



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0060288
(43) 공개일자 2025년05월07일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G02B 21/06 (2006.01) B23K 26/082 (2014.01)
G02B 21/10 (2006.01) G02F 1/365 (2006.01)
H01S 3/067 (2006.01) H01S 3/10 (2023.01)
- (52) CPC특허분류
G02B 21/06 (2013.01)
B23K 26/082 (2015.10)
- (21) 출원번호 10-2025-7011241
- (22) 출원일자(국제) 2023년09월14일
심사청구일자 2025년04월07일
- (85) 번역문제출일자 2025년04월07일
- (86) 국제출원번호 PCT/JP2023/033478
- (87) 국제공개번호 WO 2024/058237
국제공개일자 2024년03월21일
- (30) 우선권주장
JP-P-2022-147880 2022년09월16일 일본(JP)

- (71) 출원인
가부시킴가이사 니콘
일본 도쿄도 시나가와구 니시오이 1초메 5방 20고
- (72) 발명자
도쿠히사 아키라
일본 도쿄도 시나가와구 니시오이 1초메 5방 20고
가부시킴가이사 니콘 나이
- (74) 대리인
특허법인코리아나

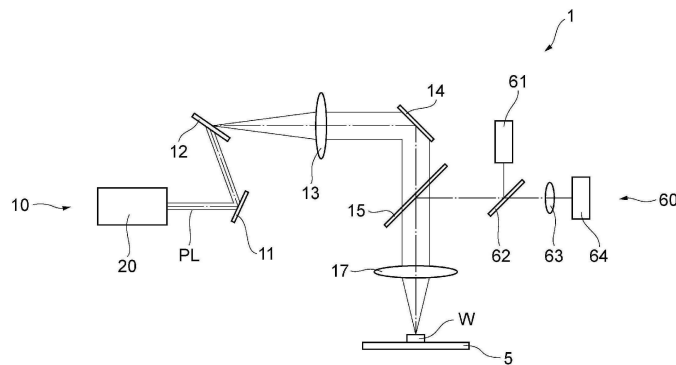
전체 청구항 수 : 총 8 항

(54) 발명의 명칭 광학 장치, 광 가공 장치, 현미경 장치, 및 주사 방법

(57) 요약

광 가공 장치 (1) 의 광학 장치 (10) 가, 펄스광을 증폭시키는 광 파이버 증폭기와, 광 파이버 증폭기로부터 출력된 펄스광 (PL) 을 회절 현상에 의해 분산시키는 회절 격자 (12) 와, 회절 격자 (12) 에 있어서 분산된 펄스광 (PL) 을 평행하게 하는 콜리메이터 렌즈 (13) 와, 콜리메이터 렌즈 (13) 를 통과한 펄스광 (PL) 을 집광하는 대물 렌즈 (17) 를 갖고, 광 파이버 증폭기의 증폭률을 변경함으로써, 시간 포커스가 발생하는 위치를 대물 렌즈 (17) 의 광축 방향으로 변화시킨다.

대표도



(52) CPC특허분류

G02B 21/10 (2013.01)

G02F 1/365 (2013.01)

H01S 3/067 (2019.01)

H01S 3/10 (2019.01)

명세서

청구범위

청구항 1

펄스광을 증폭시키는 증폭기와,
상기 증폭기로부터 출력된 상기 펄스광을 분산시키는 분산 소자와,
상기 분산 소자에 있어서 분산된 상기 펄스광을 집광하는 대물 렌즈를 갖고,
상기 증폭기의 증폭률을 변경하는 것이 가능한 광학 장치.

청구항 2

제 1 항에 있어서,
상기 분산 소자에 있어서 분산된 상기 펄스광을 평행하게 하는 콜리메이터 렌즈를 갖고,
상기 대물 렌즈는, 상기 콜리메이터 렌즈를 투과한 상기 펄스광을 집광하고,
상기 대물 렌즈에 의해 집광되는 상기 펄스광의 펄스 시간폭은, 시간 포커스가 발생함으로써, 상기 분산 소자에 입사할 때의 상기 펄스광의 펄스 시간폭이 되는 광학 장치.

청구항 3

제 1 항 또는 제 2 항에 있어서,
상기 증폭기로부터 출력된 상기 펄스광을 증폭시키는 제 2 증폭기를 갖고,
상기 분산 소자는, 상기 제 2 증폭기로부터 출력된 상기 펄스광을 분산시키고,
상기 제 2 증폭기의 증폭률을 변경하는 것이 가능한 광학 장치.

청구항 4

제 3 항에 있어서,
상기 증폭기의 증폭률을 변경함으로써, 시간 포커스가 발생하는 위치를 상기 대물 렌즈의 광축 방향으로 변화시키고,
상기 제 2 증폭기의 증폭률을 변경함으로써, 상기 제 2 증폭기로부터 출력되는 상기 펄스광의 출력을 일정한 범위 내로 하는 광학 장치.

청구항 5

제 3 항 또는 제 4 항에 있어서,
상기 제 2 증폭기로부터 출력된 상기 펄스광의 펄스 시간폭을 압축하는 압축기를 갖는 광학 장치.

청구항 6

워크에 대해 조사하는 펄스광을 주사하는 광학 장치를 갖고,
상기 광학 장치가 제 1 항 내지 제 5 항 중 어느 한 항에 기재된 광학 장치인 광 가공 장치.

청구항 7

시료에 대해 조사하는 펄스광을 주사하는 광학 장치를 갖고,
상기 광학 장치가 제 1 항 내지 제 5 항 중 어느 한 항에 기재된 광학 장치인 현미경 장치.

청구항 8

증폭기를 사용하여, 펄스광을 증폭시키는 것과,

분산 소자를 사용하여, 상기 증폭기로부터 출력된 상기 펄스광을 분산시키는 것과,

대물 렌즈를 사용하여, 상기 분산 소자에 있어서 분산된 상기 펄스광을 집광하는 것과,

상기 증폭기의 증폭률을 변경함으로써, 상기 대물 렌즈를 사용하여 집광되는 상기 펄스광의 시간 포커스가 발생하는 위치를 상기 대물 렌즈의 광축 방향으로 변화시켜 주사하는 것을 포함하는 주사 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은, 광학 장치, 광 가공 장치, 현미경 장치, 및 주사 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 광 가공 장치나 현미경 장치에는, 펄스광을 출력하는 광학 장치를 구비한 것이 있다. 펄스광을 출력하는 광학 장치를 구비한 현미경 장치의 분해능을 높이기 위해, 시간 포커스 (temporal focus) 라고 칭해지는 기술이 알려져 있다 (예를 들어, 비특허문헌 1 을 참조).

선행기술문헌

비특허문헌

[0003] (비특허문헌 0001) Durst E. 외, Simultaneous spatial and temporal focusing for axial scanning, Optics Express, 2006년, 14, 12243

발명의 내용

[0004] 본 발명에 관련된 광학 장치는, 펄스광을 증폭시키는 증폭기와, 상기 증폭기로부터 출력된 상기 펄스광을 분산시키는 분산 소자와, 상기 분산 소자에 있어서 분산된 상기 펄스광을 집광하는 대물 렌즈를 갖고, 상기 증폭기의 증폭률을 변경하는 것이 가능하다.

[0005] 본 발명에 관련된 광 가공 장치는, 워크에 대해 조사하는 펄스광을 주사하는 광학 장치를 갖고, 상기 광학 장치가 상기 서술한 광학 장치이다.

[0006] 본 발명에 관련된 현미경 장치는, 시료에 대해 조사하는 펄스광을 주사하는 광학 장치를 갖고, 상기 광학 장치가 상기 서술한 광학 장치이다.

[0007] 본 발명에 관련된 주사 방법은, 증폭기를 사용하여, 펄스광을 증폭시키는 것과, 분산 소자를 사용하여, 상기 증폭기로부터 출력된 상기 펄스광을 분산시키는 것과, 대물 렌즈를 사용하여, 상기 분산 소자에 있어서 분산된 상기 펄스광을 집광하는 것과, 상기 증폭기의 증폭률을 변경함으로써, 상기 대물 렌즈를 사용하여 집광되는 상기 펄스광의 시간 포커스가 발생하는 위치를 상기 대물 렌즈의 광축 방향으로 변화시켜 주사하는 것을 포함한다.

도면의 간단한 설명

[0008] 도 1 은, 제 1 실시형태에 관련된 광학 장치를 구비한 광 가공 장치를 나타내는 개요 구성도이다.

도 2 는, 시간 포커스를 이용한 광학계의 일례를 나타내는 모식도이다.

도 3 은, 광 파이버 증폭기로부터 출력되는 펄스광의 펄스 시간폭과, 광 파이버 증폭기의 평균 출력의 관계를 나타내는 그래프이다.

도 4 는, 광 파이버 증폭기로부터 출력되는 펄스광의 스펙트럼폭과, 광 파이버 증폭기의 평균 출력의 관계를 나타내는 그래프이다.

도 5 는, 광 파이버 증폭기로부터 출력되는 펄스광의 처프의 양 (GDD) 과, 광 파이버 증폭기의 평균 출력의 관계를 나타내는 그래프이다.

도 6 은, 광원 유닛의 개요 구성도이다.

도 7 은, 압축기의 평면도이다.

도 8 은, 압축기의 측면도이다.

도 9 는, 광 파이버 증폭기로부터 출력되는 펄스광의 펄스 시간폭의 압축 특성을 나타내는 그래프이다.

도 10 은, 펄스광에 의한 주사 방법의 흐름을 나타내는 플로 차트이다.

도 11 은, 변형예에 관련된 광원 유닛의 개요 구성도이다.

도 12 는, 변형예에 관련된 압축기의 평면도이다.

도 13 은, 변형예에 관련된 광학 장치의 개요 구성도이다.

도 14 는, 변형예에 관련된 광학 장치에 있어서의 펄스광의 펄스 시간폭의 압축 특성을 나타내는 그래프이다.

도 15 는, 제 2 실시형태에 관련된 광학 장치를 구비한 현미경 장치를 나타내는 개요 구성도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0009] 이하, 본 발명에 관련된 바람직한 실시형태에 대해 설명한다. 먼저, 제 1 실시형태에 관련된 광 가공 장치에 대해 도 1 을 참조하여 설명한다. 도 1 에 나타내는 바와 같이, 제 1 실시형태에 관련된 광 가공 장치 (1) 는, 스테이지 (5) 와, 광학 장치 (10) 와, 관찰 유닛 (60) 을 갖는다. 광 가공 장치 (1) 는, 원하는 형상에 따라 작성된 가공 데이터에 기초하여, 제어 장치 (도시 생략) 에 의해 광학 장치 (10) 나 스테이지 (5) 등을 제어함으로써, 가공 대상물인 워크 (W) 를 원하는 형상으로 가공하는 것이 가능하다. 스테이지 (5) 의 상면에, 워크 (W) 가 재치된다. 워크 (W) 의 재료는, 예를 들어, 금속이어도 되고, 수지여도 되고, 유리여도 된다. 또, 스테이지 (5) 는, 스테이지 (5) 의 상면에 재치된 워크 (W) 를 적어도 광 가공 장치 (1) 의 광축과 수직인 방향으로 변위시킬 수 있도록 구성되도록 되어 있다. 스테이지 (5) 를 구동시켜 워크 (W) 의 위치를 조정함으로써, 후술하는 광학 장치 (10) 의 주사폭을 넘는 위치에도 광학 장치 (10) 로부터의 펄스광을 조사할 수 있다.
- [0010] 관찰 유닛 (60) 은, 조명 광원 (61) 과, 하프 미러 (62) 와, 결상 렌즈 (63) 와, 촬상부 (64) 를 갖는다. 또한, 관찰 유닛 (60) 은, 광학 장치 (10) 의 다이크로익 미러 (15) 와, 대물 렌즈 (17) 를 포함한다. 조명 광원 (61) 은, LED (Light Emitting Diode) 등을 사용하여 구성된다. 조명 광원 (61) 은, 가시광의 파장 대역의 조명광을 발광시킨다. 하프 미러 (62) 는, 조명 광원 (61) 으로부터 발광한 조명광의 일부를 다이크로익 미러 (15) 를 향하여 반사시킨다. 하프 미러 (62) 는, 다이크로익 미러 (15) 에서 반사된 워크 (W) 로부터의 광을 결상 렌즈 (63) 를 향하여 투과시킨다. 하프 미러 (62) 의 투과율과 반사율의 비율은, 예를 들어 1 : 1 로 설정된다. 결상 렌즈 (63) 는, 하프 미러 (62) 를 투과한 워크 (W) 로부터의 광을 결상시킨다. 촬상부 (64) 는, CCD (Charge Coupled Device) 나 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 등의 촬상 소자를 사용하여 구성된다. 촬상부 (64) 는, 결상 렌즈 (63) 에 의해 결상된 워크 (W) 의 이미지를 촬상한다.
- [0011] 촬상부 (64) 에 의해 촬상 취득된 워크 (W) 의 화상은, 도시 생략의 표시 장치에 표시된다. 표시 장치에 표시되는 화상을 통하여, 워크 (W) 를 관찰하는 것이 가능하다. 또한, 촬상부 (64) 에 의해 촬상 취득된 워크 (W) 의 화상 데이터에 기초하여, 제어 장치 (도시 생략) 에 의한 광학 장치 (10) 나 스테이지 (5) 의 제어량을 보정하도록 하여도 된다.
- [0012] 다음으로, 광학 장치 (10) 에 대해 설명한다. 광학 장치 (10) 는, 워크 (W) 에 대해 펄스광 (PL) 을 집광한다. 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭은, 예를 들어, 펨토초 (fs) 오더의 시간폭이다. 이와 같은 펄스광 (PL) 은, 초단 펄스광이라고도 칭해지지만, 이후의 설명에 있어서 간단히 「펄스광」이라고 칭한다. 광 가공 장치 (1) 나 후술하는 현미경 장치 (201) 의 광축 방향의 분해능을 높이기 위해, 시간 포커스라고 칭해지는 기술이 사용된다. 이후의 설명에 있어서, 시간 포커스라고 칭해지는 기술을 간단히 「시간 포커스」라고 칭하는 경우가 있다. 또, 광학 장치 (10) 를 구비한 광 가공 장치 (1) (또는 현미경 장치 (101)) 의 광축 방향을 z 방향이라고 칭하고, 광축과 수직인 방향을 x 방향 및 y 방향이라고 칭하는 경우가 있다. 예를 들어, 도 2, 도 7, 도 8, 도 11 의 각 화살표로 나타내는 방향을 각각, x 방향, y 방향, z 방향이라고 칭한다.
- [0013] 여기서, 물체면 (예를 들어, 워크 (W) 의 피가공면) 에 대해 펄스광을 집광하는 경우에 대해 생각한다. 펄

스광의 집광 반경을 w 로 하고, 펄스광의 파수를 k 로 하고, 펄스광의 파장을 λ 로 한다. 이 때, 펄스광의 빔 직경이 대략 일정해지는 z 방향의 범위, 즉 컨포컬 길이는 $kw^2 = 2\pi w^2/\lambda$ 로 나타낸다. 펄스광의 집광 반경 (w) 을 작게 하면, 컨포컬 길이가 짧아져, 광 가공 장치의 광축 방향 (z 방향) 에 있어서의 분해능이 높아진다. 예를 들어, 펄스광의 파장 λ 를 $1 \mu\text{m}$ 로 하고, 펄스광의 집광 반경 (w) 을 $1 \mu\text{m}$ 정도로 좁히면, 펄스광의 광 강도가 높은 영역 (즉, 컨포컬 길이) 은, z 방향에 있어서 $6 \mu\text{m}$ 정도의 한정된 영역이 된다. 만일, 펄스광의 집광 반경 (w) 을 $50 \mu\text{m}$ 정도로 넓히면, 컨포컬 길이가 약 16mm 가 되어, 광 가공 장치의 광축 방향 (z 방향) 에 있어서의 분해능이 낮아진다.

[0014] 펄스광의 집광 반경 (w) 을 넓혀도, 광축 방향 (z 방향) 에 있어서의 분해능을 높게 하는 것이 가능한 시간 포커스라고 칭해지는 기술이 제안되어 있다. 시간 포커스를 이용한 광학계의 일례를 도 2 에 나타낸다. 도 2 에 있어서, 회절 격자 (510) 는, 광원 유닛 (도시 생략) 으로부터 사출된 펄스광 (PL) 을 회절 현상에 의해 분산시킨다. 회절 격자 (510) 에 있어서 분산된 펄스광 (PL) 은, 콜리메이터 렌즈 (520) 에 입사한다. 콜리메이터 렌즈 (520) 를 투과한 펄스광 (PL) 은, 평행하게 되어 대물 렌즈 (530) 에 입사한다. 대물 렌즈 (530) 를 투과한 펄스광 (PL) 은, 대물 렌즈 (530) 의 초점에 배치된 물체면 (OB) 에 집광된다. 또한, 이후의 설명에서는, 특별히 언급하지 않는 한 물체면 (OB) 이 피가공면인 것으로 한다.

[0015] 또한, 회절 격자 (510) 와 물체면 (OB) 은 서로 공액이다. 회절 격자 (510) 에 있어서 분산된 펄스광 (PL) 이 콜리메이터 렌즈 (520) 를 향함에 따라, 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭이 확대된다. 그리고, 펄스광 (PL) 이 콜리메이터 렌즈 (520) 및 대물 렌즈 (530) 를 투과하여 회절 격자 (510) 와 공액인 물체면 (OB) 에 도달하면, 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭이 축소되고, 회절 격자 (510) 에 입사할 때의 원래의 펄스 시간폭이 재현된다. 이와 같은 현상을 시간 포커스라고 칭한다. 물체면 (OB) 으로부터 z 방향으로 떨어진 위치에서는, 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭이 상대적으로 커지기 때문에, 펄스광 (PL) 의 피크 파워가 저하되며, 펄스광 (PL) 에 의한 가공 효율이 저하된다. 그 결과, 광 가공 장치의 광축 방향 (z 방향) 에 있어서의 분해능을 높이는 것이 가능해진다.

[0016] 도 2 에 예시되는 시간 포커스를 이용한 광학계에 있어서, 물체면 (OB) 의 근방에 있어서의 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭은, 근사적으로 다음 식 (1) 로 나타낸다.

수학식 1

$$\tau(z) = \tau_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad \dots(1)$$

[0017]

[0018] 여기서, τ_0 은, 펄스광 (PL) 이 푸리에 한계 펄스 (Transform Limited Pulse) 인 경우, 요컨대 처프가 없고, GDD (Group Delay Dispersion) =0 인 경우의 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭을 나타낸다. 여기에서는, 회절 격자 (510) 에 푸리에 한계 펄스의 펄스광 (PL) 이 입사된다고 가정하고 있다. 또, z_R 은, 근사적으로 다음 식 (2) 로 나타낸다.

수학식 2

$$z_R \approx \frac{2f^2}{k_0 \alpha^2 \Omega^2} \quad \dots(2)$$

[0019]

[0020] 여기서, f 는, 대물 렌즈 (530) 의 초점 거리를 나타낸다. k_0 은, 회절 격자 (510) 에 있어서 분산된 펄스광 (PL) 의 스펙트럼에 있어서의 중심 주파수에서의 파수를 나타낸다. 펄스광 (PL) 의 스펙트럼 중 주파수 ω 의 단색파의 대물 렌즈 (530) 에 대한 입사 위치에서의 x 방향의 좌표는, $x = \alpha \omega$ 로 나타낸다. 또한, 주파수 ω 에 대해서는, 펄스광 (PL) 의 스펙트럼에 있어서의 중심 주파수가 영 (0) 이 되도록 오프셋되어 있다. α 는, 회절 격자 (510) 의 분산 (또는, 선밀도, 입사각), 콜리메이터 렌즈 (520) 의 초점 거리 (f_c) 등에 의해 결정되는 계수이다. Ω 는, 펄스광 (PL) 의 스펙트럼에 있어서의 최대 주파수이다. 펄스광

(PL)의 대물 렌즈 (530)에 대한 입사 위치에서의 x 방향의 폭 (즉, 회절 격자 (510)에 있어서 분산된 펄스광 (PL)의 분산 방향의 폭)은, 대략 $2a\Omega$ 가 된다. 여기에서는, 펄스광 (PL)의 스펙트럼에 있어서의 단색 광의 직경 (s) (도 2를 참조)에 대하여, $s \ll a\Omega$ 라고 가정하고 있다.

[0021] 또, $z = 0$ 의 위치는, 회절 격자 (510)와 공역인 위치에 대응한다. 식 (1)로부터 알 수 있는 바와 같이, $z = 0$ 이 되면, 펄스광 (PL)의 펄스 시간폭이 최소가 되고, $z > z_R$ 이 되면, 펄스광 (PL)의 펄스 시간폭의 확대가 현저해진다. 따라서, $z > z_R$ 이 되면, 펄스광 (PL)의 펄스 시간폭이 확대되어 펄스광 (PL)의 피크 파워가 저하되는 점에서, 광 가공 장치의 광축 방향 (z 방향)에 있어서의 분해능은, z_R 의 정도라고 할 수 있다. 예를 들어, $f = 10 \text{ mm}$, $a\Omega = 3 \text{ mm}$, $\lambda = 1 \mu\text{m}$ 의 경우, z_R 이 $3 \mu\text{m}$ 정도가 된다. 즉 만일, 펄스광의 집광 반경 (w)을 $50 \mu\text{m}$ 정도로 하였다고 해도, 시간 포커스의 효과에 의해, 광 가공 장치의 z 방향에 있어서의 분해능이 μm 오더가 된다. 이와 같이, 시간 포커스의 효과에 의해, 펄스광의 집광 반경을 넓혀도, 광 가공 장치의 광축 방향 (z 방향)에 있어서의 분해능이 높아지기 때문에, 워크에 대해 제거 가공 등의 미세 가공을 실시하는 것이 가능해진다. 또한, 워크의 재료가 투명한 수지나 유리인 경우, 시간 포커스의 효과에 의해, 워크의 내부에 대해 미세 가공을 실시하는 것이 가능해진다. $z = 0$ 의 위치에 있어서의 펄스광의 피크 파워를, 워크에 대한 가공이 가능한 가공 임계값 부근으로 설정함으로써, 광 가공 장치의 광축 방향에 있어서의 분해능 (가공 분해능)을 보다 높이는 것이 가능해진다.

[0022] 시간 포커스가 발생하는 z 방향의 위치는, 펄스광 (PL)을 처프시킴으로써 (주파수를 시간과 함께 변화시킴으로써) 변경할 수 있다. 처프의 양은, 최저차에 있어서는 GDD (fs^2 혹은 ps^2)를 사용하여 나타낸다. 처프의 양 β 와, 시간 포커스가 발생하는 z 방향의 위치의 변화 Δz 의 관계는, 근사적으로 다음 식 (3)으로 나타낸다.

수학식 3

$$\Delta z \approx \beta \Omega^2 z_R \quad \dots (3)$$

[0023]

[0024] 여기서, $\beta = \text{GDD}/2$ 이다. 예를 들어, $\beta = 10000 \text{ fs}^2$ ($\text{GDD} = 20000 \text{ fs}^2$), $z_R \sim 10 \mu\text{m}$, $\Omega \sim 0.033 \text{ rad/fs}$ ($\sim 70 \text{ fs}$ 의 펄스광에 대응)의 경우, $\Delta z \sim 110 \mu\text{m}$ 가 된다.

[0025]

푸리에 한계 펄스의 펄스광을 처프시키려면, 석영 등의 초재에 통과시키는 방법이나, 프리즘 페어나 회절 격자 쌍 (그레이팅 페어)을 사용하는 방법 등이 있다. 프리즘 페어를 이용하는 경우, 프리즘 사이의 간격, 혹은 광로로의 프리즘의 삽입의 정도를 변경함으로써, 펄스광의 GDD를 바꿀 수 있다. 회절 격자쌍 (그레이팅 페어)을 이용하는 경우, 회절 격자 사이의 간격을 변경함으로써, 펄스광의 GDD를 바꿀 수 있다. 문헌 「Durst E. 외, Simultaneous spatial and temporal focusing for axial scanning, Optics Express, 2006년, 14, 12243」에서는, 프리즘 페어를 조정함으로써, GDD를 11000 fs^2 정도 변화시킴으로써, 시간 포커스가 발생하는 위치를 $140 \mu\text{m}$ 변화시키는 것이 가능한 것을 실험적으로 나타내고 있다. 이 방법에서는, 기계적으로 프리즘의 위치를 변경하기 때문에, 시간 포커스가 발생하는 위치를 변화시키는 데에 시간이 걸린다. 본 실시형태에서는, 광 파이버 증폭기를 사용한 광원 유닛과, 시간 포커스를 이용한 광학계를 조합하여, 시간 포커스가 발생하는 위치를 고속으로 변화시킨다.

[0026]

광 파이버 증폭기는, $1 \text{ m} \sim$ 수십 m 정도의 길이를 갖는 광 파이버로 구성된다. 광 파이버의 코어 직경은, 수 $\mu\text{m} \sim$ 수십 μm 정도이다. 이와 같이 장적이고 코어 직경이 작은 광 파이버를 사용하므로, 광 파이버 증폭기에 있어서의 분산, 비선형성 모두 크다. 펄스광을 광 파이버 증폭기로 증폭시킬 때, 광 파이버 증폭기로부터 출력되는 펄스광의 펄스 시간폭 및 스펙트럼폭은, 광 파이버 증폭기의 증폭률에 따라서 변화된다. 펄스광의 처프 (GDD)는, 대략 「펄스 시간폭/스펙트럼폭 (ps/nm)」에 비례한다. 또한, ps/nm 와 ps^2 의 사이에는, 예를 들어 중심 파장 $1.06 \mu\text{m}$ 의 펄스광에 대하여, $\text{ps}/\text{nm} = -1.68 \text{ ps}^2$ 의 관계가 있다. 광 파이버 증폭기의 증폭률의 변화에 대한 펄스광의 펄스 시간폭의 변화의 방법과, 광 파이버 증폭기의 증폭률의 변화에 대한 펄스광의 스펙트럼폭의 변화의 방법은, 일반적으로는 상이하다. 따라서, 광 파이버 증폭기의 증폭률에 따라, 펄스광의 처프 (GDD)가 변화하는 것이 기대된다.

- [0027] 도 3 에, 광 파이버 증폭기로부터 출력되는 펄스광의 펄스 시간폭과, 광 파이버 증폭기의 평균 출력의 관계를 나타낸다. 도 4 에, 광 파이버 증폭기로부터 출력되는 펄스광의 스펙트럼폭과, 광 파이버 증폭기의 평균 출력의 관계를 나타낸다. 도 3 및 도 4 에 나타내는 그래프에 있어서, 광 파이버 증폭기에 대한 입력으로서, 주기 = 350 fs, 파장=1.56 μm 의 펄스광을 사용하고 있다. 광 파이버 증폭기로서, 길이 ~ 16 m, 모드 필드 직경 (Mode Field Diameter : MFD) ~ 5 μm , 정상 분산의 에르븀 첨가 광 파이버 증폭기 (Erbium Doped Fiber Amplifier : EDFA) 를 사용하고 있다. 광 파이버 증폭기의 평균 출력은, 펄스광의 펄스 에너지 (1 펄스당의 에너지) 에 비례한다. 도 3 및 도 4 로부터, 광 파이버 증폭기의 평균 출력, 즉 펄스 에너지를 증가시켰을 때의 펄스 시간폭의 증가 비율에 대하여, 펄스 에너지를 증가시켰을 때의 스펙트럼폭의 증가 비율이 큰 것을 알 수 있다.
- [0028] 도 5 에, 도 3 및 도 4 로부터 구해진, 광 파이버 증폭기로부터 출력되는 펄스광의 처프의 양 (GDD) 과, 광 파이버 증폭기의 평균 출력의 관계를 나타낸다. 도 5 는, 광 파이버 증폭기의 평균 출력, 즉 펄스 에너지의 변화에 따라, 광 파이버 증폭기로부터 출력되는 펄스광의 처프의 양 (GDD) 이 $0.17 \sim 0.2 \text{ ps}^2$ ($170000 \sim 200000 \text{ fs}^2$) 의 범위에서 변화하는 것을 나타낸다.
- [0029] 도 1 에 나타내는 바와 같이, 제 1 실시형태에 관련된 광학 장치 (10) 는, 광원 유닛 (20) 과, 제 1 미러 (11) 와, 회절 격자 (12) 와, 콜리메이터 렌즈 (13) 와, 제 2 미러 (14) 와, 다이크로익 미러 (15) 와, 대물 렌즈 (17) 를 갖는다. 광원 유닛 (20) 은, 예를 들어, 1 μm 의 파장 대역의 펄스광 (PL) 을 사출한다. 제 1 미러 (11) 는, 광원 유닛 (20) 으로부터 사출된 펄스광 (PL) 을 회절 격자 (12) 를 향하여 반사시킨다. 회절 격자 (12) 는, 제 1 미러 (11) 에서 반사된 펄스광 (PL) 을 회절 현상에 의해 분산시킨다. 콜리메이터 렌즈 (13) 는, 회절 격자 (12) 에 있어서 분산된 펄스광 (PL) 을 평행하게 한다.
- [0030] 제 2 미러 (14) 는, 콜리메이터 렌즈 (13) 를 투과한 펄스광 (PL) 을 다이크로익 미러 (15) 를 향하여 반사시킨다. 또한, 제 2 미러 (14) 대신에, 콜리메이터 렌즈 (13) 를 투과한 펄스광 (PL) 을 다이크로익 미러 (15) 를 향하여 반사시키는 갈바노 미러 (도시 생략) 가 형성되어도 된다. 갈바노 미러는, 반사면의 방향을 변화시킴으로써, 펄스광 (PL) 의 진행 방향을 변화시키는 것이 가능하다. 갈바노 미러에 의해 펄스광 (PL) 의 진행 방향을 변화시킴으로써, 워크 (W) 에 있어서의 대물 렌즈 (17) 의 광축과 수직인 평면 (피가공면) 에 있어서 주사를 실시하는 것이 가능하다. 갈바노 미러는, 대물 렌즈 (17) 의 동공의 위치 또는 동공과 공액인 위치에 형성되는 것이 바람직하다.
- [0031] 다이크로익 미러 (15) 는, 다이크로익 미러 (15) 에 입사한 펄스광 (PL) 을 대물 렌즈 (17) 를 향하여 투과시킨다. 또, 다이크로익 미러 (15) 는, 다이크로익 미러 (15) 에 입사한 관찰 유닛 (60) (하프 미러 (62)) 으로부터의 조명광을 대물 렌즈 (17) 를 향하여 반사시킨다. 다이크로익 미러 (15) 는, 대물 렌즈 (17) 를 통하여 다이크로익 미러 (15) 에 입사한 워크 (W) 로부터의 광 (가시광) 을 관찰 유닛 (60) (하프 미러 (62)) 을 향하여 반사시킨다.
- [0032] 대물 렌즈 (17) 는, 다이크로익 미러 (15) 를 투과한 펄스광 (PL) 을 워크 (W) 에 대해 집광한다. 또한, 회절 격자 (12) 와 워크 (W) (피가공면) 는 서로 공액이다. 또한, 대물 렌즈 (17) 는, 다이크로익 미러 (15) 에서 반사된 조명광을 워크 (W) 에 조사한다. 대물 렌즈 (17) 에는, 조명광이 조사된 워크 (W) 로부터의 광이 입사한다. 대물 렌즈 (17) 에 입사한 워크 (W) 로부터의 광 (가시광) 은, 대물 렌즈 (17) 를 투과하여 다이크로익 미러 (15) 에서 반사된다.
- [0033] 다음으로, 광원 유닛 (20) 에 대해 도 6 ~ 도 8 을 참조하여 설명한다. 도 6 에 나타내는 바와 같이, 광원 유닛 (20) 은, 오실레이터 (22) 와, 제 1 광 아이솔레이터 (23) 와, 제 2 광 아이솔레이터 (24) 와, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 와, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 와, 콜리메이터 렌즈 (29) 와, 압축기 (31) 를 갖는다. 오실레이터 (22) 는, 모드 록 파이버 레이저를 이용하여 구성된다. 오실레이터 (22) 는, 펄스 시간폭이 100 fs \sim 1 ps 정도의 푸리에 한계 펄스인 펄스광을 발생시킨다. 제 1 광 아이솔레이터 (23) 는, 오실레이터 (22) 와 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 사이에 형성된다. 제 2 광 아이솔레이터 (24) 는, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 와 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 사이에 형성된다. 제 1 광 아이솔레이터 (23) 및 제 2 광 아이솔레이터 (24) 는, 순방향으로 진행되는 펄스광만을 투과시키고, 역방향으로 진행되는 광을 차단한다.
- [0034] 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 는, 정상 분산의 에르븀 첨가 광 파이버 증폭기 (EDFA) 를 사용하여 구성된다. 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 는, 정상 분산의 이테르븀 첨가 광 파이버 증폭기 (Ytterbium Doped Fiber Amplifier : YDFA) 를 사용하여 구성되어도 된다. 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 에는, 제 1 펌프 LD (레이

저 다이오드) (27) 가 형성된다. 제 1 펌프 LD (27) 는, 여기광 (펌프광이라고도 칭해진다) 을 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 에 입사시킨다. 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 는, 제 1 펌프 LD (27) 로부터 입사하는 여기광을 이용하여, 오실레이터 (22) 로부터 발생한 펄스광을 증폭시킨다. 제 1 펌프 LD (27) 의 여기 전류를 변경함으로써, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 의 증폭률 (즉, 출력) 을 변경하는 것이 가능하다. 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 는, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 보다 장척이고, 코어 직경이 작은 광 파이버 증폭기이다. 이로써, 분산, 비선형성이 상대적으로 큰 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 에 의해, 펄스광의 처프의 특성 (GDD) 을 결정한다.

[0035] 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 는, 에르븀 첨가 광 파이버 증폭기 (EDFA) 를 사용하여 구성된다. 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 는, 이테르븀 첨가 광 파이버 증폭기 (YDFA) 를 사용하여 구성되어도 된다. 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 에는, 제 2 펌프 LD (레이저 다이오드) (28) 가 형성된다. 제 2 펌프 LD (28) 는, 여기광 (펌프광이라고도 칭해진다) 을 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 에 입사시킨다. 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 는, 제 2 펌프 LD (28) 로부터 입사하는 여기광을 이용하여, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 로부터 출력된 펄스광을 증폭시킨다. 제 2 펌프 LD (28) 의 여기 전류를 변경함으로써, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 의 증폭률 (즉, 출력) 을 변경하는 것이 가능하다. 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 는, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 보다 단척이고, 코어 직경이 큰 광 파이버 증폭기이다. 이로써, 분산, 비선형성이 상대적으로 작은 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 에 의해, 출력 (펄스광의 펄스 에너지) 을 결정한다.

[0036] 증폭기로서, 분산, 비선형성이 상대적으로 큰 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 와, 분산, 비선형성이 상대적으로 작은 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 를 사용함으로써, 증폭기 (제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26)) 로부터 출력되는 펄스광의 처프의 양 (GDD) 을 변화시키면서, 펄스광의 펄스 에너지의 변동을 작게 할 수 있다. 또한, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 대신에, 제 2 증폭기로서 고체 앰프가 형성되어도 된다. 더욱 큰 펄스 에너지가 필요한 경우에는, 제 2 증폭기의 후에 제 3 증폭기를 형성해도 된다. 또한, 펄스광의 처프의 양 (GDD) 의 변화에 수반하는 펄스 에너지의 변동을 허용할 수 있는 경우에는, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 를 생략해도 된다. 그 경우, 이후의 설명에 있어서, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 의 출력을 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 의 출력으로 바꿔 읽으면 된다.

[0037] 콜리메이터 렌즈 (29) 는, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 로부터 출력된 펄스광을 평행하게 한다. 압축기 (31) 는, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 로부터 출력되어 콜리메이터 렌즈 (29) 를 투과한 펄스광의 펄스 시간폭을 압축하고, 푸리에 한계 펄스인 펄스광 (PL) 을 사출한다.

[0038] 예를 들어 도 7 및 도 8 에 나타내는 바와 같이, 압축기 (31) 는, 출력용 미러 (32) 와, 제 1 회절 격자 (33) 와 제 2 회절 격자 (34) 의 회절 격자쌍과, 루프 미러 (35) 를 갖는다. 콜리메이터 렌즈 (29) 를 투과한 펄스광은, 출력용 미러 (32) 로부터 광축과 수직인 -y 방향으로 떨어진 위치를 통과한다. 출력용 미러 (32) 를 통과한 펄스광은, 제 1 회절 격자 (33) 와 제 2 회절 격자 (34) 에 의해 공간적으로 분산된다. 제 1 회절 격자 (33) 와 제 2 회절 격자 (34) 에서 분산된 펄스광은, 루프 미러 (35) 에서 반사되어, 제 2 회절 격자 (34) 와 제 1 회절 격자 (33) 의 순서로 되돌아간다. 제 2 회절 격자 (34) 와 제 1 회절 격자 (33) 의 순서로 되돌아간 펄스광은, 루프 미러 (35) 에 의해 +y 방향으로 오프셋하고 있기 때문에, 출력용 미러 (32) 에서 반사되어 외부 (제 1 미러 (11)) 로 사출된다. 이와 같은 압축기 (31) 는, 부의 분산 (GDD < 0) 을 갖고 있지만, 제 1 회절 격자 (33) 와 제 2 회절 격자 (34) 의 간격을 변경함으로써, 압축기 (31) 의 분산을 변화시킬 수 있다.

[0039] 도 9 에, 도 6 에 나타내는 2 단 구성의 증폭기 (제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26)) 로부터 출력되는 펄스광의 펄스 시간폭의 압축 특성을 나타낸다. 도 9 에 나타내는 그래프의 가로축은, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 의 후에 배치된 회절 격자쌍을 갖는 압축기 (31) 의 분산량 ($ps^2 = 10^6 fs^2$), 세로축은 펄스광의 펄스 시간폭 (fs) 을 나타낸다. 도 9 에 나타내는 그래프의 ▲ 표시는, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 에 있어서의 제 1 펌프 LD (27) 의 여기 전류가 600 mA 인 경우의 압축 특성을 나타낸다. 도 9 에 나타내는 그래프의 ■ 표시는, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 에 있어서의 제 1 펌프 LD (27) 의 여기 전류가 1000 mA 인 경우의 압축 특성을 나타낸다. 또한, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 에 있어서의 제 1 펌프 LD (27) 의 여기 전류가 600 mA, 1000 mA 중 어느 경우도, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 에 있어서의 제 2 펌프 LD (28) 의 여기 전류는 일정하다. 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 에 있어서의 제 1 펌프 LD (27) 의 여기 전류가 600 mA 일 때, 최소의 펄스 시간폭을 얻기 위한 압축기 (31) 의 분산량은 $-0.163 ps^2$, 즉 펄스광의 처프의 양 (GDD) 은 $+0.163 ps^2$ 였다. 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 에 있어서의 제 1 펌프 LD

(27)의 여기 전류가 1000 mA 일 때, 최소의 펄스 시간폭을 얻기 위한 압축기 (31)의 분산량은 -0.148 ps^2 , 즉 펄스광의 처프의 양 (GDD)은 $+0.148 \text{ ps}^2$ 였다. 이로써, 제 1 광 파이버 증폭기 (25)에 있어서의 제 1 펌프 LD (27)의 여기 전류를 600 mA ~ 1000 mA의 범위에서 변화시킴으로써, 2 단 구성의 증폭기 (제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26))로부터 출력되는 펄스광의 처프의 양 (GDD)을 $0.015 \text{ ps}^2 = 15000 \text{ fs}^2$ 만큼 변화시키는 것이 가능함을 알 수 있다.

[0040] 또한, 제 1 광 파이버 증폭기 (25)에 있어서의 제 1 펌프 LD (27)의 여기 전류가 600 mA 일 때, 제 2 광 파이버 증폭기 (26)의 출력이 477 mW였다. 제 1 광 파이버 증폭기 (25)에 있어서의 제 1 펌프 LD (27)의 여기 전류가 1000 mA 일 때, 제 2 광 파이버 증폭기 (26)의 출력이 537 mW였다. 이 실험에서는, 제 2 광 파이버 증폭기 (26)에 있어서의 제 2 펌프 LD (28)의 여기 전류를 일정하게 하고 있으므로, 제 2 광 파이버 증폭기 (26)의 출력은 약간 변동하고 있지만, 제 2 펌프 LD (28)의 여기 전류를 조정함으로써, 제 2 광 파이버 증폭기 (26)의 출력을 일정한 범위로 유지하는 것도 가능하다. 또한, 제 1 광 파이버 증폭기 (25)에 있어서의 제 1 펌프 LD (27)의 여기 전류가 600 mA, 1000 mA 중 어느 경우라도, 펄스광의 최소의 펄스 시간폭이 거의 동일 ($\sim 115 \text{ fs}$)하다. 이상으로부터, 도 6에 나타내는 2 단 구성의 증폭기 (제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26))에 따르면, 펄스광의 펄스 에너지 및 압축 후의 최소의 펄스 시간폭을 대략 일정하게 유지하면서, 펄스광의 처프의 양 (GDD)만을 변화시키는 것이 가능하다.

[0041] 또한, 도 6에 나타내는 2 단 구성의 증폭기 (제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26))의 예에서는, $\Delta \text{GDD} \sim 15000 \text{ fs}^2$, $\Omega \sim 0.02 \text{ rad/fs}$ ($\sim 115 \text{ fs}$ 의 펄스광에 대응)이기 때문에, 전술한 식 (3)으로부터, $\Delta z \sim 3 \times z_R$ 이 된다. z_R 은, 전술한 식 (2)에서 설명한 바와 같이, 회절 격자 (12)의 분산 (또는, 선밀도, 입사각), 콜리메이터 렌즈 (13)의 초점 거리 f_c 등에 의해 결정되는 계수 α 나, 대물 렌즈 (17)의 초점 거리 f 등을 사용하여 설정된다. 만일 $z_R = 10 \mu\text{m}$ 로 설정하면, 시간 포커스가 발생하는 z 방향의 위치의 변화 Δz 는 $30 \mu\text{m}$ 가 된다. 즉 상기의 예에서는, 제 1 펌프 LD (27)의 여기 전류를 600 mA와 1000 mA 사이에서 변조함으로써, 시간 포커스가 발생하는 위치를 광축 방향 (z 방향)으로 $30 \mu\text{m}$ 변화시켜 주사하는 것이 가능해진다.

[0042] 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26)가 에르븀 첨가 광 파이버 증폭기 (EDFA) 또는 이 테르븀 첨가 광 파이버 증폭기 (YDFA)인 경우, 코어 직경이나 여기 상태에 따라서도 상이한데, 제 1 펌프 LD (27) 및 제 2 펌프 LD (28)의 여기광 (펌프광)의 변조에 대한 이득의 응답 (즉, 여기 전류의 변조에 대한 이득의 응답)은, $\sim 10 \text{ kHz}$ 까지 존재하는 경우가 많다. 요컨대, $\sim 10 \text{ kHz}$ 의 고속으로, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26)의 이득을 변화시키는 것이 가능하다. 상기 서술한 실험 결과에 기초하면, 펄스광의 처프의 양 (GDD)을 $\sim 10 \text{ kHz}$ 정도에서 변화시키는 것이 가능한 것을 의미한다. 이 방법에 의하면, 프리즘의 위치를 변경하는 등의 기계적인 방법과 비교하여, 펄스광의 처프의 양 (GDD)을 간이하게 고속으로 변화시키는 것이 가능하다. 이와 같이, 제 1 펌프 LD (27) 및 제 2 펌프 LD (28)의 여기 전류를 고속으로 변조시킴으로써, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26)의 이득 (증폭률)을 고속으로 변화시키는 것이 가능하기 때문에, 펄스광의 처프의 양 (GDD)을 고속으로 변화시킬 수 있어, 시간 포커스가 발생하는 위치를 고속으로 변화시켜 광축 방향 (z 방향)의 주사를 고속으로 실시하는 것이 가능하다.

[0043] 다음으로, 이상과 같이 구성되는 광 가공 장치 (1)의 광학 장치 (10)를 사용한, 펄스광에 의한 주사 방법에 대해 설명한다. 도 10은, 펄스광에 의한 주사 방법의 흐름을 나타내는 플로 차트이다. 먼저, 광원 유닛 (20)의 오실레이터 (22)에 의해 펄스광을 발생시킨다 (스텝 ST1). 이 때, 오실레이터 (22)는, 푸리에 한계 펄스인 펄스광을 발생시킨다.

[0044] 다음으로, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26)에 의해 펄스광을 증폭시킨다 (스텝 ST2). 오실레이터 (22)로부터 발생한 펄스광은, 제 1 광 아이솔레이터 (23)를 투과하여, 제 1 광 파이버 증폭기 (25)에 입사한다. 제 1 광 파이버 증폭기 (25)는, 오실레이터 (22)로부터 발생한 펄스광을 증폭시킨다. 제 1 광 파이버 증폭기 (25)로부터 출력된 펄스광은, 제 2 광 아이솔레이터 (24)를 투과하여, 제 2 광 파이버 증폭기 (26)에 입사한다. 제 2 광 파이버 증폭기 (26)는, 제 1 광 파이버 증폭기 (25)로부터 출력된 펄스광을 증폭시킨다. 제 2 광 파이버 증폭기 (26)로부터 출력된 펄스광은, 콜리메이터 렌즈 (29)를 투과하여 평행이 되고, 압축기 (31)에 입사한다. 압축기 (31)는, 콜리메이터 렌즈 (29)를 투과한 펄스광의 펄스 시간폭을 압축하고, 푸리에 한계 펄스인 펄스광 (PL)을 사출한다.

- [0045] 다음으로, 회절 격자 (12) 에 의해 펄스광을 분산시킨다 (스텝 ST3). 광원 유닛 (20) 의 압축기 (31) 로부터 사출된 펄스광 (PL) 은, 제 1 미러 (11) 에서 반사되어 회절 격자 (12) 에 입사한다. 회절 격자 (12) 는, 제 1 미러 (11) 에서 반사된 펄스광 (PL) 을 회절 현상에 의해 분산시킨다. 회절 격자 (12) 에 있어서 분산된 펄스광 (PL) 은, 콜리메이터 렌즈 (13) 를 투과하여 평행이 되고, 제 2 미러 (14) 에 입사한다. 이 때, 회절 격자 (12) 와 콜리메이터 렌즈 (13) 에 의해, 시간 포커스에 필요한, 펄스광 (PL) 의 공간적인 처프를 발생시킨다.
- [0046] 다음으로, 대물 렌즈 (17) 에 의해 펄스광을 집광한다 (스텝 ST4). 제 2 미러 (14) 에서 반사된 펄스광 (PL) 은, 다이크로익 미러 (15) 를 투과하여 대물 렌즈 (17) 에 입사한다. 대물 렌즈 (17) 는, 다이크로익 미러 (15) 를 투과한 펄스광 (PL) 을 워크 (W) 에 대해 집광한다. 이 때, 시간 포커스의 효과에 의해 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭이 축소되고, 워크 (W) 의 피가공면에 있어서 회절 격자 (12) 에 입사할 때의 원래의 펄스 시간폭이 재현된다. 예를 들어, 펄스광 (PL) 의 집광 반경 (w) 을 50 μm 정도로 하였다고 해도, 시간 포커스의 효과에 의해, 광 가공 장치 (1) 의 광축 방향 (z 방향) 에 있어서의 분해능을 높게 할 수 있고, 워크 (W) 에 대해 제거 가공 등의 미세 가공을 실시하는 것이 가능해진다. 또한, 워크 (W) 의 재료가 투명한 수지나 유리인 경우, 시간 포커스의 효과에 의해, 워크 (W) 의 내부에 대해 미세 가공을 실시하는 것이 가능해진다. 또한, 상기 서술한 바와 같이, 대물 렌즈 (17) 에 의해 집광되는 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭은, 시간 포커스가 발생함으로써, 회절 격자 (12) 에 입사할 때의 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭이 된다. 이것은 대물 렌즈 (17) 에 의해 집광되는 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭이, 회절 격자 (12) 에 입사할 때의 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭과 (완전히) 동일해질 뿐만 아니라, 회절 격자 (12) 에 입사할 때의 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭과 대략 동일해지는 경우도 포함한다.
- [0047] 그리고, 시간 포커스가 발생하는 위치를 대물 렌즈 (17) 의 광축 방향으로 변화시켜 주사를 실시한다 (스텝 ST5). 이 때, 제 1 펌프 LD (27) 및 제 2 펌프 LD (28) 의 여기 전류를 변조시킴으로써, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 의 증폭률을 변화시킨다. 이로써, 펄스광 (PL) 의 처프의 양 (GDD) 을 변화시키고, 시간 포커스가 발생하는 위치를 대물 렌즈 (17) 의 광축 방향으로 변화시켜 광축 방향 (z 방향) 의 주사를 실시한다. 또한, 워크 (W) 에 대해 광학 장치 (10) 로부터의 펄스광 (PL) 이 연속적으로 조사되는 상태에서는, 상기 서술한 펄스광을 발생시키는 스텝 (ST1), 펄스광을 증폭시키는 스텝 (ST2), 펄스광을 분산시키는 스텝 (ST3), 펄스광을 집광하는 스텝 (ST4), 및 주사를 실시하는 스텝 (ST5) 은, 각각 병행하여 실시된다.
- [0048] 제 1 실시형태에 따르면, 광 가공 장치 (1) 의 광학 장치 (10) 가, 펄스광을 증폭시키는 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 와, 펄스광을 분산시키는 회절 격자 (12) 와, 회절 격자 (12) 에 있어서 분산된 펄스광을 집광하는 대물 렌즈 (17) 를 갖고, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 의 증폭률을 각각 독립적으로 변경하는 것이 가능하다. 또한, 대물 렌즈 (17) 에 의해 집광되는 펄스광의 펄스 시간폭은, 시간 포커스가 발생함으로써, 회절 격자 (12) 에 입사할 때의 펄스광의 펄스 시간폭이 된다. 전술한 바와 같이, 제 1 펌프 LD (27) 의 여기 전류를 고속으로 변조시킴으로써, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 의 증폭률을 고속으로 변화시키는 것이 가능하기 때문에, 펄스광의 처프의 양 (GDD) 을 고속으로 변화시킬 수 있어, 시간 포커스가 발생하는 위치 (z 방향의 위치) 를 고속으로 변화시켜 광축 방향의 주사를 고속으로 실시하는 것이 가능해진다. 또, 시간 포커스의 효과에 의해, 광 가공 장치 (1) 의 광축 방향 (z 방향) 에 있어서의 분해능이 높아지기 때문에, 시간 포커스가 발생하는 위치 (z 방향의 위치) 를 고속으로 변화시킴으로써, 워크 (W) 에 대해 제거 가공 등의 미세 가공을 고속으로 실시하는 것이 가능해진다. 또한, 제 2 펌프 LD (28) 의 여기 전류를 적절하게 제어함으로써 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 의 증폭률을 조정하고, 펄스광의 처프의 양 (GDD) 을 변화시키면서, 펄스광의 출력의 변화를 일정한 범위 내로 억제하는 것이 가능해진다.
- [0049] 또, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 의 입력측 혹은 출력측에 음향 광학 소자 (AOM) 등의 광량 조정기를 설치하여 펄스광의 펄스 에너지를 제어해도 된다. 이것에 의해, 펄스광의 처프의 양 (GDD) 을 변화시키면서, 펄스광의 펄스 에너지의 변동을 작게 할 수 있다.
- [0050] 또한, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 로부터 출력된 펄스광의 펄스 시간폭을 압축하는 압축기 (31) 가 형성되어도 된다. 이것에 의해, 푸리에 한계 펄스인 펄스광을 얻을 수 있다.
- [0051] 상기 서술한 제 1 실시형태에 있어서, 오실레이터 (22) 가 형성되어 있지만, 이것에 한정되는 것은 아니다. 예를 들어, 오실레이터 (22) 를 형성하지 않고, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 가, 광 가공 장치 (1) 의 외부에 형성된 펄스광 발생기로부터의 펄스광을 증폭시키도록 해도 된다. 이 경우, 상기 서술한 펄스광을 발생시키

는 스텝 (ST1) 을 생략할 수 있다.

- [0052] 상기 서술한 제 1 실시형태에 있어서, 펄스광을 회절 현상에 의해 분산시키는 회절 격자 (12) 가 형성되어 있지만, 이것에 한정되는 것은 아니다. 펄스광을 분산시키는 분산 소자로서, 회절 격자 (12) 대신에 프리즘 등이 형성되어도 된다. 또한, 분산 소자에 의해 펄스광을 분산시키는 것은, 펄스광의 파장에 따라 펄스광의 광로를 공간적으로 분리하는 것을 의미한다.
- [0053] 상기 서술한 제 1 실시형태에 있어서, 제 1 펌프 LD (27) 및 제 2 펌프 LD (28) 의 여기 전류를 변조시킴으로써, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 의 증폭률을 변경하고 있지만, 이것에 한정되는 것은 아니다. 예를 들어, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 의 입력측에 형성한 음향 광학 소자 (AOM) 등에 의해 입력 펄스광의 광량을 제어함으로써, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 의 증폭률을 실효적으로 변경하고, 펄스광의 처프의 양 (GDD) 을 변화시켜도 된다. 또한, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 의 입력측, 혹은 출력측에 형성한 음향 광학 소자 (AOM) 등에 의해 펄스광의 광량을 제어함으로써, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 의 증폭률을 실효적으로 변경하여, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 의 출력을 일정한 범위로 유지하도록 하여도 된다.
- [0054] 상기 서술한 제 1 실시형태에 있어서, 광원 유닛 (20) 은, 2 단 구성의 증폭기 (제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26)) 를 갖고 있지만, 이것에 한정되는 것은 아니고, 증폭기를 1 개만 가져도 된다. 예를 들어 도 11 에 나타내는 바와 같이, 광원 유닛 (70) 이, 오실레이터 (22) 와, 광 아이솔레이터 (73) 와, 광 파이버 증폭기 (75) 와, 콜리메이터 렌즈 (29) 와, 압축기 (31) 를 가져도 된다. 또한, 광 아이솔레이터 (73) 는, 제 1 실시형태에 관련된 제 1 광 아이솔레이터 (23) 와 마찬가지로 구성된다. 광 파이버 증폭기 (75) 는, 제 1 실시형태에 관련된 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 와 마찬가지로 구성된다. 또한, 콜리메이터 렌즈 (29) 는, 광 파이버 증폭기 (75) 로부터 출력된 펄스광을 평행하게 한다. 광 파이버 증폭기 (75) 에는, 펌프 LD (77) 가 형성된다. 펌프 LD (77) 는, 제 1 실시형태에 관련된 제 1 펌프 LD (27) 와 마찬가지로 구성되고, 펌프 LD (77) 의 여기 전류를 변경함으로써, 광 파이버 증폭기 (75) 의 증폭률 (즉, 출력) 을 변경하는 것이 가능하다. 또, 오실레이터 (22) 를 형성하지 않고, 광 파이버 증폭기 (75) 가, 광 가공 장치의 외부에 형성된 펄스광 발생기로부터의 펄스광을 증폭시키도록 해도 된다.
- [0055] 상기 서술한 제 1 실시형태에 있어서, 압축기 (31) 가 회절 격자쌍 (그레이팅 페어) 을 사용하여 구성되어 있지만, 이것에 한정되는 것은 아니고, 프리즘 페어를 사용하여 구성되어도 된다. 예를 들어 도 12 에 나타내는 바와 같이, 압축기 (131) 가, 출력용 미러 (32) 와, 제 1 프리즘 (133) 과 제 2 프리즘 (134) 의 프리즘 페어와, 루프 미러 (35) 를 가져도 된다. 콜리메이터 렌즈 (29) 를 통과한 펄스광은, 출력용 미러 (32) 로부터 광축과 수직인 -y 방향으로 떨어진 위치를 통과한다. 출력용 미러 (32) 를 통과한 펄스광은, 제 1 프리즘 (133) 과 제 2 프리즘 (134) 에 의해 공간적으로 분산된다. 제 1 프리즘 (133) 과 제 2 프리즘 (134) 에서 분산된 펄스광은, 루프 미러 (35) 에서 반사되어, 제 2 프리즘 (134) 과 제 1 프리즘 (133) 의 순서로 되돌아간다. 제 2 프리즘 (134) 과 제 1 프리즘 (133) 의 순서로 되돌아간 펄스광은, 루프 미러 (35) 에 의해 +y 방향으로 오프셋하고 있기 때문에, 출력용 미러 (32) 에서 반사되어 외부 (제 1 미러 (11)) 로 사출된다. 이와 같은 압축기 (131) 는, 부의 분산 (GDD < 0) 을 갖고 있지만, 제 1 프리즘 (133) 과 제 2 프리즘 (134) 의 간격을 변경함으로써, 압축기 (131) 의 분산을 변화시킬 수 있다.
- [0056] 상기 서술한 제 1 실시형태에 있어서, 압축기 (31) 가 광원 유닛 (20) 에 형성되어 있지만, 이것에 한정되는 것은 아니고, 압축기가 광원 유닛에 형성되어 있지 않아도 된다. 예를 들어 도 13 에 나타내는 바와 같이, 변형예에 관련된 광학 장치 (110) 는, 광원 유닛 (120) 과, 제 1 회절 격자 (111) 와 제 2 회절 격자 (112) 의 회절 격자쌍과, 미러 (114) 와, 대물 렌즈 (117) 를 갖는다. 광원 유닛 (120) 은, 오실레이터 (122) 와, 광 아이솔레이터 (123) 와, 광 파이버 증폭기 (125) 와, 콜리메이터 렌즈 (129) 를 갖는다.
- [0057] 오실레이터 (122) 는, 모드 록 파이버 레이저를 이용하여 구성된다. 오실레이터 (122) 는, 펄스 시간폭이 100 fs ~ 1 ps 정도의 푸리에 한계 펄스인 펄스광을 발생시킨다. 광 아이솔레이터 (123) 는, 오실레이터 (122) 와 광 파이버 증폭기 (125) 사이에 형성된다. 광 아이솔레이터 (123) 는, 순방향으로 진행하는 펄스광만을 투과시키고, 역방향으로 진행하는 광을 차단한다.
- [0058] 광 파이버 증폭기 (125) 는, 정상 분산의 에르븀 첨가 광 파이버 증폭기 (EDFA) 를 사용하여 구성된다. 광 파이버 증폭기 (125) 는, 정상 분산의 이테르븀 첨가 광 파이버 증폭기 (YDFA) 를 사용하여 구성되어도 된다. 광 파이버 증폭기 (125) 에는, 펌프 LD (레이저 다이오드) (127) 가 형성된다. 펌프 LD (127) 는, 여기 광 (펌프광) 을 광 파이버 증폭기 (125) 에 입사시킨다. 광 파이버 증폭기 (125) 는, 펌프 LD (127) 로부터

입사하는 여기광을 이용하여, 오실레이터 (122) 로부터 발생한 펄스광을 증폭시킨다. 펌프 LD (127) 의 여기 전류를 변경함으로써, 광 파이버 증폭기 (125) 의 증폭률 (즉, 출력) 을 변경하는 것이 가능하다. 콜리메이터 렌즈 (129) 는, 광 파이버 증폭기 (125) 로부터 출력된 펄스광을 평행하게 한다. 또한, 광 파이버 증폭기는, 전술한 제 1 실시형태에 관련된 2 단 구성의 증폭기 (제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26)) 여도 된다. 또, 오실레이터 (122) 를 형성하지 않고, 광 파이버 증폭기가, 광 가공 장치의 외부에 형성된 펄스광 발생기로부터의 펄스광을 증폭시키도록 해도 된다.

[0059] 광원 유닛 (120) 은, 광 파이버 증폭기 (125) 를 통하여, 정의 처프를 갖는 펄스광 (PL) 을 사출한다. 광원 유닛 (120) 으로부터 사출된 펄스광 (PL) 의 GDD 를 D_p 라 하면, $D_p > 0$ 이다. 광원 유닛 (120) 으로부터 사출된 펄스광 (PL) 은, 제 1 회절 격자 (111) 와 제 2 회절 격자 (112) 에 의해 공간적으로 분산된다. 제 1 회절 격자 (111) 와 제 2 회절 격자 (112) 의 회절 격자쌍에 있어서의 분산을 D_g 로 한다. 이 때, $D_g = -D_p$ 가 되도록, 제 1 회절 격자 (111) 와 제 2 회절 격자 (112) 의 간격을 조정한다. 제 1 회절 격자 (111) 와 제 2 회절 격자 (112) 의 회절 격자쌍을 통과한 펄스광 (PL) 에는, 공간적인 처프 (spatial chirp) 가 발생한다. 당해 회절 격자쌍을 통과한 펄스광 (PL) 은, 공간적으로 주파수 성분이 분리되어 있으므로, 펄스광 (PL) 의 GDD 가 0 (즉, $D_p + D_g = 0$) 이지만, 푸리에 한계 펄스의 펄스 시간폭으로는 되지 않는다. 통상적인 회절 격자쌍을 갖는 압축기에서는, 펄스광이 회절 격자쌍을 2 회 통과 (double pass) 하기 때문에, 공간적인 처프가 발생하지 않고, 푸리에 한계 펄스의 펄스 시간폭이 얻어진다.

[0060] 제 1 회절 격자 (111) 와 제 2 회절 격자 (112) 의 회절 격자쌍을 통과한 펄스광 (PL) 은, 미러 (114) 에서 반사되고, 대물 렌즈 (117) 에 의해 워크 (W) 에 대해 집광된다. 또한, 미러 (114) 와 대물 렌즈 (117) 사이에, 상기 서술한 제 1 실시형태에 관련된 다이크로익 미러 (도시 생략) 가 형성되어도 된다. 회절 격자쌍 (제 1 회절 격자 (111) 와 제 2 회절 격자 (112)) 을 통과하여 공간적인 처프가 발생한 펄스광 (PL) 을 대물 렌즈 (117) 에 의해 집광함으로써, 시간 포커스의 효과가 얻어진다. 요컨대, 대물 렌즈 (117) 를 투과한 직후의 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭이 최대이고, 워크 (W) (대물 렌즈 (117) 의 초점면) 에 근접함에 따라 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭이 작아지고, 워크 (W) 의 피가공면 (대물 렌즈 (117) 의 초점면) 에 있어서 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭이 최소가 된다.

[0061] 변형예에 관련된 광학 장치 (110) 에서는, 제 1 회절 격자 (111) 와 제 2 회절 격자 (112) 의 회절 격자쌍이, 광원 유닛 (120) 으로부터 사출된 펄스광 (PL) 의 GDD 를 제거함과 함께, 광원 유닛 (120) 으로부터 사출된 펄스광 (PL) 에 시간 포커스에 필요한 공간적인 처프를 부여하고 있다고도 할 수 있다. 이로써, 상기 서술한 제 1 실시형태와 마찬가지로, 펌프 LD (127) 의 여기 전류를 고속으로 변조시킴으로써, 파이버 증폭기 (125) 의 증폭률을 고속으로 변화시키는 것이 가능하기 때문에, 펄스광의 처프의 양 (GDD) 을 고속으로 변화시킬 수 있어, 시간 포커스가 발생하는 위치 (z 방향의 위치) 를 고속으로 변화시키는 것이 가능해진다. 또, 시간 포커스의 효과에 의해, 광 가공 장치의 광축 방향 (z 방향) 에 있어서의 분해능이 높아지기 때문에, 시간 포커스가 발생하는 위치 (z 방향의 위치) 를 고속으로 변화시킴으로써, 워크 (W) 에 대해 제거 가공 등의 미세 가공을 고분해능 또한 고속으로 실시하는 것이 가능해진다.

[0062] 도 14 에, 변형예에 관련된 광학 장치 (110) 의 광 파이버 증폭기 (125) 로부터 출력되는 펄스광의 펄스 시간폭의 압축 특성을 나타낸다. 도 14 에 나타내는 그래프의 가로축은, 광 파이버 증폭기 (125) 의 후에 배치된 회절 격자쌍 (제 1 회절 격자 (111) 와 제 2 회절 격자 (112)) 의 압축기로서의 분산량 (fs^2), 세로축은 펄스광의 펄스 시간폭 (fs) 을 나타낸다. 단, 도 14 의 압축 특성을 실험적으로 취득했을 때에는, 압축기를 더블 패스의 구성으로 하고 있다. 도 14 에 나타내는 그래프의 ◆ 표시는, 광 파이버 증폭기 (125) 에 있어서의 펌프 LD (127) 의 여기 전류가 1.0 A 인 경우의 압축 특성을 나타낸다. 도 14 에 나타내는 그래프의 ■ 표시는, 광 파이버 증폭기 (125) 에 있어서의 펌프 LD (127) 의 여기 전류가 2.8 A 인 경우의 압축 특성을 나타낸다. 도 14 에 나타내는 그래프의 ▲ 표시는, 광 파이버 증폭기 (125) 에 있어서의 펌프 LD (127) 의 여기 전류가 5.0 A 인 경우의 압축 특성을 나타낸다.

[0063] 광 파이버 증폭기 (125) 에 있어서의 펌프 LD (127) 의 여기 전류가 1.0 A 일 때, 광 파이버 증폭기 (125) 의 출력이 122 mW 였다. 광 파이버 증폭기 (125) 에 있어서의 펌프 LD (127) 의 여기 전류가 2.8 A 일 때, 광 파이버 증폭기 (125) 의 출력이 918 mW 였다. 광 파이버 증폭기 (125) 에 있어서의 펌프 LD (127) 의 여기 전류가 5.0 A 일 때, 광 파이버 증폭기 (125) 의 출력이 1970 mW 였다. 도 14 로부터 알 수 있는 바와 같이, 광 파이버 증폭기 (125) 의 출력을 100 mW ~ 2000 mW 의 범위에서 변화시킴으로써, 광 파이버 증폭기 (125) 로부터 출력되는 펄스광의 처프의 양 (GDD) 을 약 $48000 fs^2$ 만큼 변화시키는 것이 가능하다. 또한,

광 파이버 증폭기 (125) 에 있어서의 펌프 LD (127) 의 여기 전류가 1.0 A, 2.8 A, 5.0 A 중 어느 경우에도, 펄스광의 최소의 펄스 시간폭이 거의 동일 (~ 90 fs) 하다. 이상으로부터, 도 13 에 나타내는 변형예에 의하면, 펄스광의 압축 후의 최소의 펄스 시간폭을 대략 일정하게 유지하면서, 펄스광의 처프의 양 (GDD) 을 변화시키는 것이 가능하다.

[0064] 또한, 변형예에 관련된 광학 장치 (110) 에서는, $\Delta GDD \sim 48000 \text{ fs}^2$, $\Omega \sim 0.026 \text{ rad/fs}$ (~ 90 fs 의 펄스광에 대응) 이기 때문에, 전술한 식 (3) 으로부터, $\Delta z \sim 16 \times z_R$ 이 된다. 상기 서술한 제 1 실시형태와 마찬가지로, 만일 $z_R = 10 \mu\text{m}$ 로 설정하면, 시간 포커스가 발생하는 z 방향의 위치의 변화 Δz 는 160 μm 가 된다.

[0065] 다음으로, 본원의 제 2 실시형태에 관련된 현미경 장치에 대해 도 15 를 참조하여 설명한다. 도 15 에 나타내는 바와 같이, 제 2 실시형태에 관련된 현미경 장치 (201) 는, 스테이지 (205) 와, 광학 장치 (210) 와, 검출 유닛 (260) 을 갖는다. 현미경 장치 (201) 은, 2 광자 여기 형광 현미경 또는 다광자 여기 형광 현미경이라고도 칭해진다. 스테이지 (205) 의 상면에, 시료 (SA) 가 재치된다. 시료 (SA) 는, 예를 들어, 세포여도 된다.

[0066] 검출 유닛 (260) 은, 집광 렌즈 (261) 와, 검출부 (262) 를 갖는다. 또한, 검출 유닛 (260) 은, 광학 장치 (210) 의 다이크로익 미러 (215) 와, 갈바노 미러 (216, 216) 와, 대물 렌즈 (217) 를 포함한다. 집광 렌즈 (261) 는, 다이크로익 미러 (215) 에서 반사된 시료 (SA) 로부터의 형광을 집광한다. 검출부 (262) 는, 광전자 증배관 (photomultiplier tube : PMT) 이나 포토다이오드 (PD) 등을 사용하여 구성된다. 검출부 (262) 는, 집광 렌즈 (261) 에 의해 집광된 시료 (SA) 로부터의 형광을 검출하고, 검출 신호를 출력한다. 검출부 (262) 에서 검출된 검출 신호에 기초하여, 도시 생략의 화상 처리부에 의해 화상 처리가 실시되고, 화상 처리부에서의 화상 처리에 의해 얻어진 시료 (SA) 의 화상이 도시 생략의 표시 장치에 표시된다.

[0067] 다음으로, 제 2 실시형태에 관련된 광학 장치 (210) 에 대해 설명한다. 광학 장치 (210) 는, 시료 (SA) 에 대해 여기광인 펄스광을 집광한다. 펄스광의 펄스 시간폭은, 예를 들어, 펨토초 (fs) 오더의 시간폭이다. 도 15 에 나타내는 바와 같이, 광학 장치 (210) 는, 광원 유닛 (20) 과, 제 1 미러 (11) 와, 회절 격자 (12) 와, 콜리메이터 렌즈 (13) 와, 제 2 미러 (14) 와, 다이크로익 미러 (215) 와, 갈바노 미러 (216, 216) 와, 대물 렌즈 (217) 를 갖는다. 광원 유닛 (20), 제 1 미러 (11), 회절 격자 (12), 콜리메이터 렌즈 (13), 및 제 2 미러 (14) 는, 제 1 실시형태에 관련된 광원 유닛 (20), 제 1 미러 (11), 회절 격자 (12), 콜리메이터 렌즈 (13), 및 제 2 미러 (14) 와 동일한 구성이고, 제 1 실시형태와 동일한 부호를 부여하여 상세한 설명을 생략한다.

[0068] 다이크로익 미러 (215) 는, 다이크로익 미러 (215) 에 입사한 펄스광 (PL) 을 갈바노 미러 (216, 216) 를 향하여 투과시킨다. 또, 다이크로익 미러 (215) 는, 대물 렌즈 (217) 및 갈바노 미러 (216, 216) 를 통하여 다이크로익 미러 (215) 에 입사한 시료 (SA) 로부터의 형광을, 검출 유닛 (260) (집광 렌즈 (261)) 을 향하여 반사시킨다.

[0069] 갈바노 미러 (216, 216) 는, 다이크로익 미러 (215) 를 투과한 펄스광 (PL) 을 대물 렌즈 (217) 를 향하여 반사시킨다. 또한, 갈바노 미러 (216, 216) 는, 대물 렌즈 (217) 를 투과한 시료 (SA) 로부터의 형광을 다이크로익 미러 (215) 를 향하여 반사시킨다. 갈바노 미러 (216, 216) 는, 반사면의 방향을 변화시킴으로써, 펄스광 (PL) 의 진행 방향을 변화시키는 것이 가능하다. 갈바노 미러 (216, 216) 에 의해 펄스광 (PL) 의 진행 방향을 변화시킴으로써, 시료 (SA) 에 있어서의 대물 렌즈 (217) 의 광축과 수직인 평면 (관찰면) 에 있어서 주사를 실시하는 것이 가능하다. 갈바노 미러 (216, 216) 는, 대물 렌즈 (217) 의 동공의 위치 또는 동공과 공역인 위치에 형성되는 것이 바람직하다.

[0070] 대물 렌즈 (217) 는, 갈바노 미러 (216, 216) 에서 반사된 펄스광 (PL) 을 시료 (SA) 에 대해 집광한다. 또한, 회절 격자 (12) 와, 시료 (SA) (관찰면) 와, 검출부 (262) 는 서로 공액이다.

[0071] 다음으로, 이상과 같이 구성되는 현미경 장치 (201) 의 광학 장치 (210) 를 사용한, 펄스광에 의한 주사 방법에 대해 설명한다. 제 2 실시형태에 관련된 주사 방법은, 제 1 실시형태에서 설명한 주사 방법과 동일하기 때문에, 제 1 실시형태와 동일한 도 10 을 참조하면서 설명한다. 먼저, 제 1 실시형태와 동일하게 하여 펄스광을 발생시킨다 (스텝 ST1). 다음으로, 제 1 실시형태와 동일하게 하여 펄스광을 증폭시킨다 (스텝 ST2).

[0072] 다음으로, 회절 격자 (12) 에 의해 펄스광을 분산시킨다 (스텝 ST3). 제 2 실시형태에 있어서, 광원 유닛

(20) 은, 여기광으로서, 예를 들어, 1 μm 의 파장 대역의 펄스광 (PL) 을 사출한다. 광원 유닛 (20) 으로부터 사출된 펄스광 (PL) 은, 제 1 미러 (11) 에서 반사되어 회절 격자 (12) 에 입사한다. 회절 격자 (12) 는, 제 1 미러 (11) 에서 반사된 펄스광 (PL) 을 회절 현상에 의해 분산시킨다. 회절 격자 (12) 에 있어서 분산된 펄스광 (PL) 은, 콜리메이터 렌즈 (13) 를 통과하여 평행이 되고, 제 2 미러 (14) 에 입사한다. 이 때, 회절 격자 (12) 와 콜리메이터 렌즈 (13) 에 의해, 시간 포커스에 필요한, 펄스광 (PL) 의 공간적인 처프를 발생시킨다.

[0073] 다음으로, 대물 렌즈 (217) 에 의해 펄스광을 집광한다 (스텝 ST4). 제 2 미러 (14) 에서 반사된 펄스광 (PL) 은, 다이크로익 미러 (215) 를 통과하여 갈바노 미러 (216, 216) 에서 반사된다. 갈바노 미러 (216, 216) 에서 반사된 펄스광 (PL) 은, 대물 렌즈 (217) 에 입사한다. 대물 렌즈 (217) 는, 갈바노 미러 (216, 216) 에서 반사된 펄스광 (PL) 을 시료 (SA) 에 대해 집광한다. 또한, 대물 렌즈 (217) 에 의해 집광되는 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭은, 시간 포커스가 발생함으로써, 회절 격자 (12) 에 입사할 때의 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭이 된다. 이것은 대물 렌즈 (217) 에 의해 집광되는 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭이, 회절 격자 (12) 에 입사할 때의 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭과 (완전히) 동일해질 뿐만 아니라, 회절 격자 (12) 에 입사할 때의 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭과 대략 동일해지는 경우도 포함한다.

[0074] 그리고, 시간 포커스가 발생하는 위치를 대물 렌즈 (217) 의 광축 방향으로 변화시켜 주사를 실시한다 (스텝 ST5). 이 때, 제 1 펌프 LD (27) 및 제 2 펌프 LD (28) 의 여기 전류를 변조시킴으로써, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 의 증폭률을 변화시킨다. 이로써, 펄스광 (PL) 의 처프의 양 (GDD) 을 변화시키고, 시간 포커스가 발생하는 위치를 대물 렌즈 (217) 의 광축 방향으로 변화시켜 광축 방향 (z 방향) 의 주사를 실시한다. 또한 이 때, 갈바노 미러 (216, 216) 에 의해 펄스광 (PL) 의 진행 방향을 변화시킴으로써, 대물 렌즈 (217) 의 광축과 수직인 방향 (XY 방향) 의 주사를 실시한다. 또한, 시료 (SA) 에 대해 광학 장치 (210) 로부터의 펄스광 (PL) 이 연속적으로 조사되는 상태에서는, 상기 서술한 펄스광을 발생시키는 스텝 (ST1), 펄스광을 증폭시키는 스텝 (ST2), 펄스광을 분산시키는 스텝 (ST3), 펄스광을 집광하는 스텝 (ST4), 및 주사를 실시하는 스텝 (ST5) 은, 각각 병행하여 실시된다.

[0075] 여기광인 펄스광 (PL) 의 조사에 의해, 시료 (SA) 에 포함되는 형광 물질이 2 광자 여기되어, 여기광 (펄스광 (PL)) 보다 단파장의 형광이 사출된다. 이 때, 시간 포커스의 효과에 의해 펄스광 (PL) 의 펄스 시간폭이 축소되고, 시료 (SA) 의 관찰면 (대물 렌즈 (217) 의 초점면) 에 있어서 회절 격자 (12) 에 입사할 때의 원래의 펄스 시간폭이 재현된다. 시간 포커스의 효과에 의해, 현미경 장치 (201) 의 광축 방향 (z 방향) 에 있어서의 분해능이 높아지기 때문에, 대물 렌즈 (217) 의 초점 근방에 있어서의 미소한 영역에서만, 2 광자 여기가 발생한다. 그 때문에, 시간 포커스가 발생하는 위치 (z 방향의 위치) 를 변화시킴으로써 광축 방향 (z 방향) 의 주사를 실시할 수 있고, 갈바노 미러 (216, 216) 에 의한 광축과 수직인 방향의 주사와 조합함으로써, 시료 (SA) 의 3 차원 화상을 생성하는 것이 가능해진다.

[0076] 또한, 시료 (SA) 로부터의 형광은, 대물 렌즈 (217) 에 입사한다. 대물 렌즈 (217) 를 통과한 형광은, 갈바노 미러 (216, 216) 에서 반사되어, 다이크로익 미러 (215) 에 입사한다. 다이크로익 미러 (215) 에 입사한 형광은, 당해 다이크로익 미러 (215) 에서 반사되어, 집광 렌즈 (261) 에 입사한다. 집광 렌즈 (261) 를 통과한 형광은, 검출부 (262) 에 집광된다. 또한, 회절 격자 (12) 와, 시료 (SA) (관찰면) 와, 검출부 (262) 는 서로 공액이다. 그 때문에, 여기광인 펄스광 (PL) 이 대물 렌즈 (217) 에 의해 시료 (SA) 의 관찰면에 집광하도록 구성됨으로써, 2 광자 여기에 의해 발생한 형광 중, 대물 렌즈 (217) 를 통과하는 형광을 빠짐없이 검출부 (262) 에 도달시키는 것이 가능하다.

[0077] 제 2 실시형태에 따르면, 현미경 장치 (201) 의 광학 장치 (210) 가, 펄스광을 증폭시키는 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 와, 펄스광을 분산시키는 회절 격자 (12) 와, 회절 격자 (12) 에 있어서 분산된 펄스광을 집광하는 대물 렌즈 (217) 를 갖고, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 의 증폭률을 변경하는 것이 가능하다. 또한, 대물 렌즈 (217) 에 의해 집광되는 펄스광의 펄스 시간폭은, 시간 포커스가 발생함으로써, 회절 격자 (12) 에 입사할 때의 펄스광의 펄스 시간폭이 된다. 제 1 실시 형태와 마찬가지로, 제 1 펌프 LD (27) 의 여기 전류를 고속으로 변조시킴으로써, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 의 증폭률을 고속으로 변화시키는 것이 가능하기 때문에, 펄스광의 처프의 양 (GDD) 을 고속으로 변화시킬 수 있어, 시간 포커스가 발생하는 위치 (z 방향의 위치) 를 고속으로 변화시키는 것이 가능해진다. 또한, 시간 포커스의 효과에 의해, 펄스광의 집광 반경을 5 ~ 10 μm 정도로 해도, 현미경 장치 (201) 의 광축 방향 (z 방향) 에 있어서의 분해능이 높아지기 때문에, 시간 포커스가 발생하는 위치 (z 방향의 위치) 를 고속으로 변화시킴으로써, 광축 방향 (z 방향) 의 주사를 고속으로 실시할 수 있다. 그 때문에, 갈바노 미러 (216, 216) 에

의한 광축과 수직인 방향의 주사와 조합함으로써, 시료 (SA) 의 3 차원 화상을 고속으로 생성하는 것이 가능해진다.

- [0078] 또한, 제 1 실시형태와 마찬가지로, 제 2 펌프 LD (28) 의 여기 전류를 제어하는 것에 의해 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 의 증폭률을 조정함으로써, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 로부터 출력되는 펄스광의 출력을 일정한 범위 내로 해도 된다. 혹은, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 의 입력측 혹은 출력측에 음향 광학 소자 (AOM) 등의 광량 조정기를 설치하여 펄스광의 펄스 에너지를 제어해도 된다. 이것에 의해, 펄스광의 처프의 양 (GDD) 을 변화시키면서, 펄스광의 펄스 에너지의 변동을 작게 할 수 있다.
- [0079] 또한, 제 1 실시형태와 마찬가지로, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 로부터 출력된 펄스광의 펄스 시간폭을 압축하는 압축기 (31) 가 형성되어도 된다. 이것에 의해, 푸리에 한계 펄스의 펄스광을 얻을 수 있다.
- [0080] 상기 서술한 제 2 실시형태에 있어서, 제 1 실시형태와 마찬가지로, 오실레이터 (22) 를 형성하지 않고, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 가, 현미경 장치 (201) 의 외부에 형성된 펄스광 발생기로부터의 펄스광을 증폭시키도록 해도 된다. 이 경우, 상기 서술한 펄스광을 발생시키는 스텝 (ST1) 을 생략할 수 있다.
- [0081] 상기 서술한 제 2 실시형태에 있어서, 제 1 실시형태와 마찬가지로, 펄스광을 분산시키는 분산 소자로서, 회절 격자 (12) 대신에 프리즘 등이 형성되어도 된다.
- [0082] 상기 서술한 제 2 실시형태에 있어서, 제 1 실시형태와 마찬가지로, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 의 입력측에 형성한 음향 광학 소자 (AOM) 등에 의해 입력 펄스광의 광량을 제어함으로써, 제 1 광 파이버 증폭기 (25) 의 증폭률을 실효적으로 변경하고, 펄스광의 처프의 양 (GDD) 을 변화시켜도 된다. 또한, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 의 입력측, 혹은 출력측에 형성한 음향 광학 소자 (AOM) 등에 의해 펄스광의 광량을 제어함으로써, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 의 증폭률을 실효적으로 변경하여, 제 2 광 파이버 증폭기 (26) 의 출력을 일정한 범위로 유지하도록 하여도 된다.
- [0083] 상기 서술한 제 2 실시형태에 있어서, 광원 유닛 (20) 은, 제 1 실시형태와 마찬가지로, 2 단 구성의 증폭기 (제 1 광 파이버 증폭기 (25) 및 제 2 광 파이버 증폭기 (26)) 에 한정하지 않고, 증폭기를 1 개만 가져도 된다.
- [0084] 상기 서술한 제 2 실시형태에 있어서, 압축기 (31) 는, 제 1 실시형태와 마찬가지로, 회절 격자쌍 (그레이팅 페어) 에 한정되지 않고, 프리즘 페어를 사용하여 구성되어도 된다.
- [0085] 상기 서술한 제 2 실시형태에 있어서, 제 1 실시형태와 마찬가지로, 압축기 (31) 가 광원 유닛 (20) 에 형성되어 있지만, 이것에 한정되는 것은 아니고, 압축기가 광원 유닛에 형성되어 있지 않아도 된다. 예를 들어, 현미경 장치 (201) 의 광학 장치가, 제 1 실시형태의 변형예에 관련된 광학 장치 (110) 과 동일하게 구성되어도 된다.
- [0086] 상기 서술한 제 2 실시형태에 있어서, 현미경 장치 (201) 의 일례로서, 2 광자 여기 형광 현미경 (다광자 여기 형광 현미경) 을 예시하여 설명하고 있지만, 이것에 한정되는 것은 아니고, 예를 들어, 제 2 고조파 발생 (Second Harmonic Generation : SHG) 현미경이나, 제 3 고조파 발생 (Third Harmonic Generation : THG) 현미경이어도 된다.

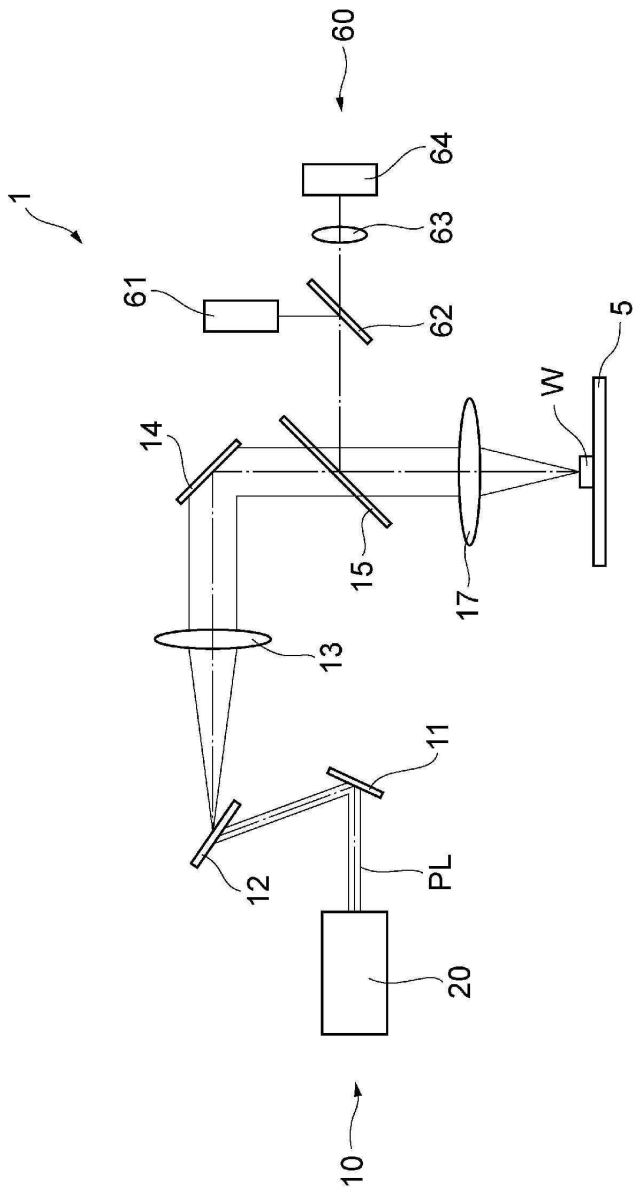
부호의 설명

- [0087] 1 : 광 가공 장치 (제 1 실시형태)
- 10 : 광학 장치
- 12 : 회절 격자
- 13 : 폴리메이터 렌즈
- 17 : 대물 렌즈
- 20 : 광원 유닛
- 22 : 오실레이터 (펄스광 발생기)
- 25 : 제 1 광 파이버 증폭기

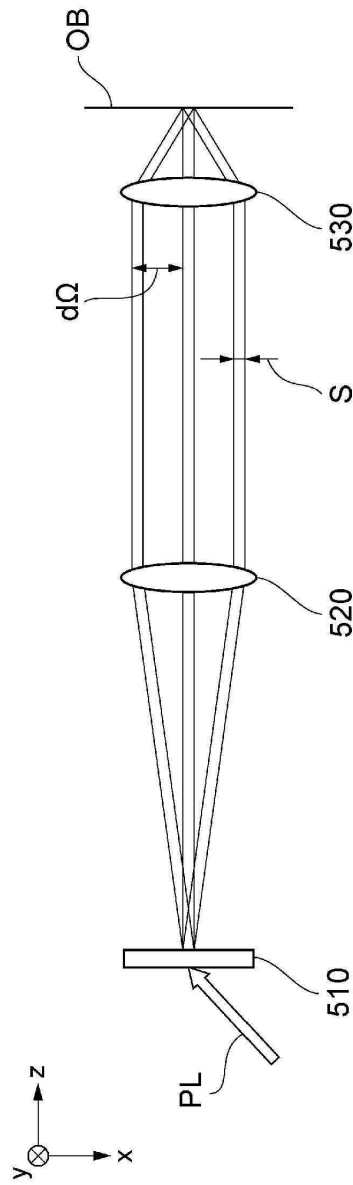
- 26 : 제 2 광 파이버 증폭기
- 27 : 제 1 펌프 LD
- 28 : 제 2 펌프 LD
- 31 : 압축기
- 110 : 광학 장치 (변형예)
- 111 : 제 1 회절 격자
- 112 : 제 2 회절 격자
- 117 : 대물 렌즈
- 120 : 광원 유닛
- 122 : 오실레이터 (펄스광 발생기)
- 125 : 광 파이버 증폭기
- 127 : 펌프 LD
- 201 : 현미경 장치 (제 2 실시형태)
- 210 : 광학 장치
- 217 : 대물 렌즈
- PL : 펄스광

도면

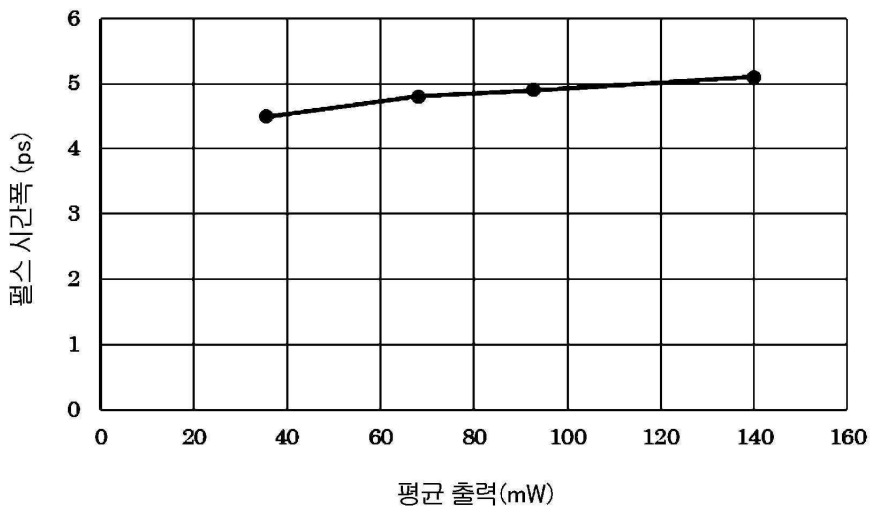
도면1



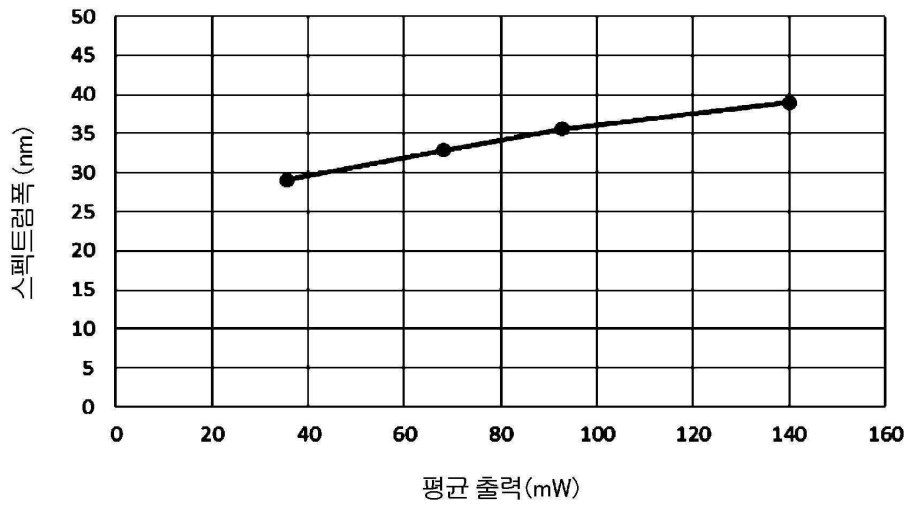
도면2



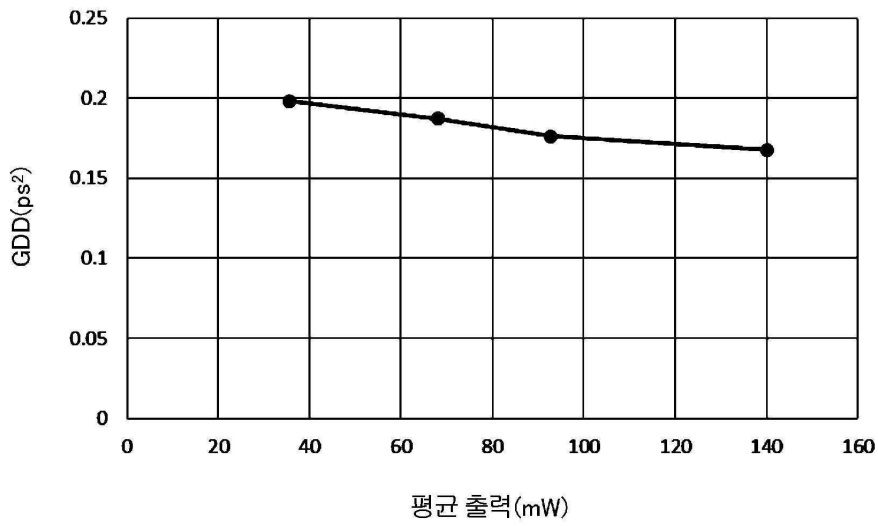
도면3



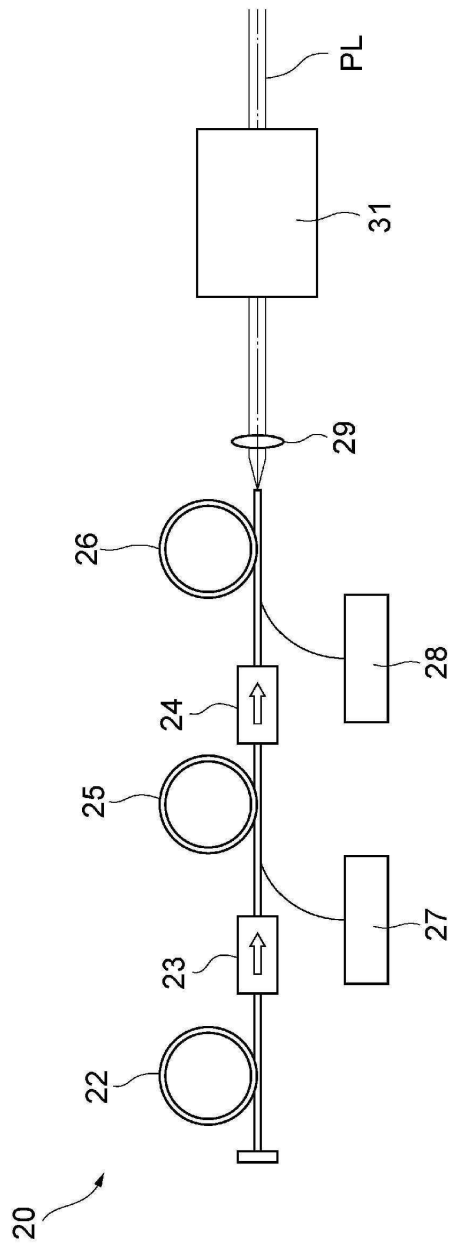
도면4



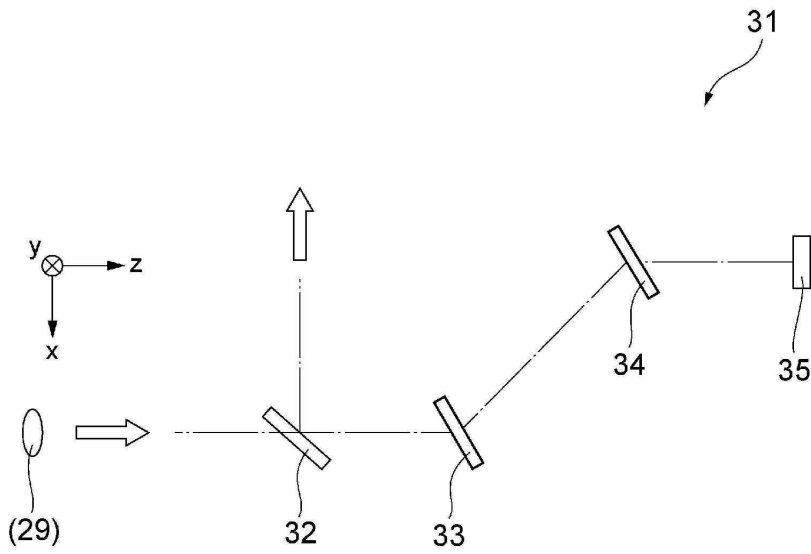
도면5



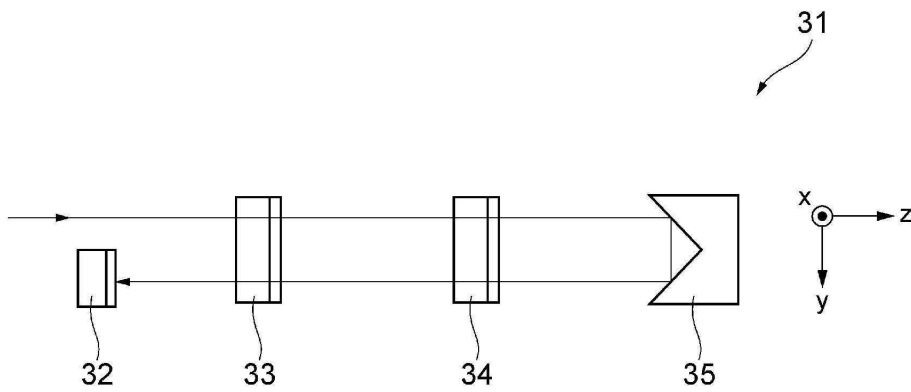
도면6



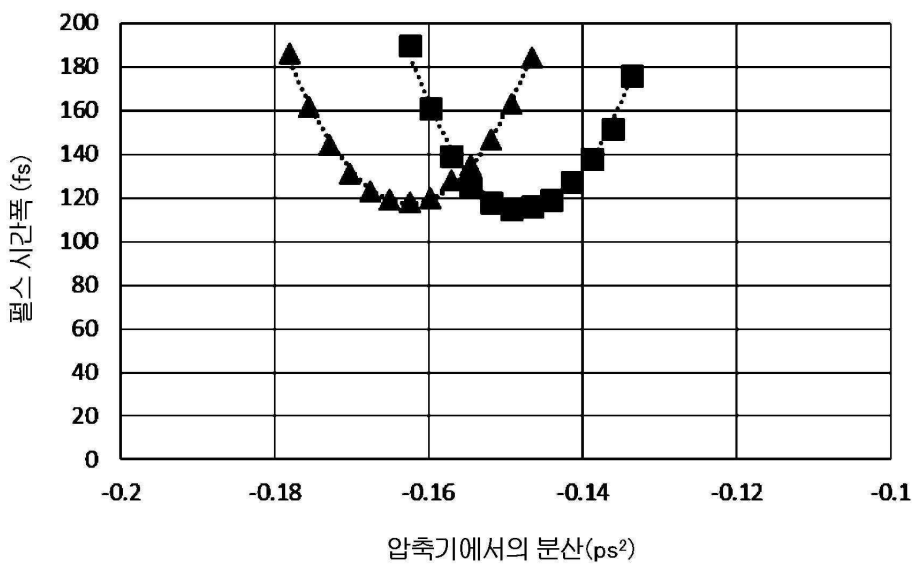
도면7



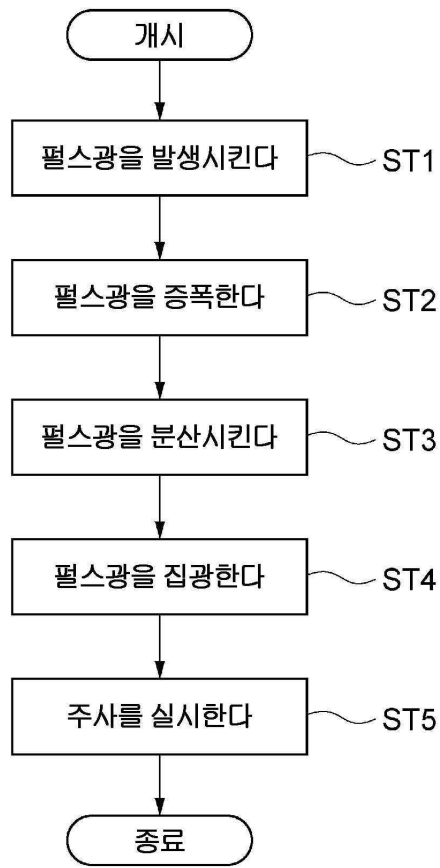
도면8



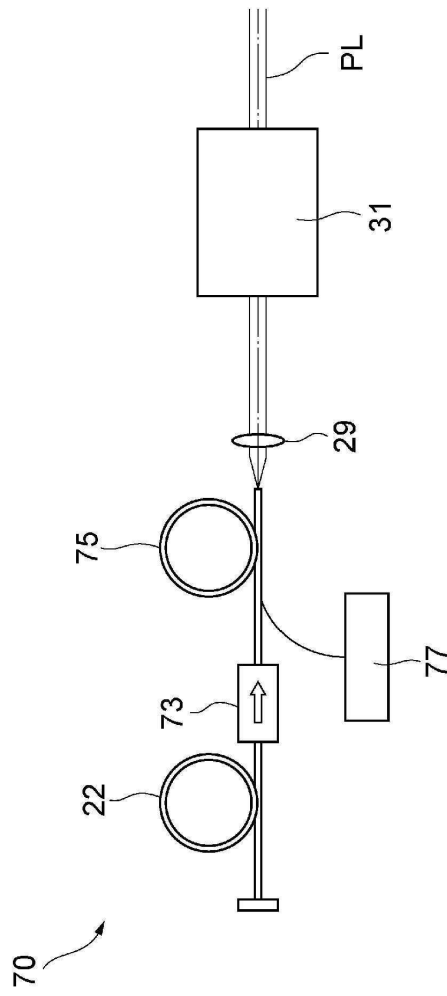
도면9



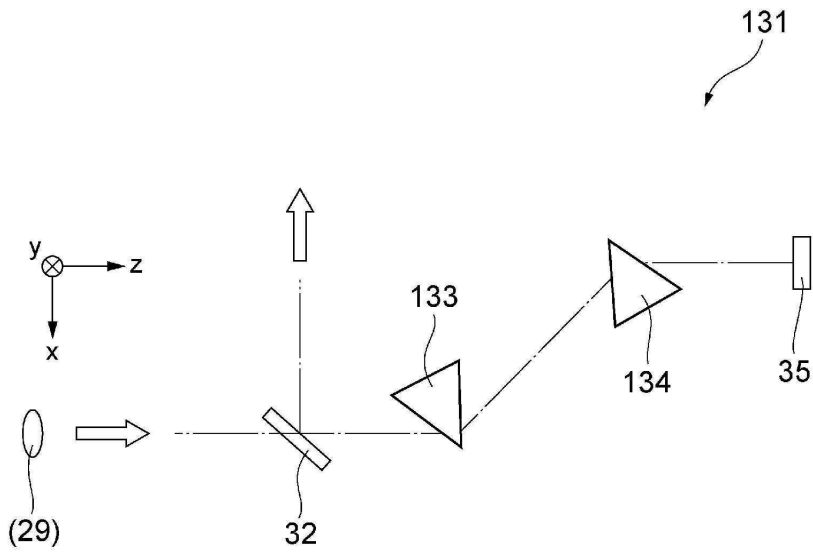
도면10



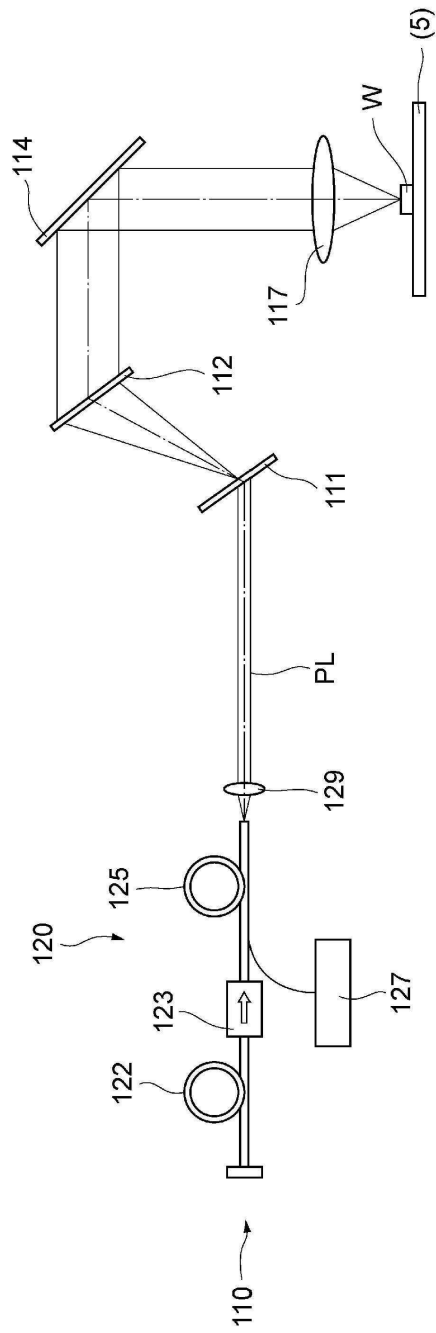
도면11



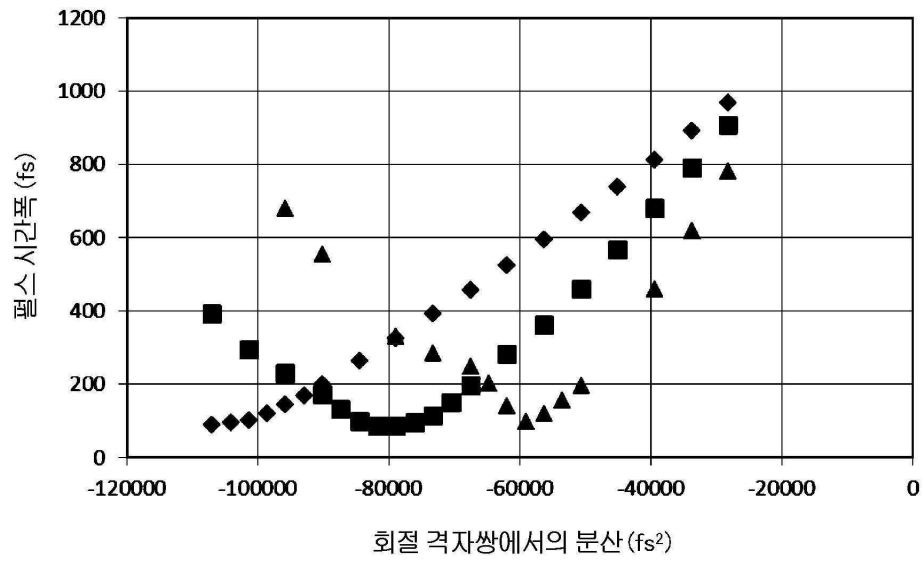
도면12



도면13



도면14



도면15

