 사이에서 진행하면서, SQWP의 분할은 왼쪽 위 이미지에 표시된 거의 수직(y) 크랙을 가진 나노 천공을 만들기 위해 수평(x) 방향과 평행하게 지향되어 시작하고, 이후 SQWP가 매시간 45도 단계만큼 다음 이미지에서 회전된다. 화살표는 각 이미지에서 편향된 균열의 관찰된 방향을 나타낸다.

[0253] 도 30은 4개의 상이한 SQWP 회전 각(0°, 45°, 90°, 135°)에서의 나노-천공 선을 갖는 별 패턴을 도시한다

다. 각 선을 만들기 위해, SQWP는 편향된 균열 방향이 스테이지 운동 방향과 평행하게 제어되도록 다른 회전 각도로 설정되었다. 개별 나노-친공 사이의 균열 전파가 의도된 방향을 정확히 따르는 것을 알 수 있다.

[0254] **빔 측정 방법.** 준-비-회절 빔의 프로파일의 측정은 그 전방에 NA=0.8, 60X 현미경 대물렌즈를 가진 CCD 카메라를 이용하여 수행되었다.

[0255] 현미경 대물렌즈는 CCD 카메라 상에 초점선의 단면을 확대하고 이미지화하도록 제공되었다.

[0256] 이러한 확대는 각 카메라 픽셀이 초점선의 주어진 단면 평면에서 오직 ~ 0.027미크론의 크기에 해당하여, 미크론 스케일의 빔 단면 조차 높은 충실도로 하위-해상도를 갖게 한다.

[0257] 현미경 대물렌즈 및 CCD 카메라는 z의 함수로서 빔의 단면 프로파일을 캡처하기 위해 빔의 광학 축을 따라 스캔된다.

[0258] 도 32는 하나의 주어진 z-위치(광학 축을 따른 위치)에 대한 빔 단면의 CCD 카메라로 얻어진 이미지이다.

[0259] 흑백 출력 음영은 광의 강도를 나타내며, 더 어두운 음영 가장 강하고 더 밝은 음영이 가장 약한 강도를 갖는다. x/y 스케일의 단위는 미크론이다. 도 32는 대칭 빔을 나타내고, 그 스폿은 수평(x) 방향을 따라 연장된다.

[0260] 도 33은 일련의 z-위치(광학 축을 따른 위치)에 대해, 각 단면 이미지의 피크 강도의 플롯이다. 강도 단위는 카메라의 각 픽셀에서 측정된 것으로서 아날로그 대 디지털 변환 비트(bits)이고, 이미지는 8-비트 CCD 카메라로 얻어지며, 그래서 최대 픽셀 강도는 255이다. 최대 강도는 z = 1.6 mm에서 일어난다. 도 32에 도시된 xy 단면 이미지는 최대 강도의 위치에서 얻어진 것이다.

[0261] 다음 두 예시에서, 위의 광학 시스템은 결과적인 광학 빔을 특성화하기 위해 비대칭 QNDB 및 위에서 설명한 CCD 카메라 시스템을 생성하는데 사용된다.

[0262] 두 경우에서, 광학기는 SQWP의 방향이 두 경우 사이에서 45도만큼 회전된 것을 제외하고 동일하다.

[0263] **다음은 F_D 를 결정하기 위한 절차의 개요이다.**

[0264] 1) 광학 축을 따른 일련의 위치에 대한 빔 강도 $I(x,y)$ 프로파일을 측정.

[0265] a. 이것은 측정이 빔 강도가 z의 함수로 최대에 도달하는 영역을 포함하고, z-위치의 양 측면에서 최대 레벨의 1/2 미만으로 떨어지도록 적절한 z 위치의 범위에서 수행되었다.

[0266] 2) 빔의 레일리 범위 측정

[0267] a. 상기 이미지로부터, 최대 강도로부터 최대 강도의 1/2로 떨어지도록 빔에 대해 취해진 z-거리를 측정한다.

[0268] 3) 빔의 $W_{0,eff}$ 계산

[0269] a. 이는 빔 허리의 z-위치(z-축에서의 최대 강도 위치)에서 측정된 빔 프로파일(이미지)을 이용하여 평가되었다.

[0270] b. 빔 프로파일의 주축 및 보조축 모두에 대해 W_0 를 측정한다 - 빔 강도를 그 피크의 $1/e^2$ 까지 떨어지게 하기 위한 방사상 거리. $W_{0,eff}$ 는 이중 가장 작은 것이다.

[0271] c. 이 측정의 일부로서, 하나는 또한 빔이 종횡비 = $W_{0,max} / W_{0,min} > 1.1$ 를 가지며, 대칭임을 확인한 경우를 확인할 수 있다.

[0272] 4) $W_{0,eff}$ 만에 의해 예측된 레일리 범위에 대해 측정된 레일리 범위를 비교

[0273] a. $F_D = Z_{Rx,min} / (\pi W_{0,eff}^2 / \lambda)$ 평가

[0274] b. 10 보다 큰 경우 QNDB를 가짐

[0275] **결과**

[0276] **실험적으로 제조된 비대칭 QNDB에서의 작업 예시**

[0277] **비대칭 및 F_D 계산:**

[0278] 예시 1) "-33" 파일

[0279] $\lambda=1.064$ 미크론

[0280] 13-33 → 참고, 타원의 장축이 x 축에 정렬됨

[0281] 초점선의 FWHM = 1.23mm(~2X 레일리 범위):

[0282] **레일리 범위의 측정:**

[0283] 레일리 범위는 피크 값에서 피크 값의 1/2까지 범이 약해지는 가장 짧은 거리이다.

[0284] 이 경우 가장 짧은 거리는 약 $z=1.17\text{mm}$ 에서 피크 강도의 1/2에 도달하면서, $z=1.6\text{mm}$ 에서 피크로부터 더욱 음의 z 를 향해 이동한다.

[0285] → 이는 0.43mm의 절반 강도 지점까지의 거리를 제공한다.

[0286] 양의 z 방향으로 이동하는 1/2 강도 지점에 대한 조사의 경우, 교차점은 약 $z=2.40\text{mm}$ 이다.

[0287] → 이는 0.80mm의 절반 강도 지점에 대한 거리를 제공한다.

[0288] → 상기 두 거리의 최소값은 레일리 범위를 얻기 위해 취해진다.

[0289] $Z_{R,\min} = 0.43\text{mm}$

[0290] $Z_{R,\min} = 0.43\text{mm}$ (x 및 y는 강도 방법을 이용할 때 동일하다)

[0291] 도 34 및 35는 각각 10미크론 x 10미크론 및 5미크론 x 5미크론 치수에 대해 도 32에 도시된 xy 단면의 중앙 부분의 확대도를 나타낸다.

[0292] 도 36은 도 35에 도시된 xy 단면에서 얻어진 x-방향(더 넓은 중앙 특성) 및 y-방향(더 좁은 중앙 특성)의 1차원 슬라이스에 따른 2 궤적을 나타낸다.

[0293] 분석된 단면 플롯은 $z \sim 1.6\text{mm}$ 에서의 것이며, 광학 축을 따른 강도가 그 피크에 있는 지점이다.

[0294] x-방향 궤적(슬라이스 X)는 2D 단면의 피크 강도 픽셀을 통해 그려진 픽셀 강도의 수평 단면이다.

[0295] y-방향 궤적(슬라이스 Y)는 2D 단면의 피크 강도 픽셀을 통해 그려진 픽셀 강도의 수직 단면이다.

[0296] **다음에서 x 및 y 방향에서의 스폿 반경을 계산한다:**

[0297] X-슬라이스 검토:

[0298] $W_{o,\min} = 4.995 - 4.06 = 0.94$ 미크론

[0299] $W_{o,\max} = 5.96 - 4.995 = 0.96$ 미크론

[0300] x 방향의 지름 = 1.9 미크론($1/e^2$ 강도 지점)

[0301] → $W_{o,\min} = 0.94$ 미크론

[0302] Y-슬라이스 검토:

[0303] $W_{o,\min} = 4.995 - 3.33 = 1.66$ 미크론

[0304] $W_{o,\max} = 7.39 - 4.995 = 2.40$ 미크론

[0305] y 방향의 지름 = 4.06 미크론($1/e^2$ 강도 지점)

[0306] → $W_{o,\max} = 1.66$ 미크론

[0307] **다음으로 $W_{o,\text{eff}}$ 계산**

- [0308] $W_{o,eff}$ = 최단 거리, 임의의 방향(x 또는 y)에서, 최대의 $1/e^2$ 로 강도 하락
- [0309] → $W_{o,eff}$ = 0.94 미크론
- [0310] **다음으로 종횡비 계산:**
- [0311] → 종횡비 = $W_{o,max} / W_{o,min}$ = 1.66/0.94 = 1.76
- [0312] 빔은 비대칭이고, 종횡비는 > 1.1이다.
- [0313] **F_D 의 결정:**
- [0314] 측정된 최소 레일리 범위 = 0.43mm = 430 미크론
- [0315] $Z_{Rx,min}$ = 430 미크론
- [0316] $W_{o,eff}$ = 0.94 미크론($1/e^2$ 로 감쇠하는 최단 방사상 거리를 이용)
- [0317] → $\pi W_{o,eff}^2 / \lambda$ = 2.61 미크론
- [0318] → $F_D = Z_{Rx,min} / (\pi W_{o,eff}^2 / \lambda)$ = 430 미크론 / 2.61 미크론 = 165
- [0319] $F_D > 10$, 이는 준-비 회절 빔이다.
- [0320] 및
- [0321] **예시 2) "-39" 파일**
- [0322] 예시 2에서, 도 31의 광학 시스템에 도시된 SQWP는 도 1에 사용된 SQWP의 위치에 대해 45도 회전된다. 예시 1 및 예시 2의 광학 시스템은 그렇지 않으면 동일하다.
- [0323] 도 37은 xy 빔 단면을 나타내고 도 38은 z-방향(광학 축을 따른 방향)을 따른 상이한 초점 위치에서의 피크 강도를 나타낸다. 피크 강도는 $z=1.8$ mm에서 발생하며 도 37에 도시된 xy 단면은 피크 강도의 z-위치에서 얻어진다. 도 37 및 38에 도시된 데이터는 도 32 및 33에 도시된 데이터와 같은 방식으로 얻어진다. 도 39 및 40은 각각 10미크론 x 10미크론 및 5미크론 x 5미크론 치수에 대해 도 37에 도시된 xy 단면의 중앙 부분의 확대도이다.
- [0324] λ = 1.064 미크론
- [0325] 13-39 → 참고, 타원의 장축은 x-축에 대해 45도로 정렬됨
- [0326] 초점선의 FWHM = 1.21 mm(~2X 레일리 범위)
- [0327] **레일리 범위의 결정:**
- [0328] 레일리 범위는 빔이 그 피크 값에서 피크 값의 1/2까지 감쇠하는 최단 거리이다.
- [0329] 이 경우, 최단 거리는 $z = 1.8$ mm에서 피크에서 더 큰 음의 z 방향으로 이동하여, 약 $z = 1.16$ mm에서 피크 강도의 1/2에 도달한다.
- [0330] → 이는 0.64mm의 절반 강도 지점까지의 거리를 제공한다.
- [0331] 양의 z 방향으로 움직이는 1/2 강도 지점을 검색하는 경우, 교차점은 약 $z = 2.37$ mm이다.
- [0332] → 이는 0.57mm의 절반 강도 지점까지의 거리를 제공한다.
- [0333] → 상기 두 거리의 최소를 취하는 것은, x-차원 레일리 범위를 얻는 것이다:
- [0334] $Z_{Rx,min}$ = 0.57mm
- [0335] $Z_{Ry,min}$ = 0.57mm(x 및 y는 강도 방법을 이용할 때 동일하다)
- [0336] 도 41은 도 37에 도시된 xy 단면으로부터 얻어진 -45도 방향(더 넓은 중앙 특성을 가진 궤적) 및 +45도 방향(더

좁은 중앙 특성을 가진 궤적)에서의 1차원 슬라이스에 따른 2개의 궤적을 나타낸다.

[0337] 분석된 단면 플롯은 광학 축을 따른 강도가 피크에 있었던, $z \sim 1.8\text{mm}$ 에서의 플롯이다. 빨간색 궤적(슬라이스 -45도)은 2d 단면의 피크 강도 픽셀을 통해 그려진 픽셀 강도의 -45도 단면(2D 플롯에서 왼쪽 아래에서 오른쪽 상단을 횡단하는)이다.

[0338] +45도 궤적(슬라이스 + 45도)은 xy 단면의 피크 강도 픽셀을 통해 그려지는 픽셀 강도의 +45도 단면(도 37의 xy 단면에서 왼쪽 상단에서 오른쪽 하단을 횡단하는)이다.

[0339] **다음으로 -45도 및 +45도 방향에서의 스폿 반경 계산:**

[0340] -45도 슬라이스 검토:

[0341] $W_{o,\min} = 7.07 - 4.96 = 2.11$ 미크론

[0342] $W_{o,\max} = 9.40 - 7.07 = 2.33$ 미크론

[0343] -45도 방향의 지름 = 4.4 미크론($1/e^2$ 강도 지점)

[0344] $\rightarrow W_{o,\min} = 2.11$ 미크론

[0345] +45도 슬라이스 검토:

[0346] $W_{o,\min} = 7.05 - 6.12 = 0.93$ 미크론

[0347] $W_{o,\max} = 7.96 - 7.05 = 0.91$ 미크론

[0348] y방향의 지름 = 1.84 미크론($1/e^2$ 강도 지점)

[0349] $\rightarrow W_{o,\max} = 0.91$ 미크론

[0350] **다음으로 $W_{o,\text{eff}}$ 계산**

[0351] $W_{o,\text{eff}}$ = 최단 거리, 임의 방향으로(x 또는 y), 최대값의 $1/e^2$ 까지 강도 강하

[0352] $\rightarrow W_{o,\text{eff}} = 0.91$ 미크론

[0353] **이후 중형비를 계산할 수 있다:**

[0354] \rightarrow 중형비 = $W_{o,\max} / W_{o,\min} = 2.11 / 0.91 = 2.32$

[0355] **FD의 결정:**

[0356] 측정된 최소 레일리 범위 = 0.43 mm = 430 미크론

[0357] $Z_{\text{Rx},\min} = 570$ 미크론

[0358] $W_{o,\text{eff}} = 0.91$ 미크론($1/e^2$ 로 감쇠하는 최단 방사상 거리를 이용)

[0359] $\rightarrow \pi W_{o,\text{eff}}^2 / \lambda = 2.44$ 미크론(원값에서 보정됨)

[0360] $\rightarrow F_D = Z_{\text{Rx},\min} / (\pi W_{o,\text{eff}}^2 / \lambda) = 570 \text{ 미크론} / 2.44 \text{ 미크론} = 234$

[0361] $\rightarrow F_D > 10$, 이는 준-비 회절 빔이다.

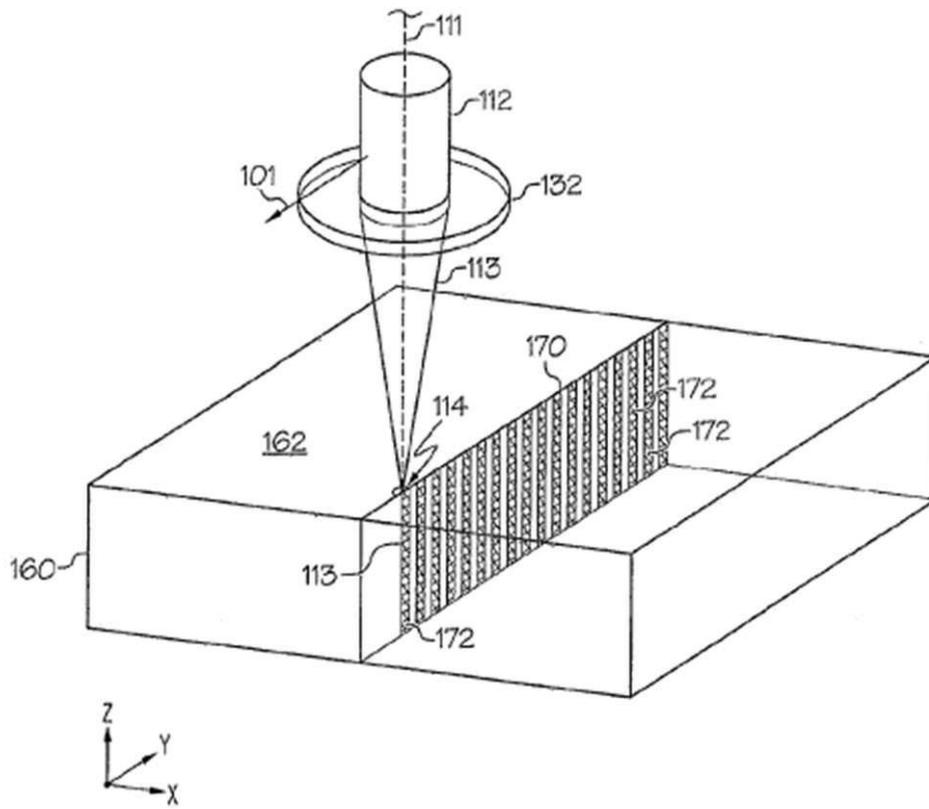
[0362] **모델링된 결과**

[0363] 최종적으로, 도 42-45는 상이한 z 위치에서의 일련의 빔 프로파일 상의 광학 분산($\sigma_x^2(z)$ 또는 $\sigma_x^2(z)$)의 직접 계산이 또한 어떻게 QNDB의 레일리 범위($Z_{\text{Rx},\min}$)를 계산하게 하는지를 나타낸다.

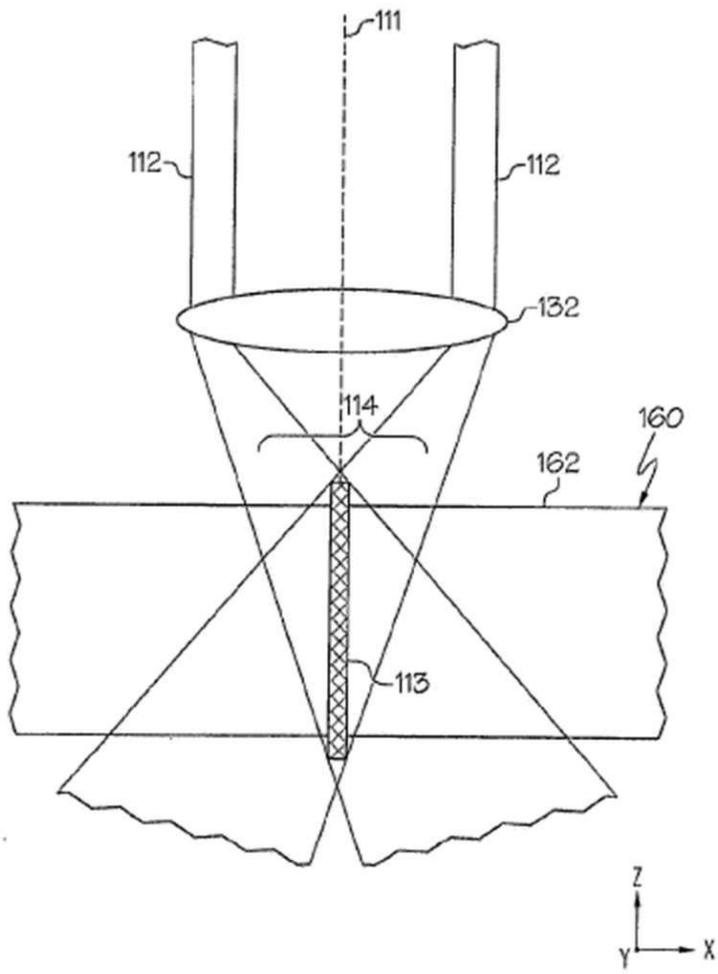
- [0364] 이는 상기 예시에서 실험적으로 수행한 것처럼 빔 강도가 광학 축에서 그 최대값의 1/2로 떨어지는 지점을 측정하는 것과는 대조적으로, 수식(31)에서 사용하기 위해 레일리 범위를 설정하는 다른 방법이다.
- [0365] 도 42는 축대칭 QNDB 프로파일을 나타낸다.
- [0366] 도 43은 z 의 함수(상부 플롯)로서 광학 축의 결과적인 강도(우측 플롯)와, 더불어, z 의 함수로서(제곱근으로) 계산된 빔 분산(아래 우측 플롯)을 나타낸다. x 방향의 분산 및 y 방향의 분산은 빔이 회전 대칭이므로 동일하다. x 또는 y 레일리 범위는 $\sigma_x(z)$ 또는 $\sigma_y(z)$ 가 rm 최소값보다 제곱근(2, sqrt)의 계수만큼 증가하는 z 축을 따른 거리에 의해 결정된다. 이것은 $\sigma_x^2(z)$ 또는 $\sigma_y^2(z)$ 가 2의 계수만큼 증가할 때를 측정하는 것과 같다.
- [0367] 도 44 및 45는 비대칭 QNDB에 대한 동일한 정보 집합을 보여준다. 이것은 상기 예제 중 하나에서 실험적으로 생성된 것과 동일한 빔 형태이다. 빔이 비대칭이기 때문에, x 방향과 y 방향의 빔 분산은 더이상 동일하지 않다. 빔이 x 축에서 더 좁아지고 이로 인해 x 축에서 더 빠르게 회절하기 때문에, x 방향의 분산이 z 와 y 방향의 분산에 따라 훨씬 빠르게 증가한다. 여기서 주목해야 하는 것은 1.4의 값(즉, 제곱근(2))으로 $\sigma_x(z)$ 가 상승하는 정확히 동일한 z -위치가 광학 강도 $I(z)$ 가 그 피크의 1/2로 떨어지는 지점인 경우이다.
- [0368] 이는 빔 분산의 측정 또는 피크 강도의 강하 측정이 레일리 범위 $Z_{Rx, min}$ 을 측정하는 데 어떻게 사용될 수 있는지를 보여준다.
- [0369] 두 가지 방법의 유일한 차이점은 강도 방법을 사용하는 것이고, x 또는 y 방향 프로파일에 대한 레일리 범위 측정 간에 더 이상 차이가 없다는 것이다.
- [0370] 즉, 강도 방법이 사용된 경우:
- [0371] $Z_{Rx, min} = Z_{Ry, min}$ 및 $Z_{Rx, max} = Z_{Ry, max}$ 이다.
- [0372] 이는 각 빔 강도 프로파일 $I(x,y)$ 에 대해 오직 하나의 최대 강도 위치(x,y)가 있기 때문이다.
- [0373] 범위는 본원에서 "약" 하나의 특정 값으로부터 및/또는 "약" 다른 특정 값으로 표현될 수 있다. 그러한 범위가 표현될 때, 다른 실시예는 하나의 특정 값으로부터 및/또는 다른 특정 값으로 포함한다. 유사하게, 값이 근사값으로 표현될 때, 선행하는 "약"의 사용에 의해, 특정 값이 또 다른 실시예를 형성한다는 것이 이해될 것이다. 범위 각각의 종점은 다른 종점과 관련하여, 그리고 다른 종점과는 독립적으로 중요하다는 것이 더 이해될 것이다.
- [0374] 본원에서 사용되는 방향성 용어 - 예를 들어, 아래, 오른쪽, 왼쪽, 전방, 후방, 상부, 하부 - 는 도면을 참조하여만 만들어지며, 절대적인 배향을 의미하는 것은 아니다.
- [0375] 특별히 명시하지 않는 한, 본원에 기재된 임의의 방법은 그 단계가 특정 순서로 수행될 것을 요구하는 것으로 해석되지 않으며, 임의의 기기로 특정 배향이 요구되는 것으로 해석되지 않아야 한다. 따라서, 방법 청구항이 그 단계가 따르는 순서를 실제로 암시하지 않거나, 또는 임의의 기기 청구항이 개별 구성 요소에 대한 순서 또는 배향을 실제로 암시하지 않는 경우, 또는 청구 범위 또는 설명에서 달리 명시되지 않는 경우 단계들은 특정 순서로 제한되거나, 장치의 구성 요소에 대한 특정 순서 또는 배향이 열거되지 않으며, 어떤 식으로든 순서 또는 배향이 유추되는 것은 결코 아니다. 이것은 해석을 위한 가능한 모든 비-명시적 근거를 담고 있으며, 이는: 단계의 배열, 조작 흐름, 구성 요소의 순서, 또는 구성 요소의 배향에 관한 논리 문제; 문법적 구성이나 구두점에서 파생된 평범한 의미; 명세서에서 설명된 실시예들의 수 또는 유형;을 포함한다.
- [0376] 본원에서 사용된 "하나", "한"과 같은 단수 형태는 문맥이 달리 지시하지 않는 한 복수 대상을 포함한다. 따라서, 예를 들어, "하나의" 성분에 대한 언급은 문맥이 다른 것을 명백하게 나타내지 않는 한, 2개 이상의 그러한 성분을 갖는 관점을 포함한다.
- [0377] 통상의 기술자는 청구된 주제의 취지 및 범위를 벗어나지 않으면서 본 명세서에 기술된 실시예에 대해 다양한 수정 및 변형이 이루어질 수 있음을 명백히 알 수 있을 것이다. 따라서, 본 명세서는 첨부된 특허 청구 범위 및 그 등가물의 범위 내에 있는 그러한 수정 및 변형이 본원에 기재된 다양한 실시예의 변형 및 변경을 포함하는 것으로 의도된다.

도면

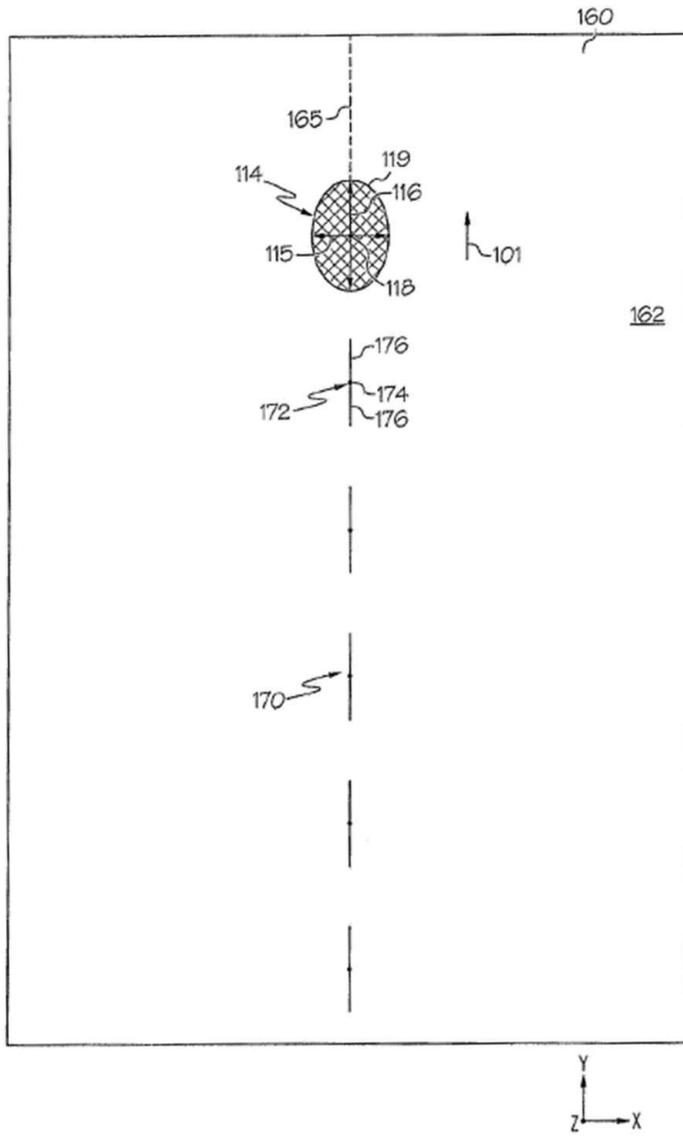
도면1a



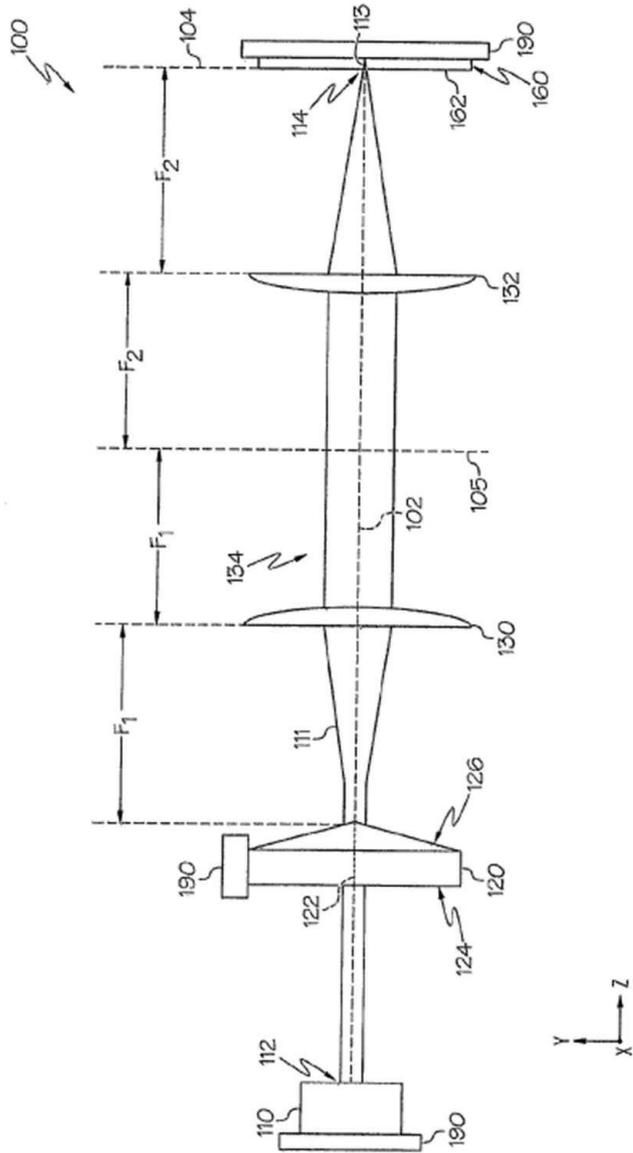
도면1b



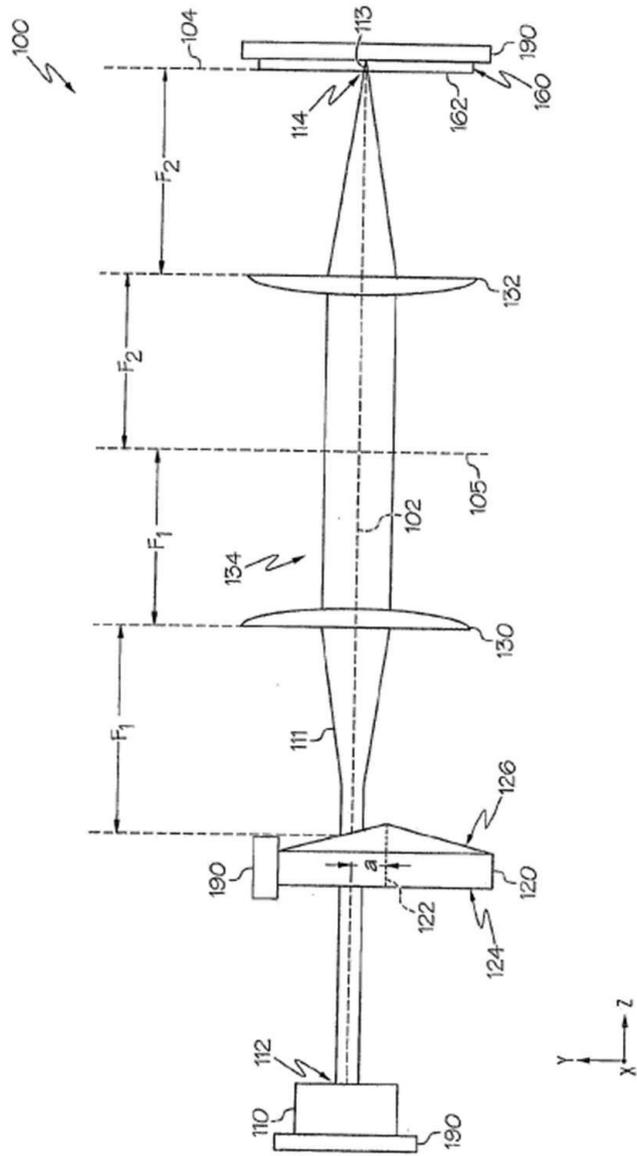
도면2



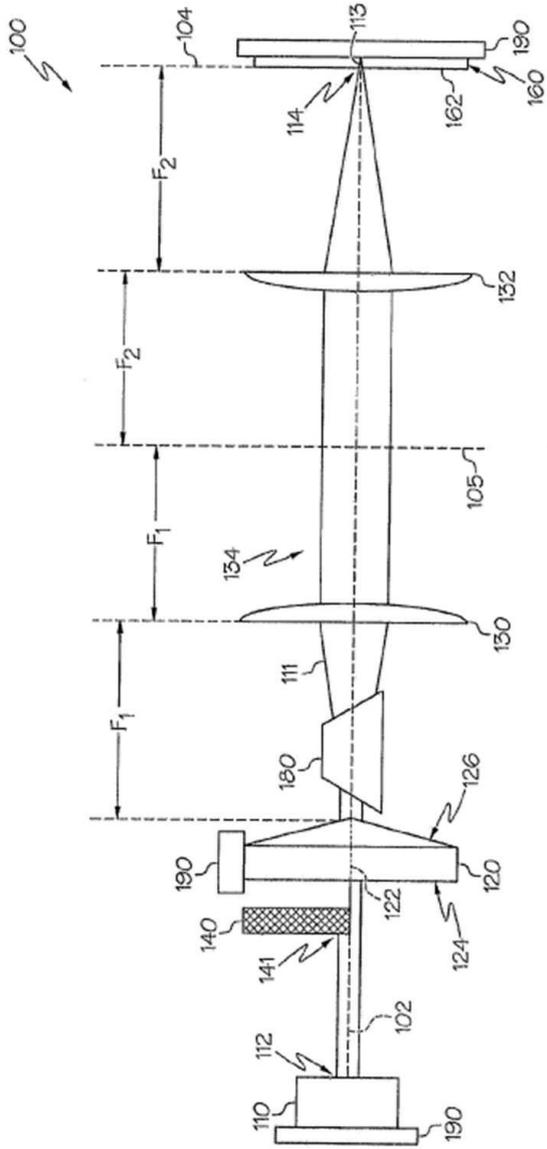
도면3



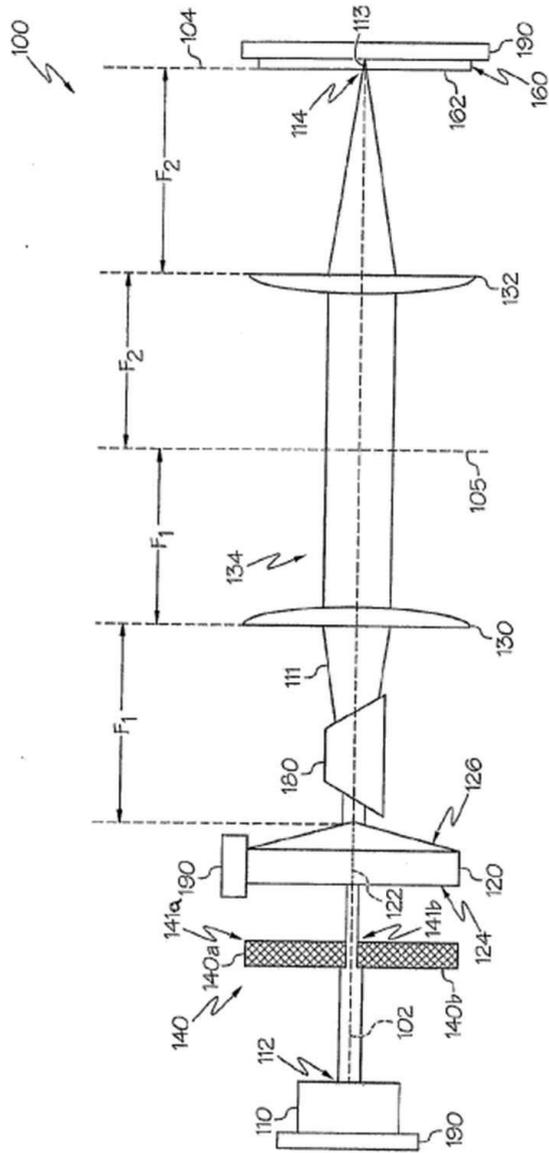
도면4



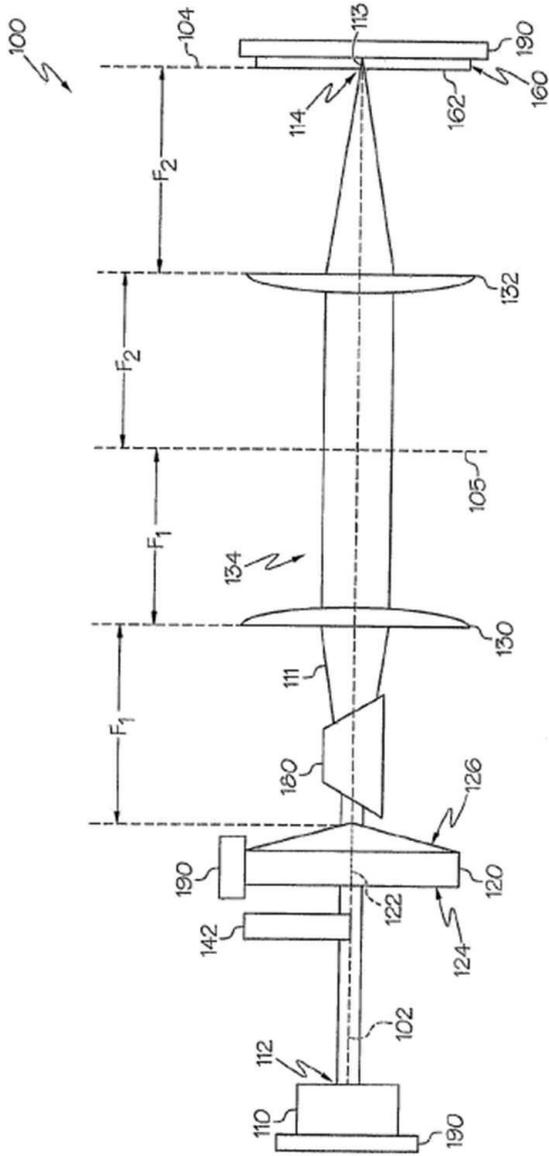
도면5a



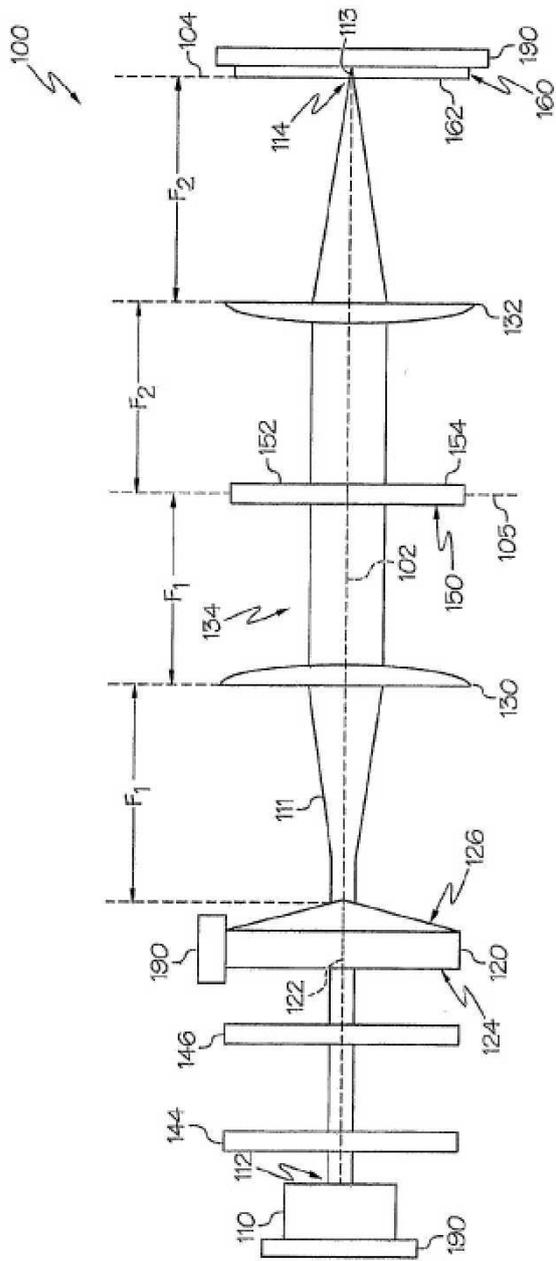
도면5b



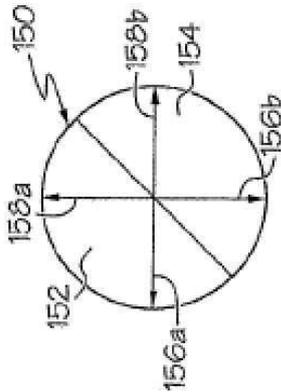
도면6



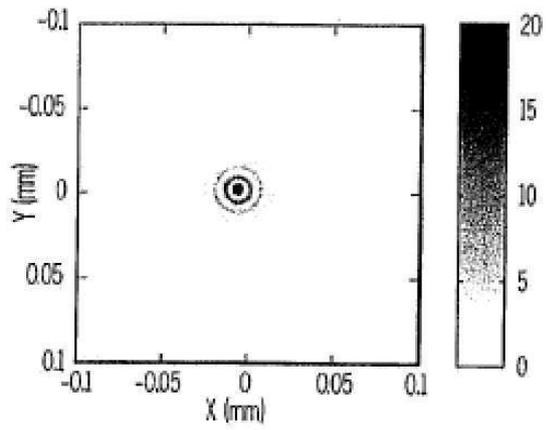
도면7a



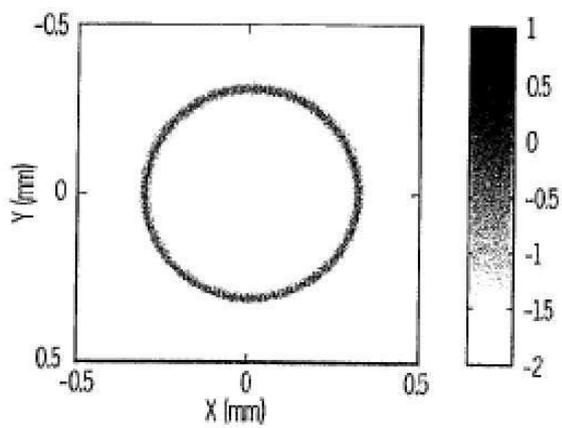
도면7b



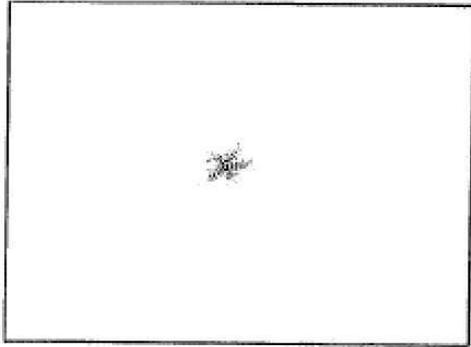
도면8a



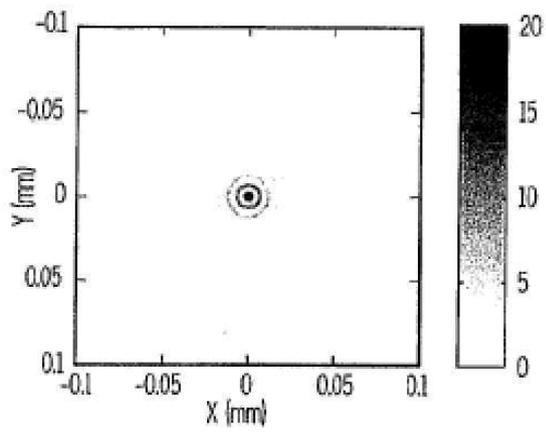
도면8b



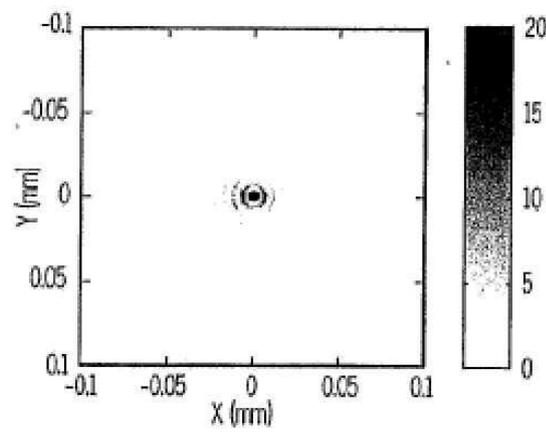
도면8c



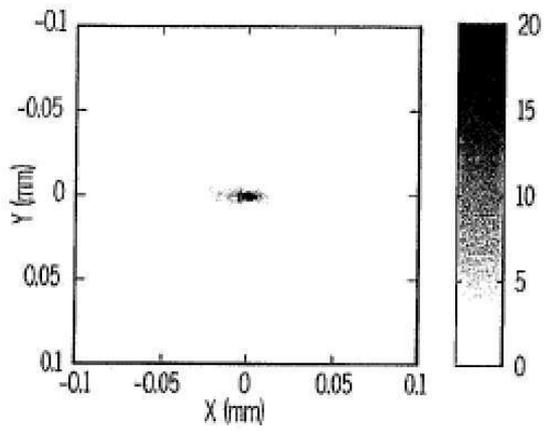
도면9



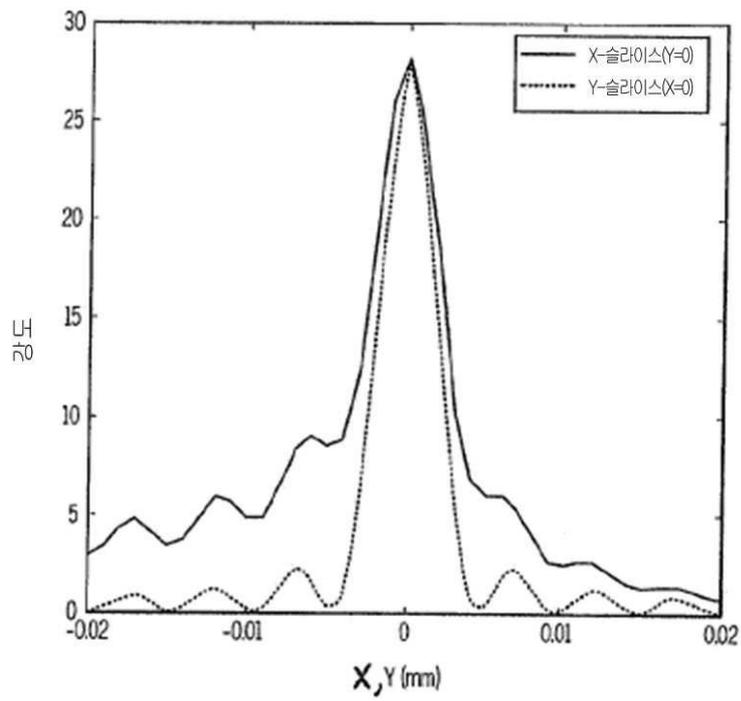
도면10



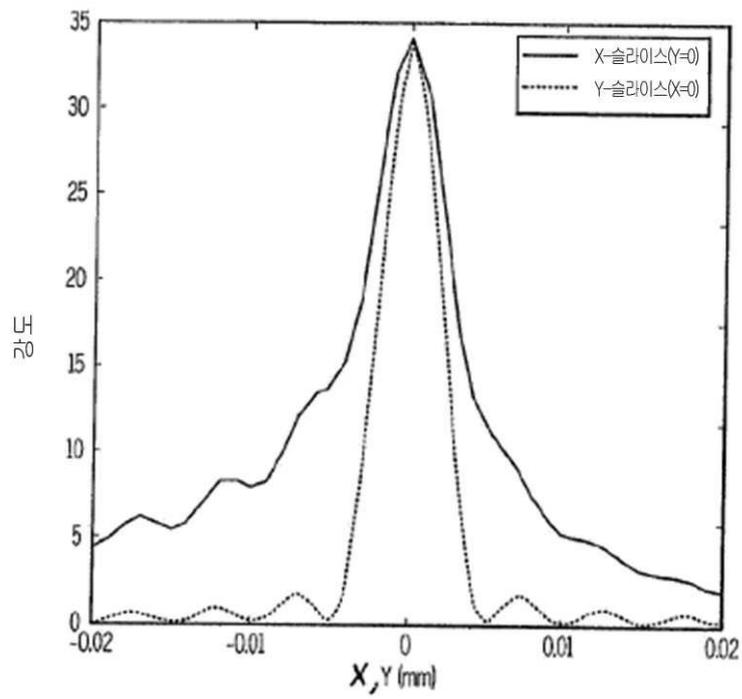
도면11a



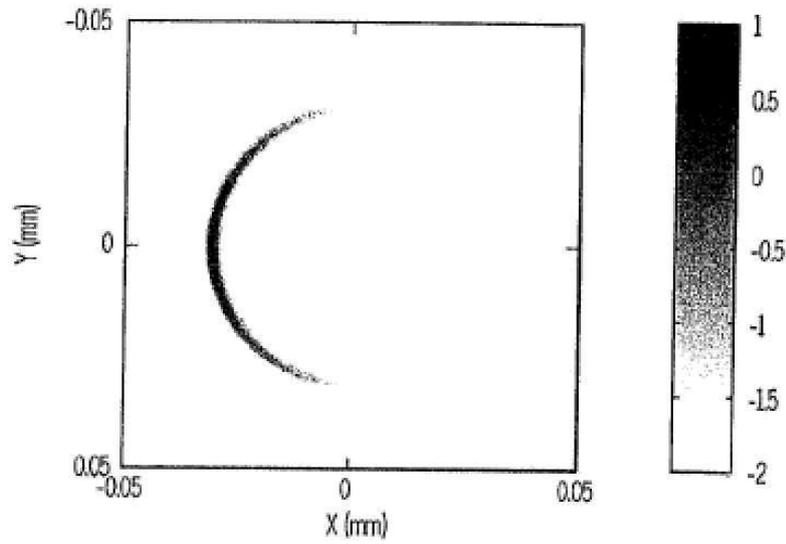
도면11b



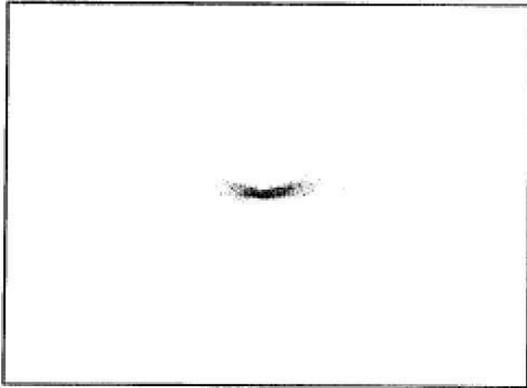
도면11c



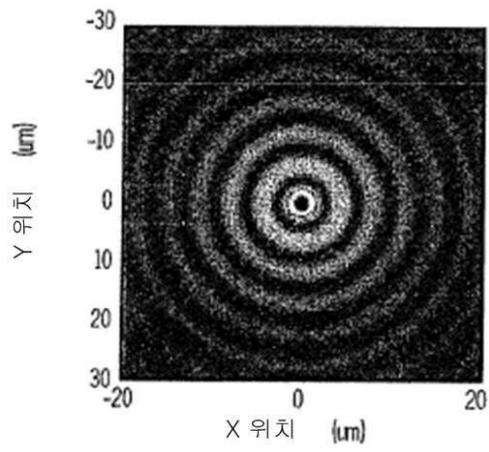
도면11d



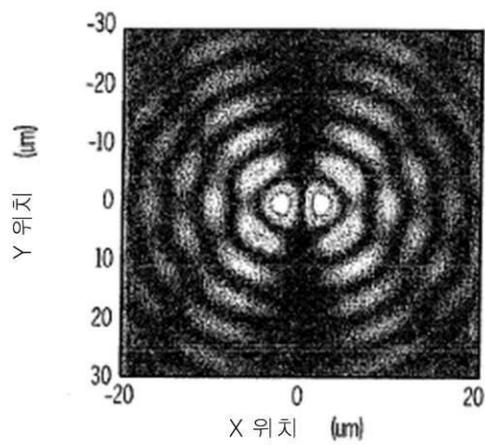
도면11e



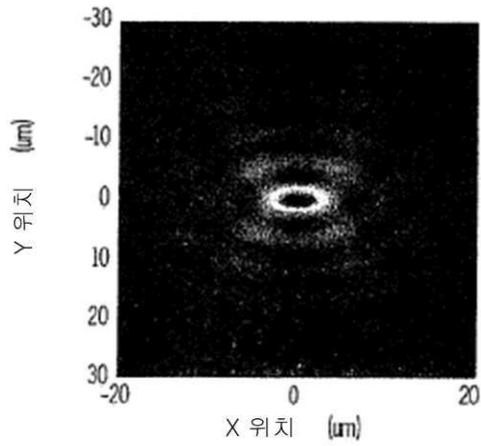
도면12a



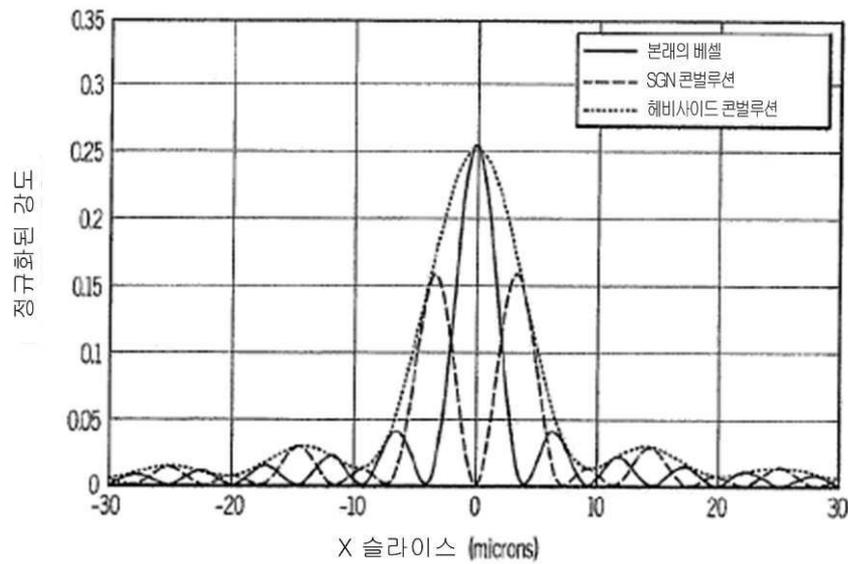
도면12b



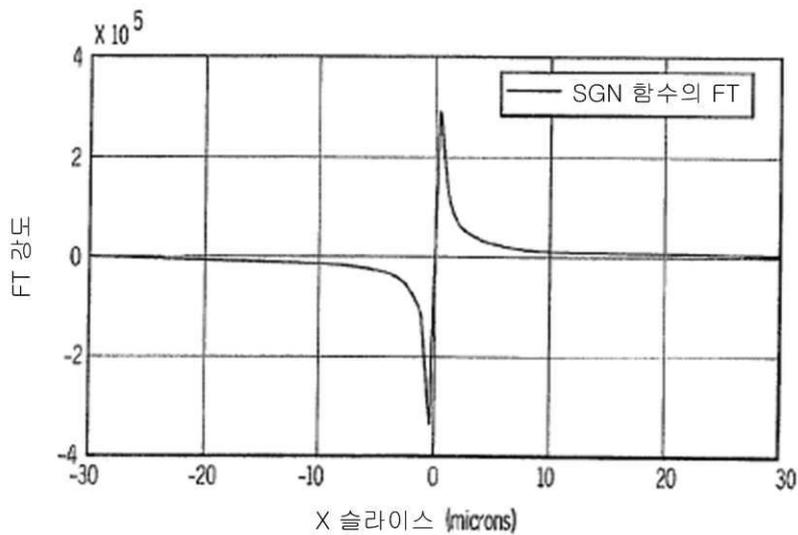
도면12c



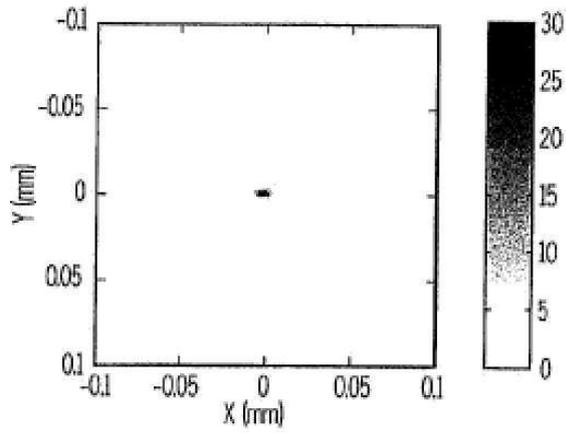
도면12d



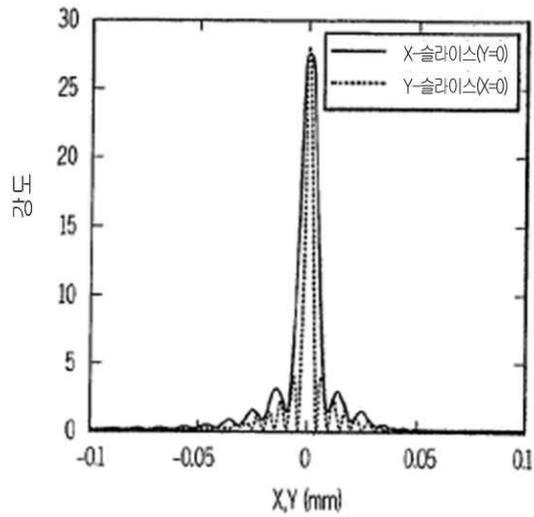
도면12e



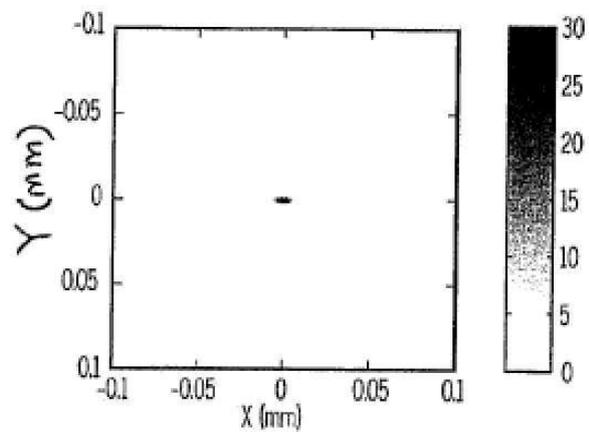
도면12f



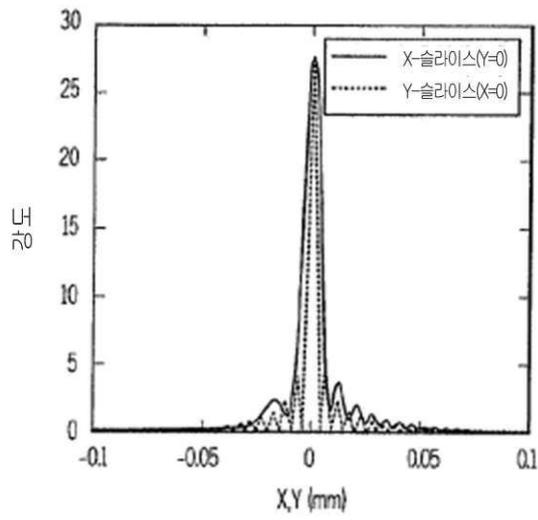
도면12g



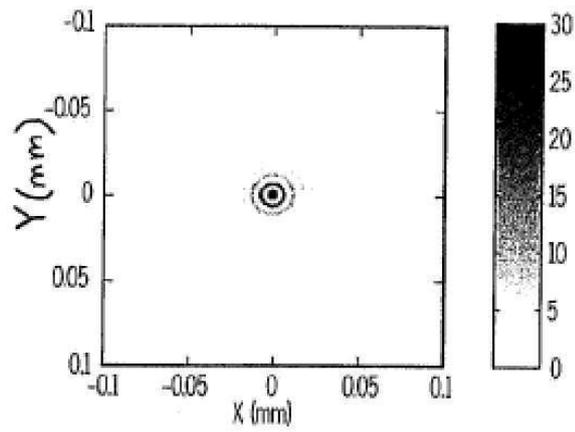
도면12h



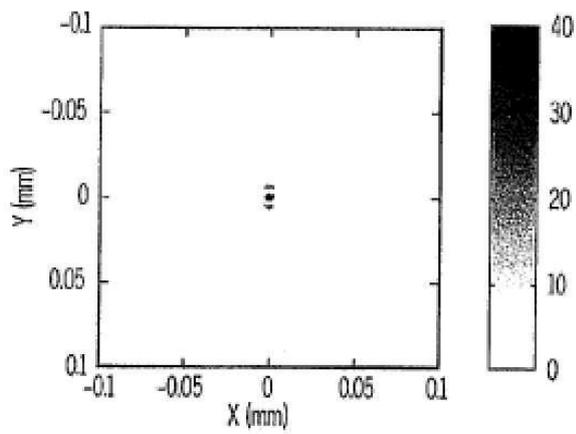
도면12i



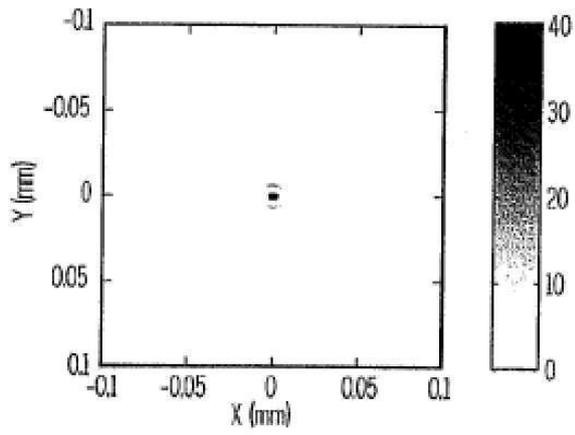
도면13a



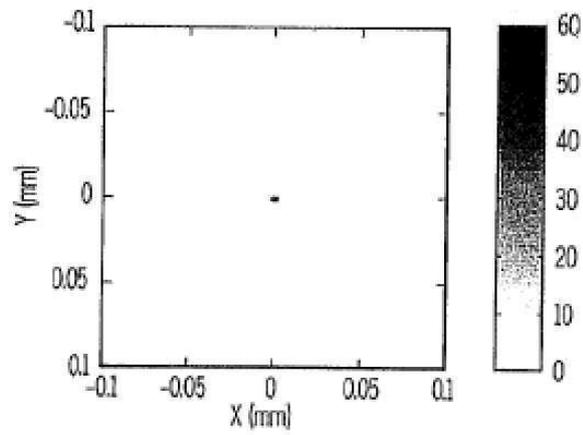
도면13b



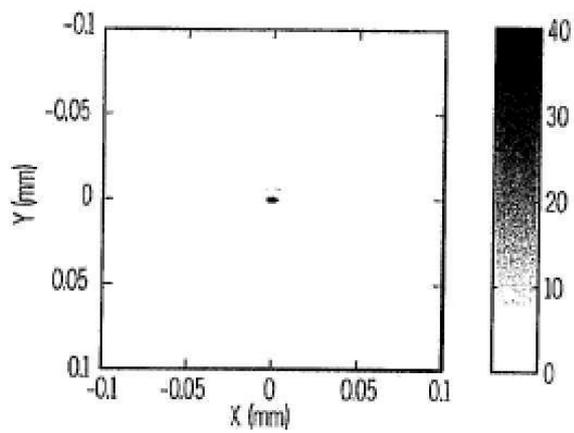
도면13c



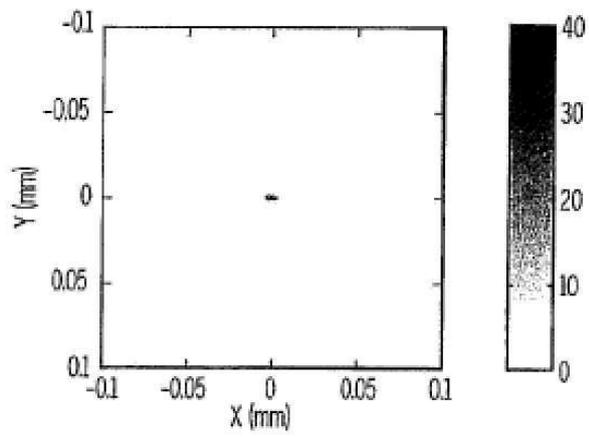
도면13d



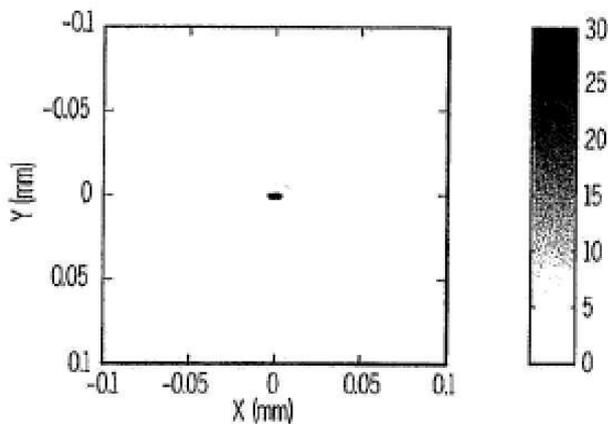
도면13e



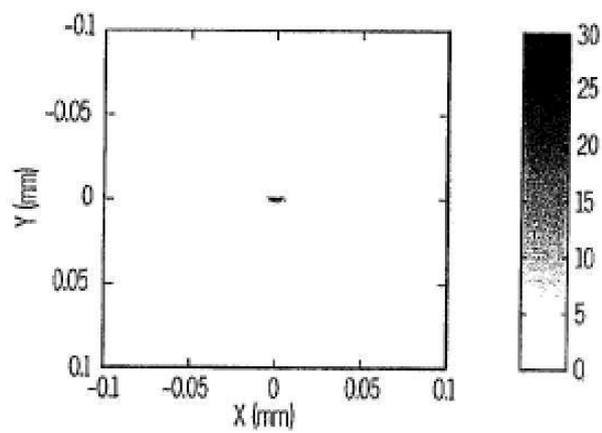
도면13f



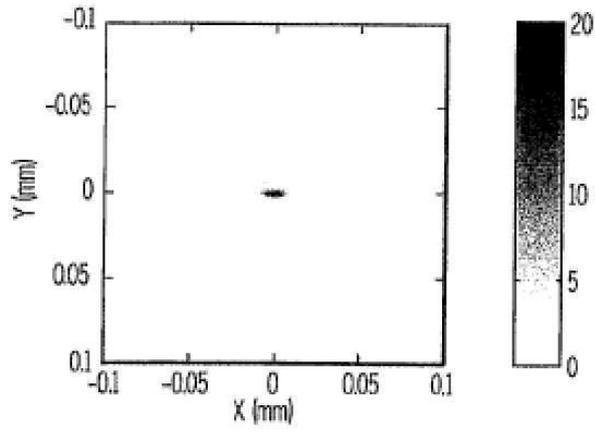
도면13g



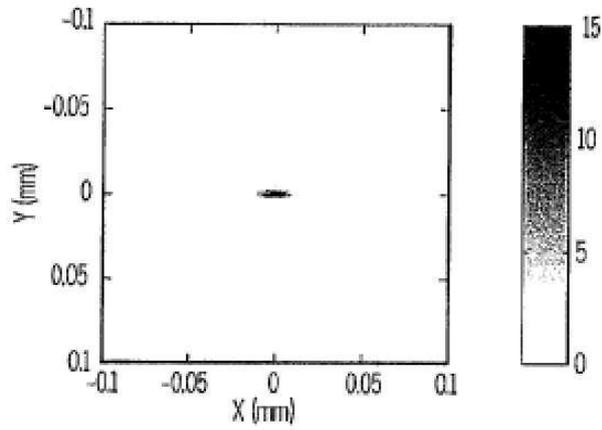
도면13h



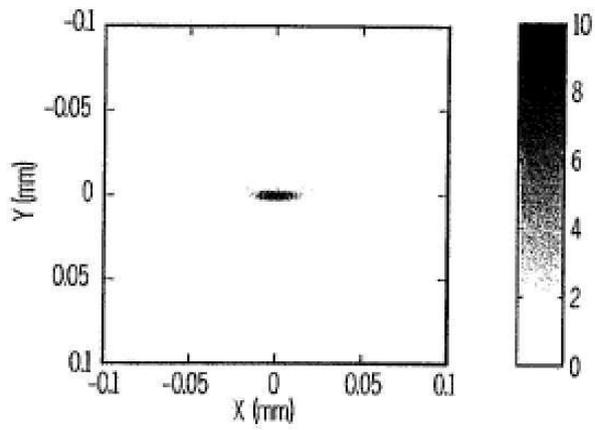
도면13i



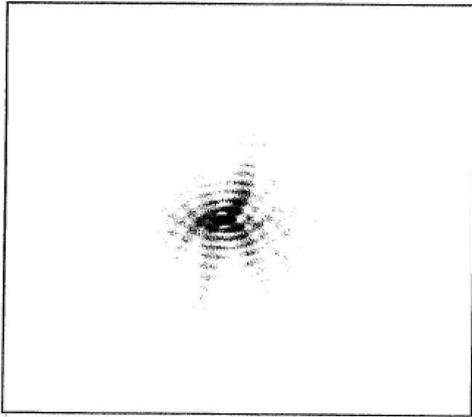
도면13j



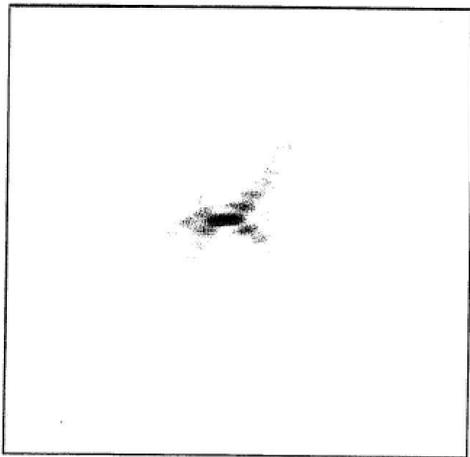
도면13k



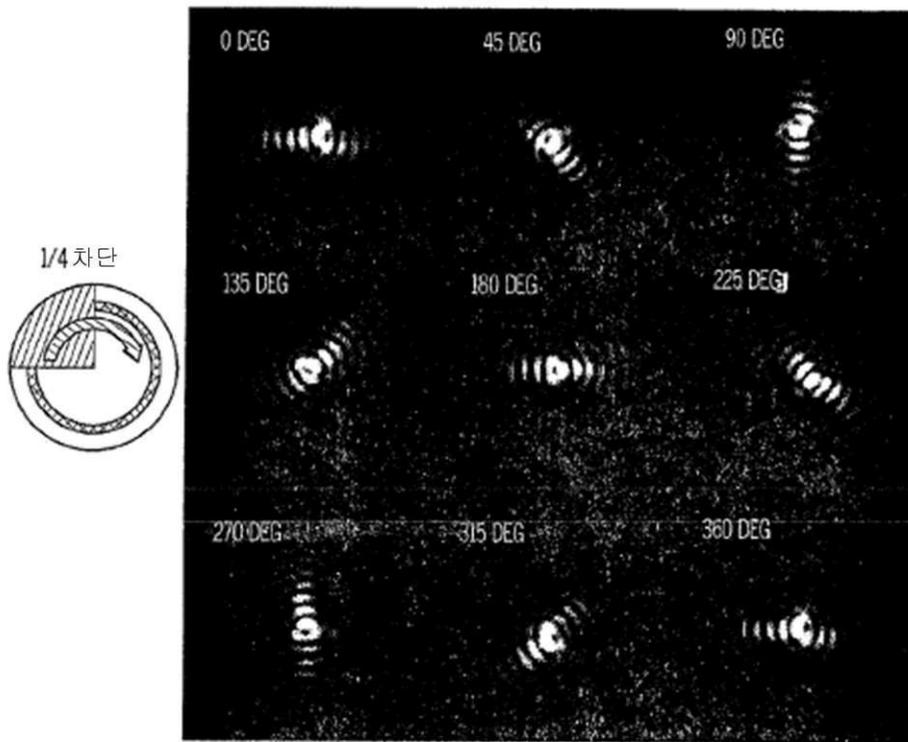
도면14



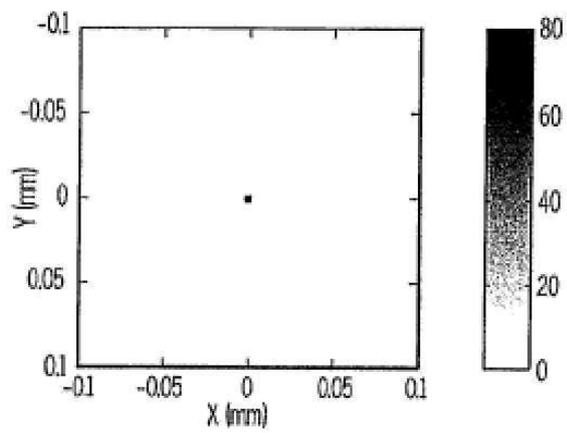
도면15



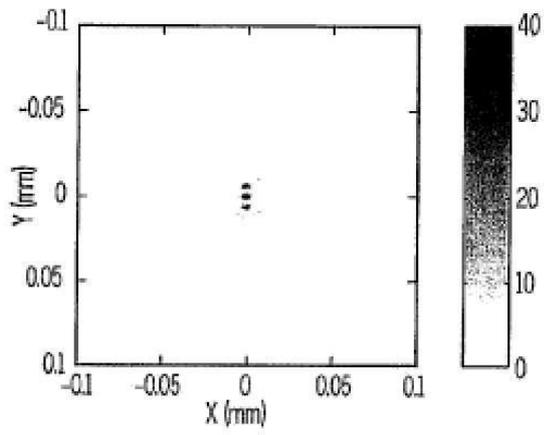
도면16



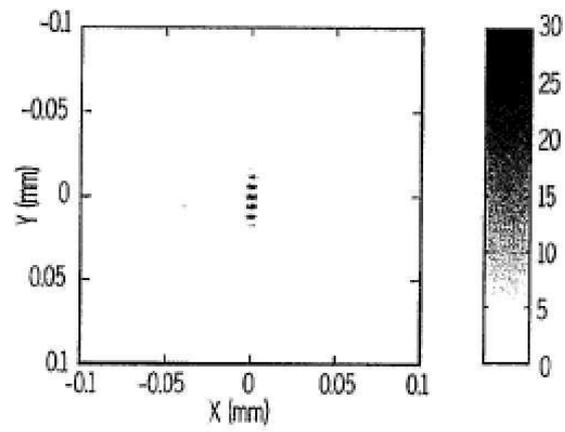
도면17a



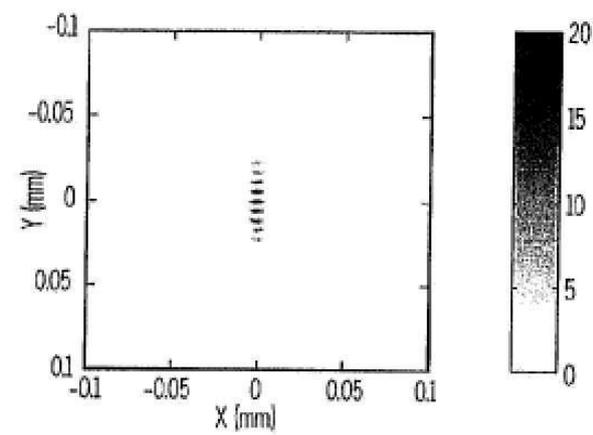
도면17b



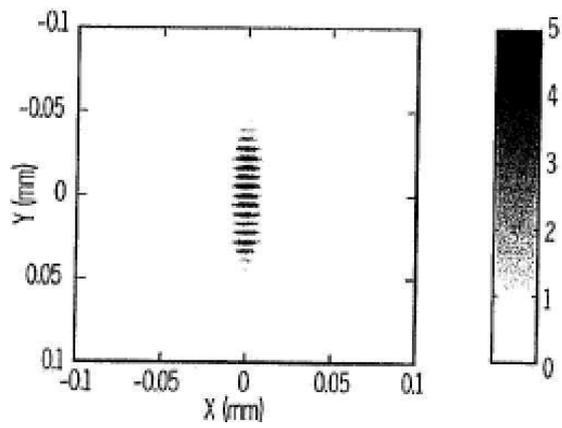
도면17c



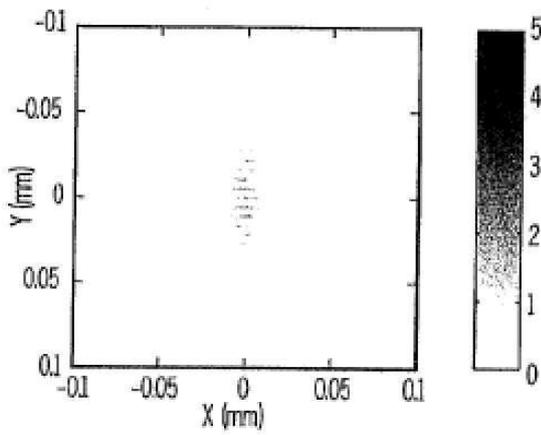
도면17d



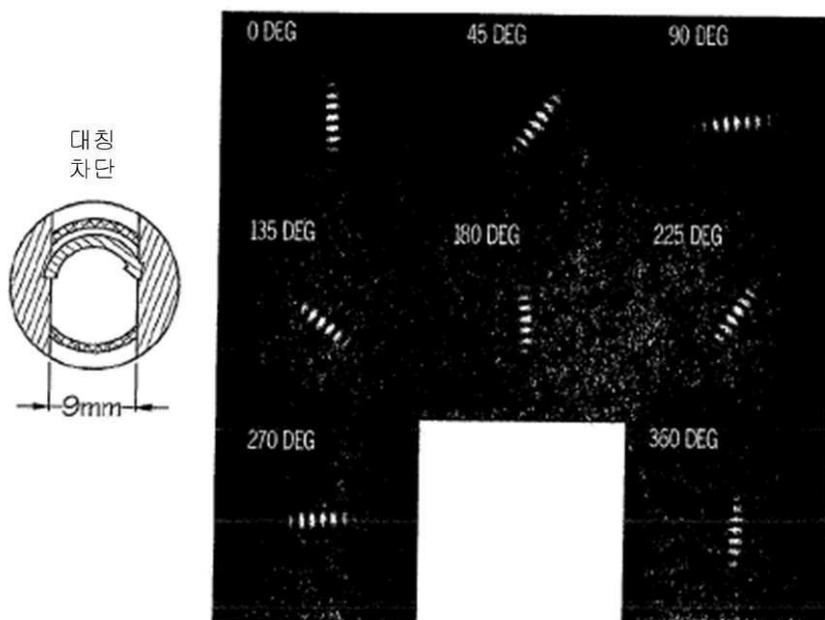
도면17e



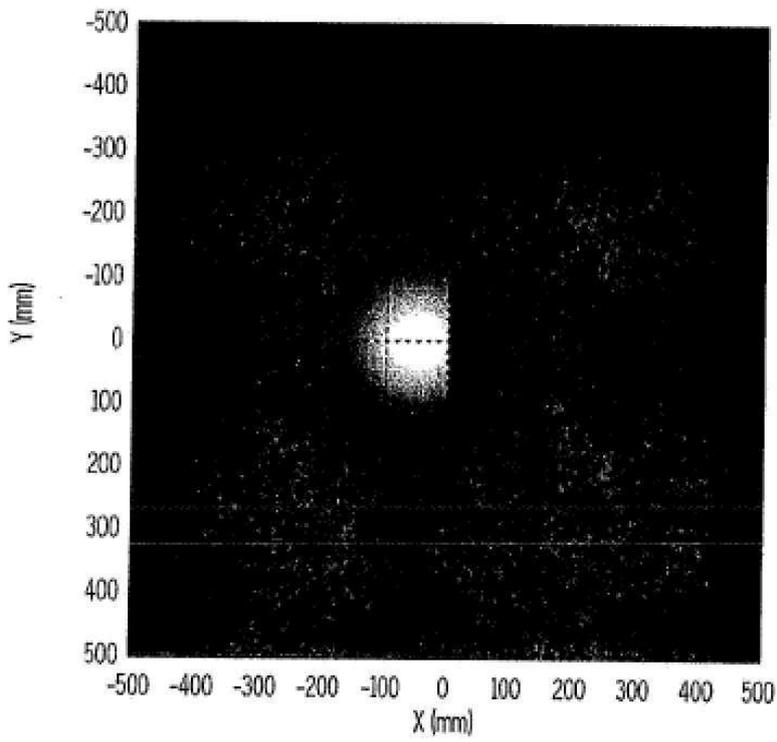
도면17f



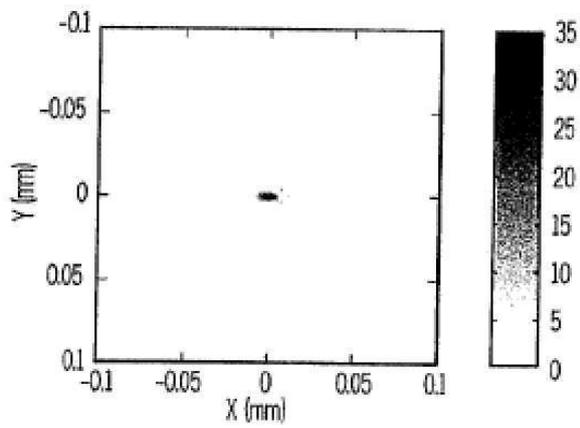
도면18



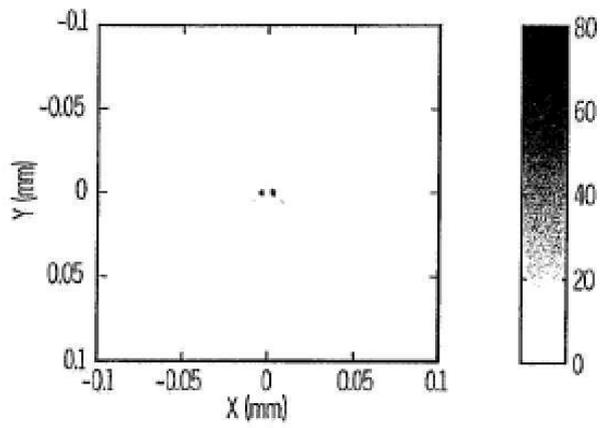
도면19a



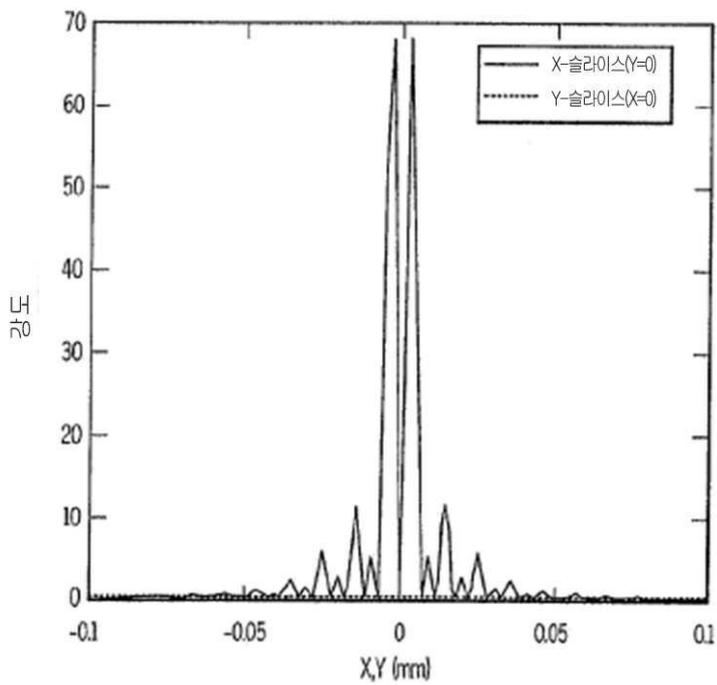
도면19b



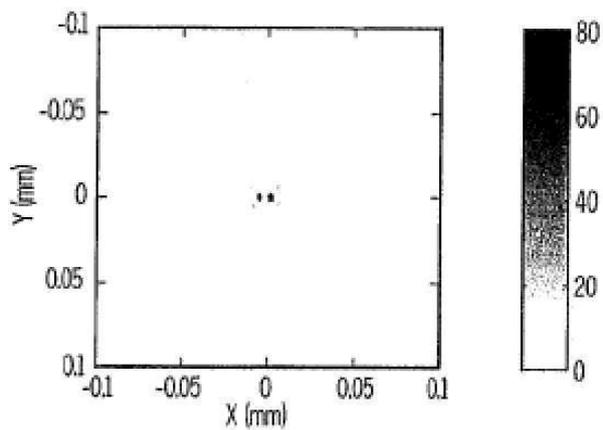
도면20a



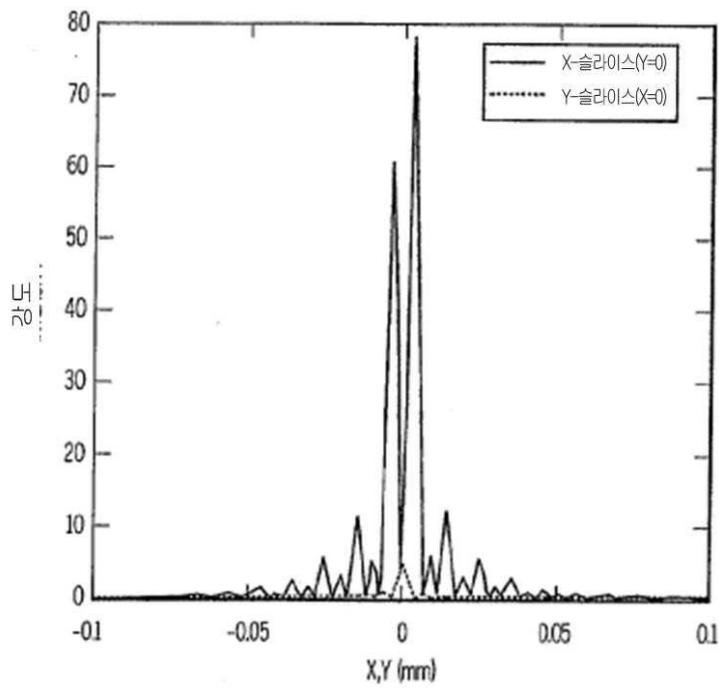
도면20b



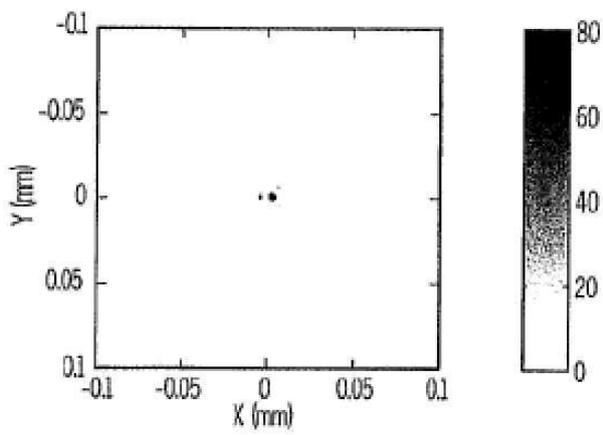
도면21a



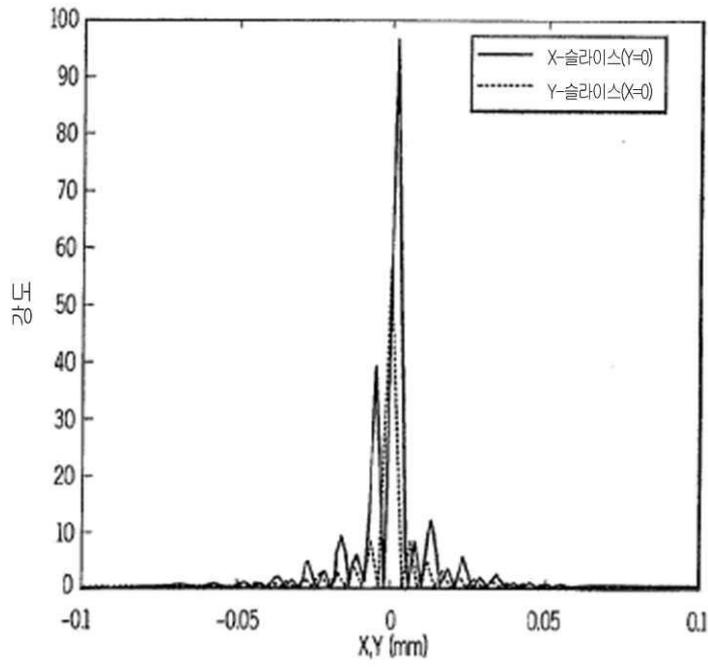
도면21b



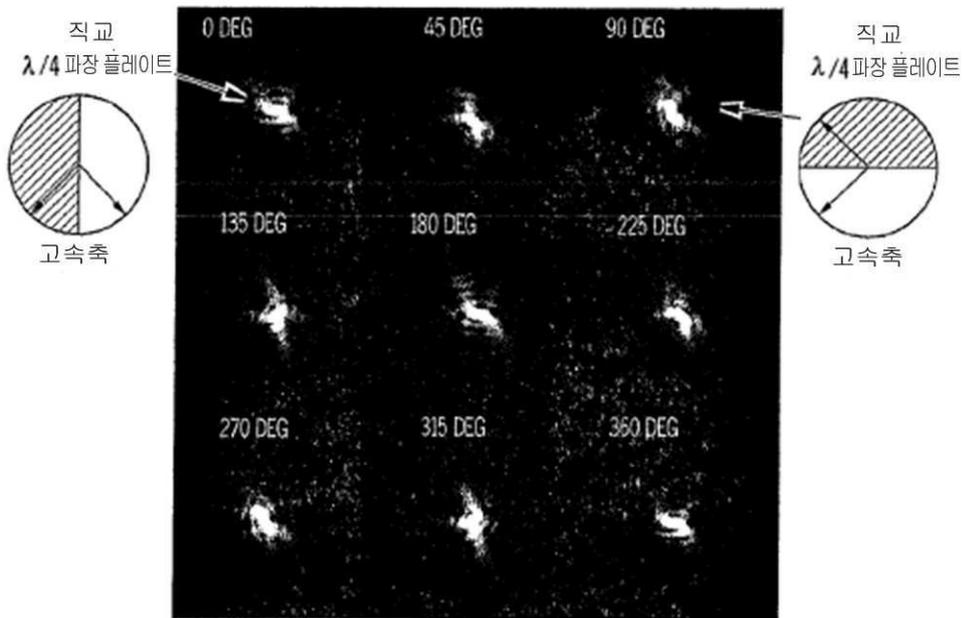
도면22a



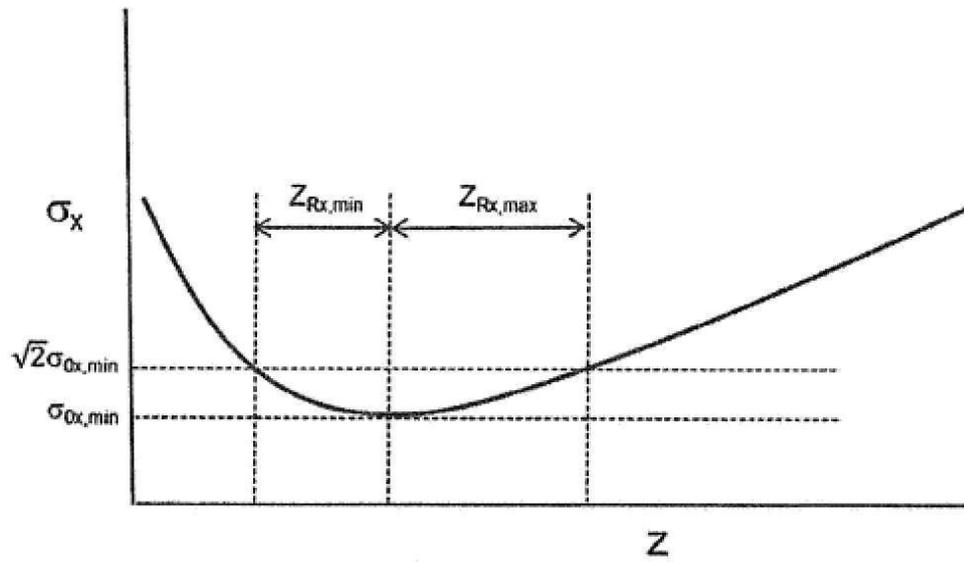
도면22b



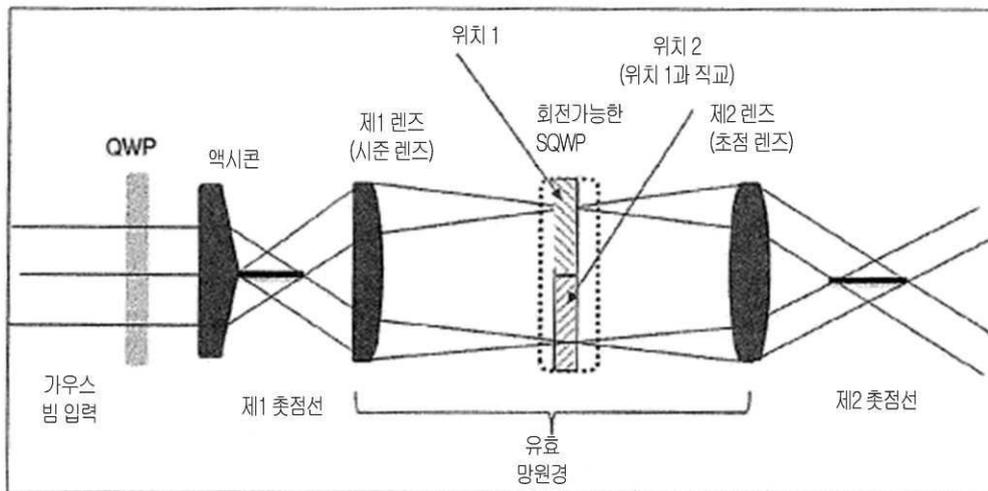
도면23



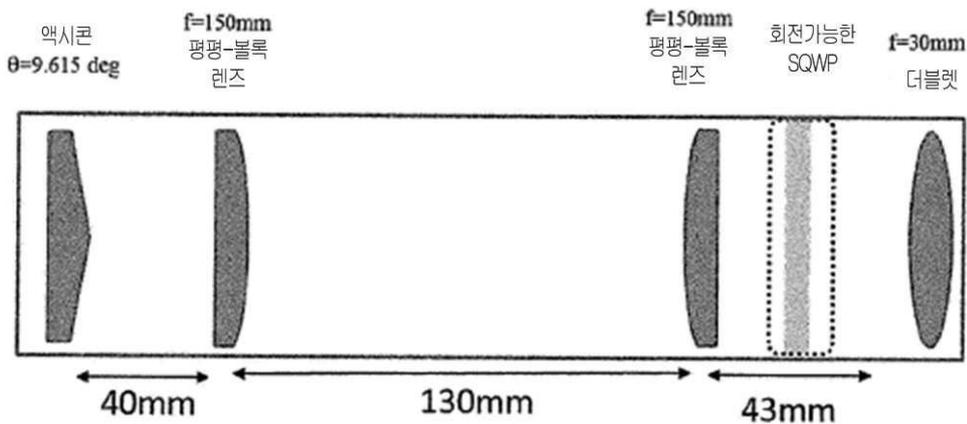
도면24



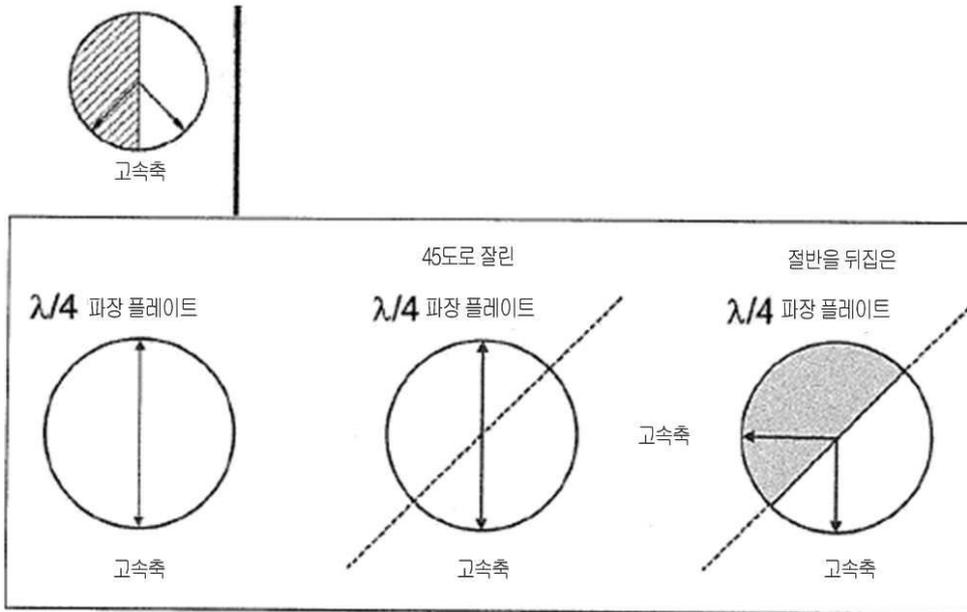
도면25



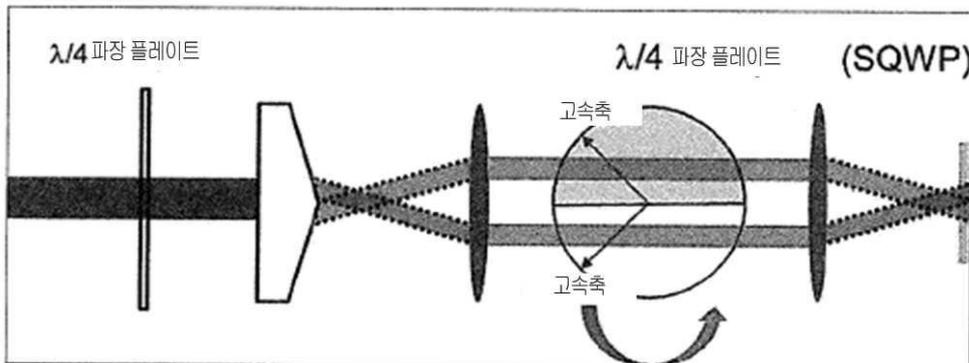
도면26



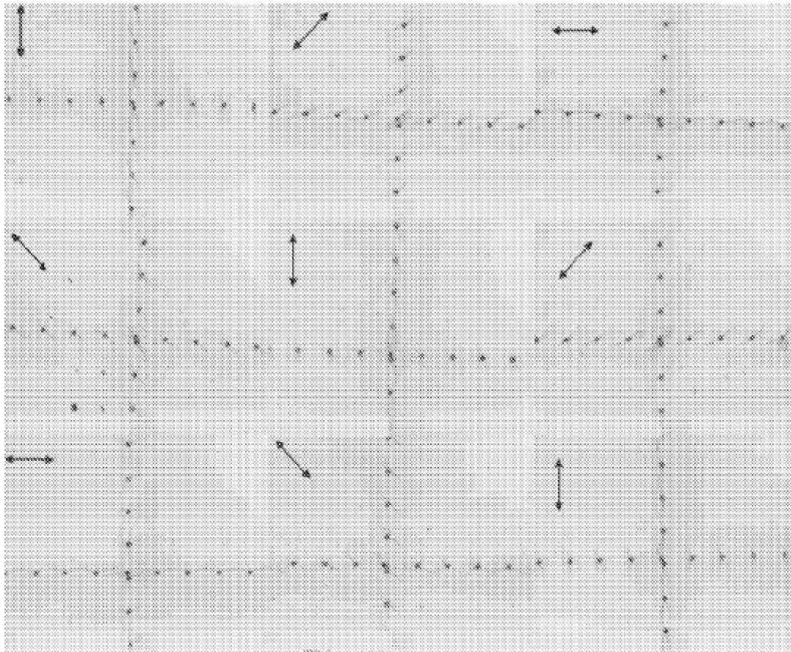
도면27



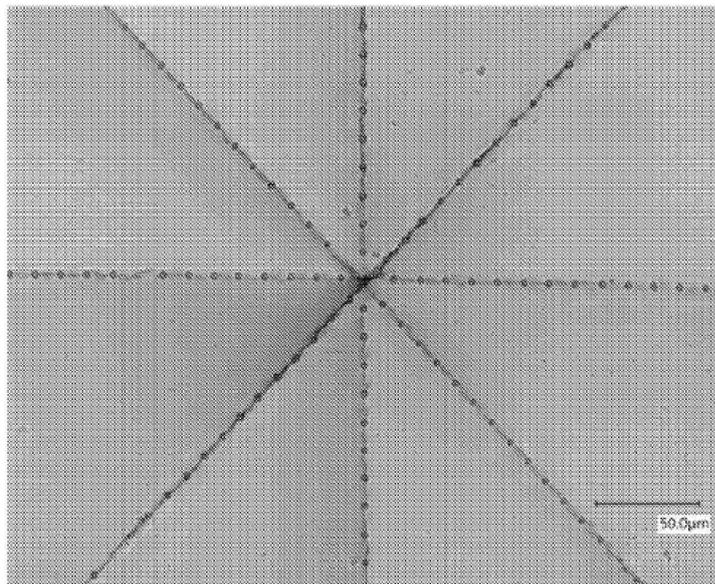
도면28



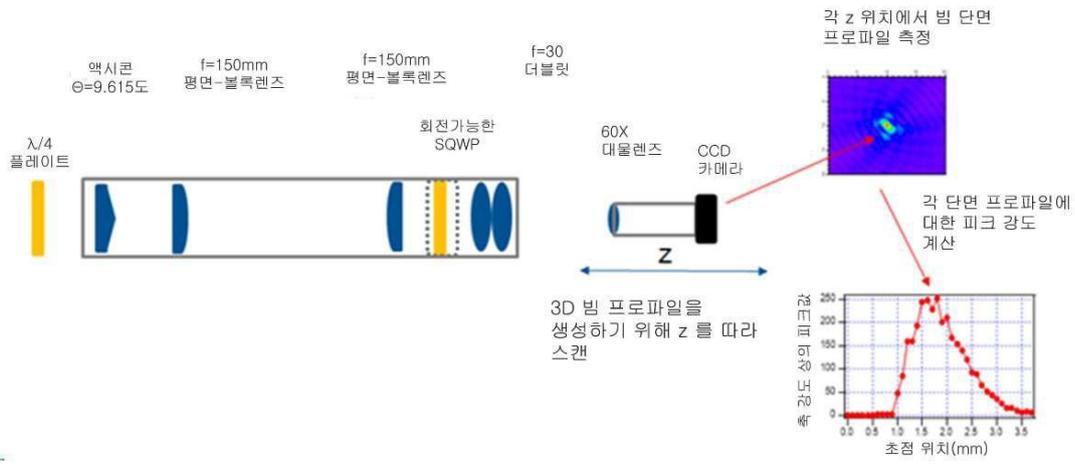
도면29



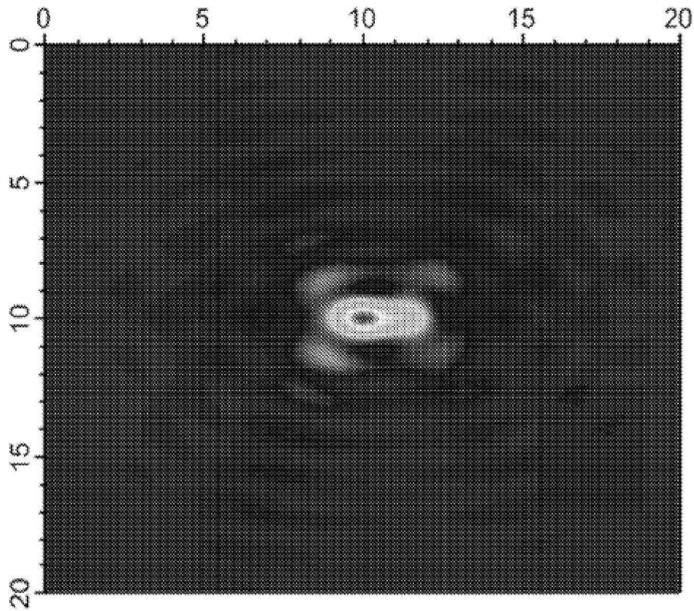
도면30



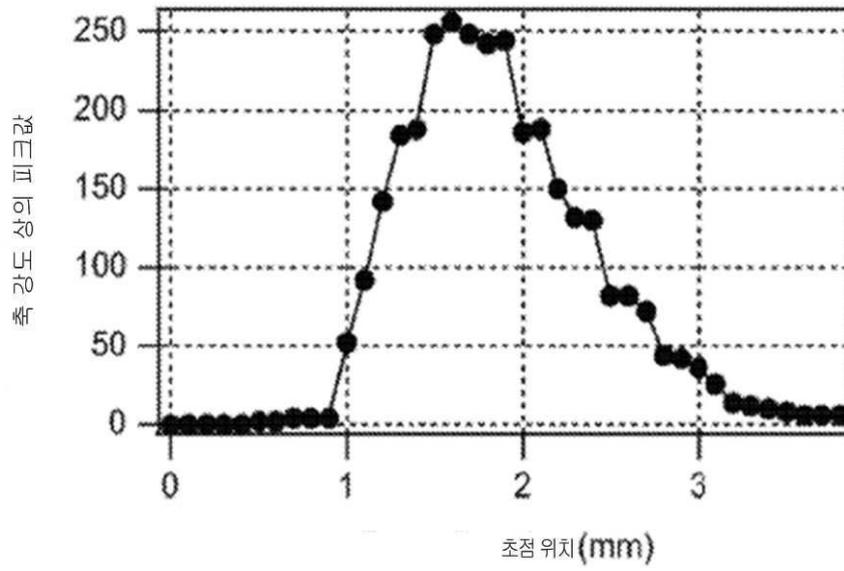
도면31



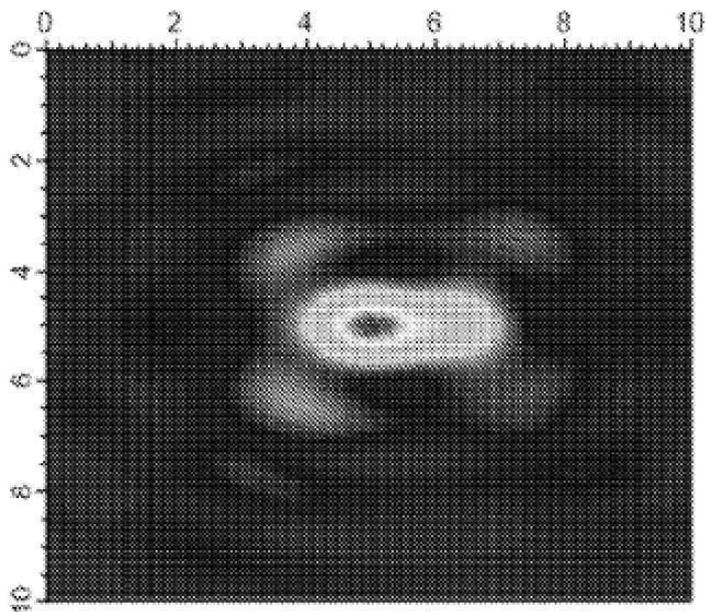
도면32



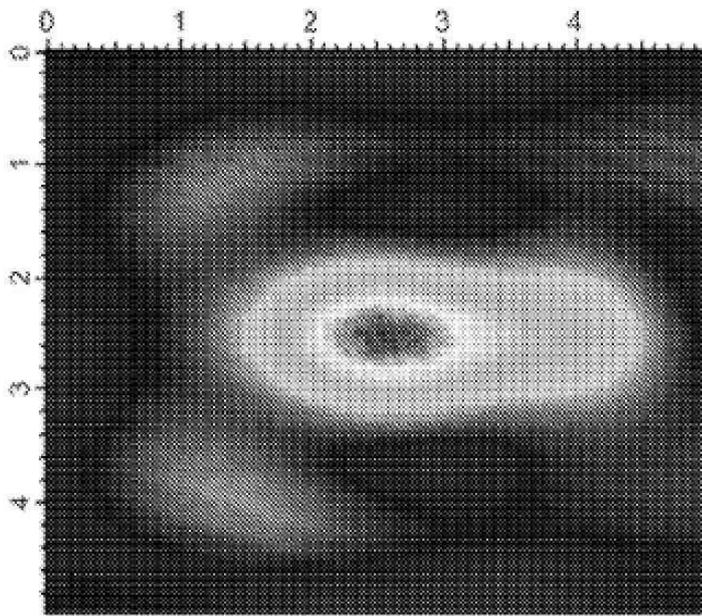
도면33



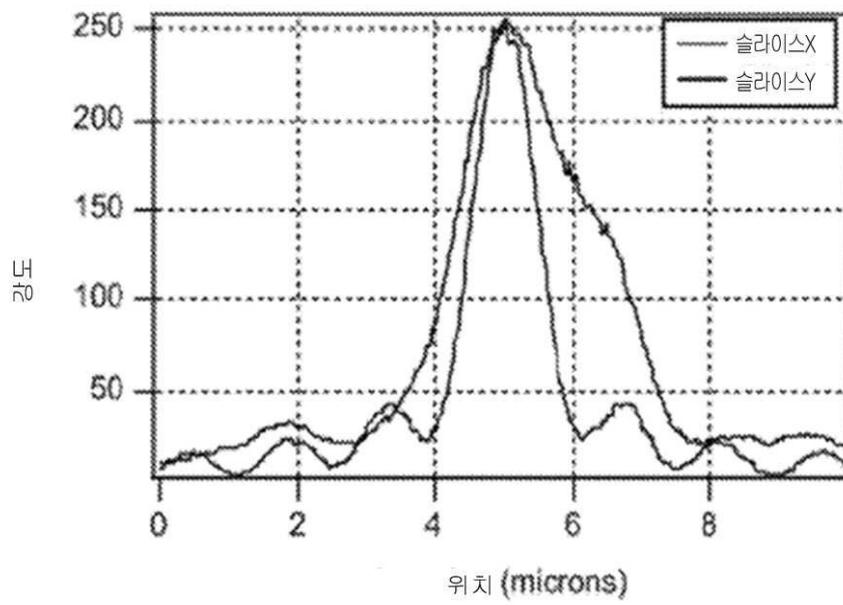
도면34



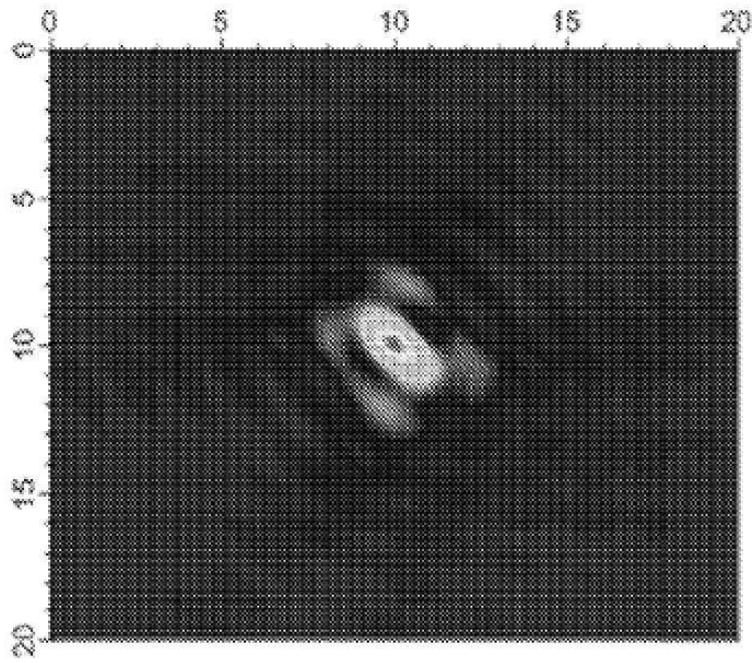
도면35



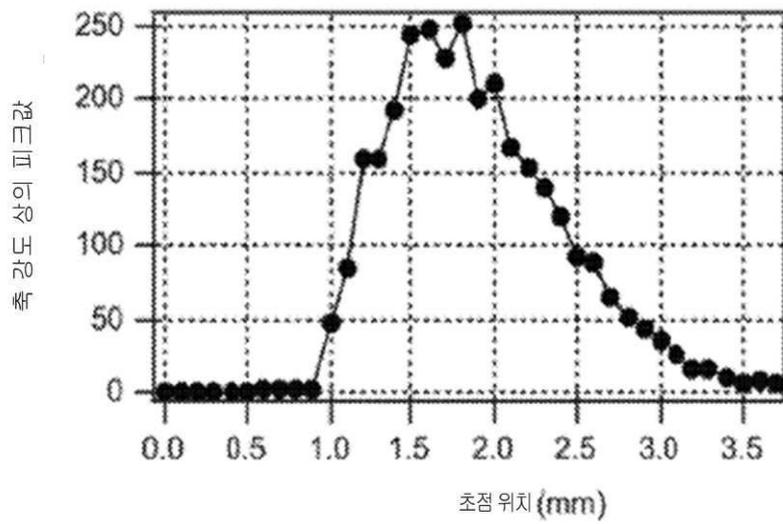
도면36



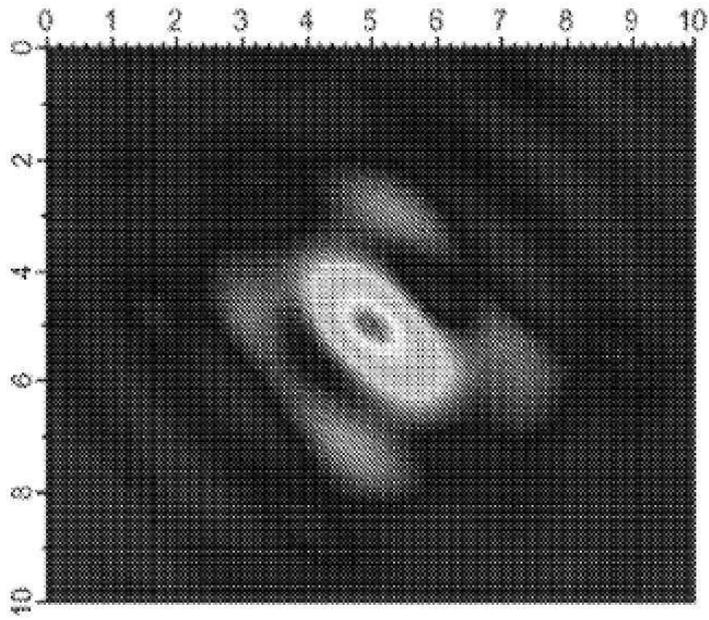
도면37



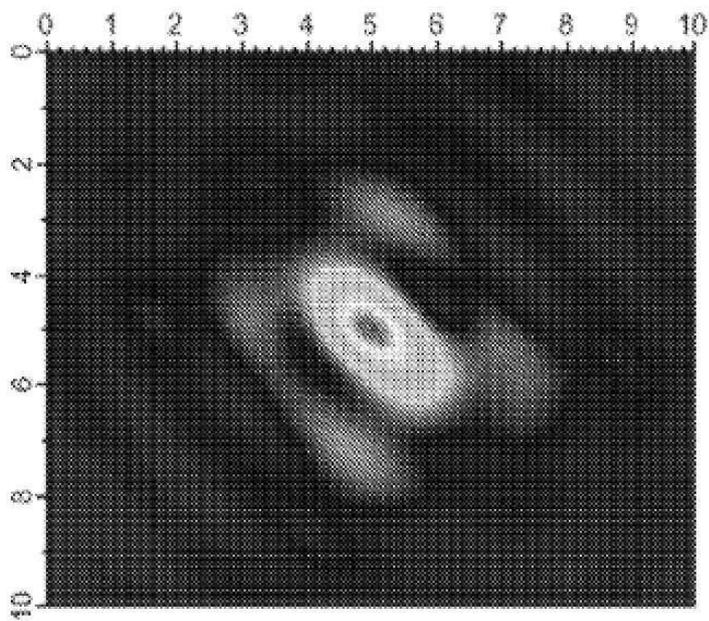
도면38



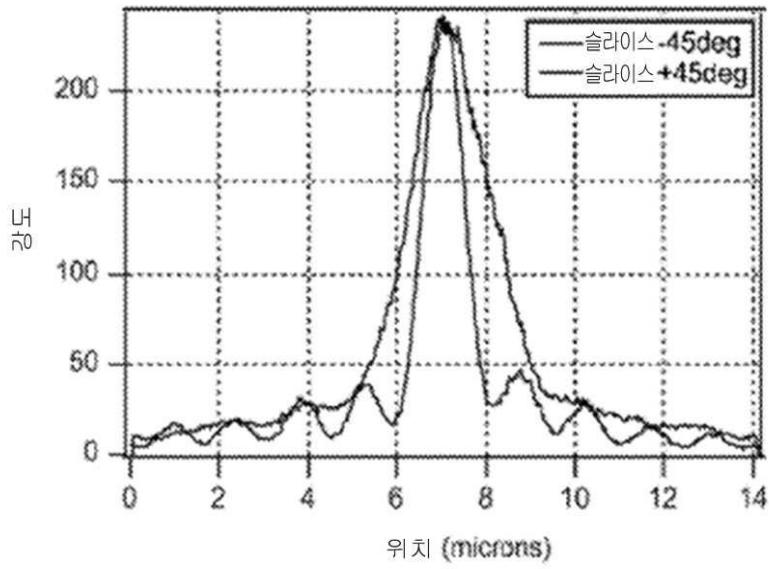
도면39



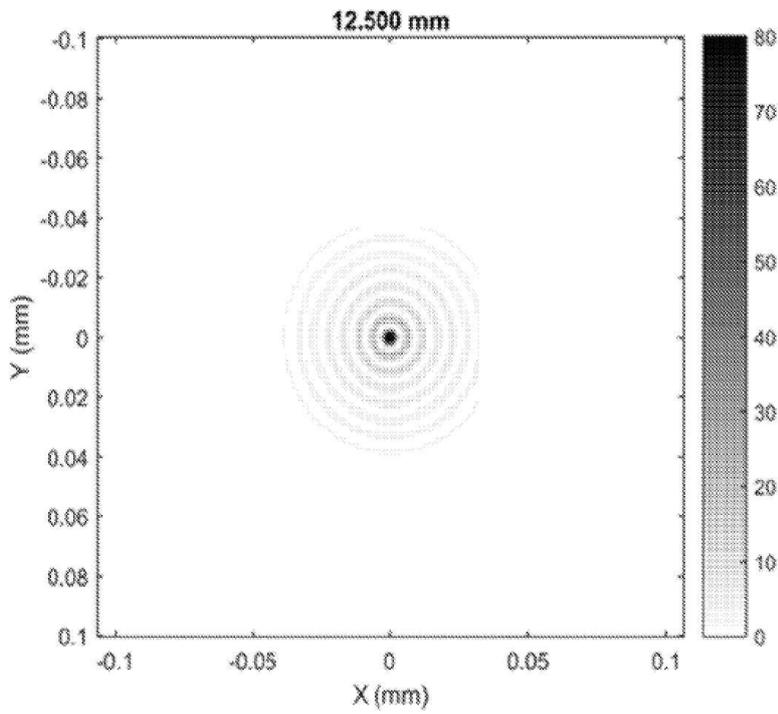
도면40



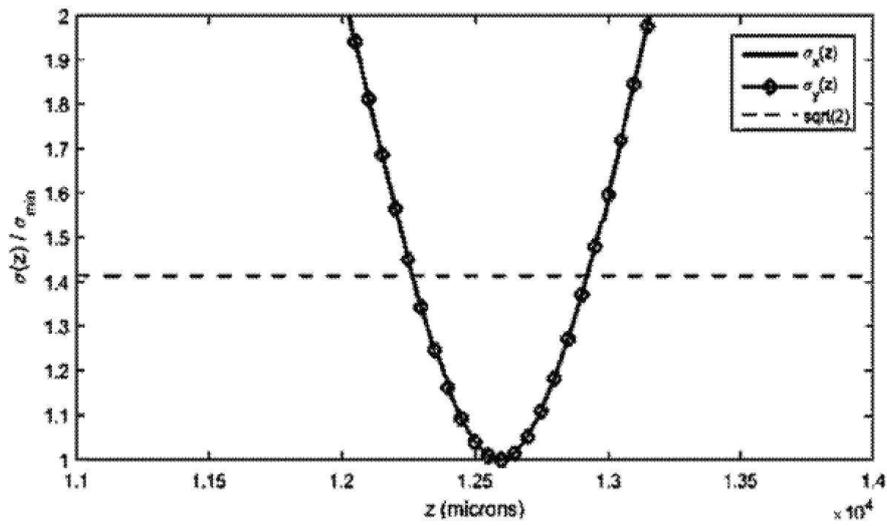
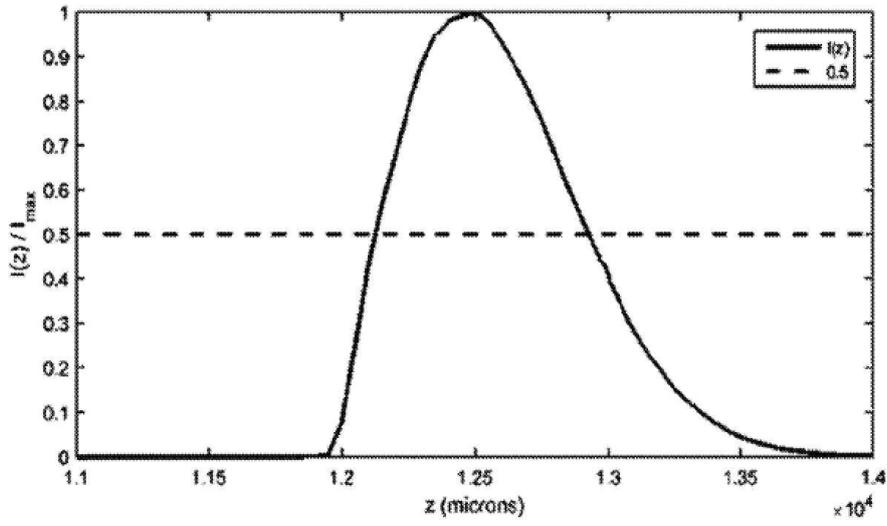
도면41



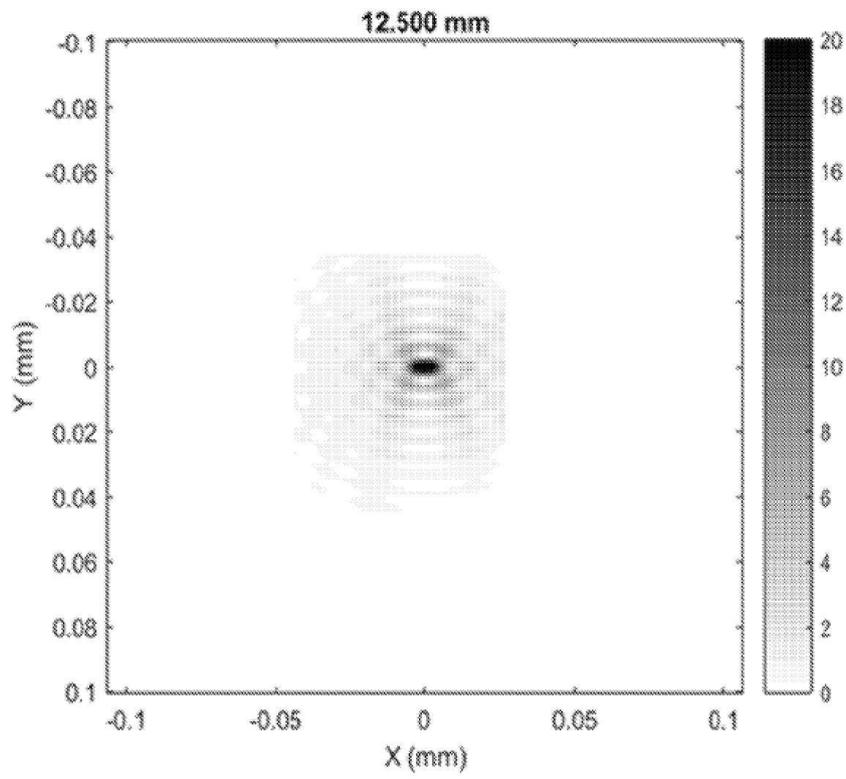
도면42



도면43



도면44



도면45

