



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 120112831 A

(43) 申请公布日 2025. 06. 06

(21) 申请号 202380075577.6

(22) 申请日 2023.09.14

(30) 优先权数据

2022-147880 2022.09.16 JP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2025.04.25

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2023/033478 2023.09.14

(87) PCT国际申请的公布数据

W02024/058237 JA 2024.03.21

(71) 申请人 株式会社尼康

地址 日本东京都

(72) 发明人 德久章

(74) 专利代理机构 北京市金杜律师事务所

11256

专利代理师 马立荣 闫剑平

(51) Int.Cl.

G02B 21/06 (2006.01)

B23K 26/082 (2006.01)

G02B 26/10 (2006.01)

G02F 1/365 (2006.01)

H01S 3/067 (2006.01)

H01S 3/10 (2006.01)

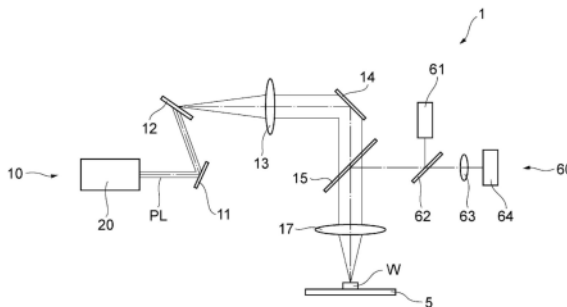
权利要求书1页 说明书14页 附图13页

(54) 发明名称

光学装置、光加工装置、显微镜装置、以及扫描方法

(57) 摘要

光加工装置(1)的光学装置(10)具有:对脉冲光进行放大的光纤放大器;通过衍射现象使从光纤放大器输出的脉冲光(PL)色散的衍射光栅(12);使在衍射光栅(12)中色散后的脉冲光(PL)变为平行的准直透镜(13);以及使透射过准直透镜(13)的脉冲光(PL)聚集的物镜(17),通过变更光纤放大器的放大率,使产生时间聚焦的位置在物镜(17)的光轴方向上变化。



1. 一种光学装置,其具备:
对脉冲光进行放大的放大器;
使从所述放大器输出的所述脉冲光色散的色散元件;以及
使在所述色散元件中色散后的所述脉冲光聚集的物镜,
所述光学装置能够变更所述放大器的放大率。
2. 根据权利要求1所述的光学装置,其中,
具备准直透镜,所述准直透镜使在所述色散元件中色散后的所述脉冲光变为平行,
所述物镜使透射过所述准直透镜的所述脉冲光聚集,
利用所述物镜聚集的所述脉冲光的脉冲时间宽度通过产生时间聚焦而成为在入射至
所述色散元件时的所述脉冲光的脉冲时间宽度。
3. 根据权利要求1或者2所述的光学装置,其中,
具有对从所述放大器输出的所述脉冲光进行放大的第二放大器,
所述色散元件使从所述第二放大器输出的所述脉冲光色散,
所述光学装置能够变更所述第二放大器的放大率。
4. 根据权利要求3所述的光学装置,其中,
通过变更所述放大器的放大率,使产生时间聚焦的位置在所述物镜的光轴方向上变
化,
通过变更所述第二放大器的放大率,使从所述第二放大器输出的所述脉冲光的输出为
固定的范围内。
5. 根据权利要求3或者4所述的光学装置,其中,
具有压缩器,所述压缩器对从所述第二放大器输出的所述脉冲光的脉冲时间宽度进行
压缩。
6. 一种光加工装置,其具有使对工件照射的脉冲光进行扫描的光学装置,
所述光学装置为权利要求1~5中任一项所述的光学装置。
7. 一种显微镜装置,其具有使对样本照射的脉冲光进行扫描的光学装置,
所述光学装置为权利要求1~5中任一项所述的光学装置。
8. 一种扫描方法,其包括:
使用放大器,对脉冲光进行放大;
使用色散元件,使从所述放大器输出的所述脉冲光色散;以及
使用物镜,使在所述色散元件中色散后的所述脉冲光聚集,
通过变更所述放大器的放大率,使利用所述物镜聚集的所述脉冲光的产生时间聚焦的
位置在所述物镜的光轴方向上变化来进行扫描。

光学装置、光加工装置、显微镜装置、以及扫描方法

技术领域

[0001] 本发明涉及光学装置、光加工装置、显微镜装置、以及扫描方法。

背景技术

[0002] 光加工装置或显微镜装置有具有输出脉冲光的光学装置的情况。为了提高具有输出脉冲光的光学装置的显微镜装置的分辨率,已知一种被称为时间聚焦(temporal focus)的技术(例如,参照非专利文献1)。

[0003] 现有技术文献

[0004] 非专利文献

[0005] 非专利文献1:DurstE.他、Simultaneous spatial and temporal focusing for axial scanning,Optics Express,2006年,14,12243

发明内容

[0006] 本发明的光学装置具备:对脉冲光进行放大的放大器;使从所述放大器输出的所述脉冲光色散的色散元件;以及使在所述色散元件中色散后的所述脉冲光聚集的物镜,所述光学装置能够变更所述放大器的放大率。

[0007] 本发明的光加工装置具有对相对于工件照射的脉冲光进行扫描的光学装置,所述光学装置为上述的光学装置。

[0008] 本发明的显微镜装置具有对相对于样本照射的脉冲光进行扫描的光学装置,所述光学装置为上述的光学装置。

[0009] 本发明的扫描方法包括:使用放大器,对脉冲光进行放大;使用色散元件,使从所述放大器输出的所述脉冲光色散;以及使用物镜,使在所述色散元件中色散后的所述脉冲光聚集,通过变更所述放大器的放大率,使通过所述物镜聚集的所述脉冲光的产生时间聚焦的位置在所述物镜的光轴方向上变化而进行扫描。

附图说明

[0010] 图1是示出第1实施方式的具有光学装置的光加工装置的概要构成图。

[0011] 图2是示出利用了时间聚焦的光学系统的一例的示意图。

[0012] 图3是示出从光纤放大器输出的脉冲光的脉冲时间宽度与光纤放大器的平均输出之间的关系图表。

[0013] 图4是示出从光纤放大器输出的脉冲光的光谱宽度与光纤放大器的平均输出之间的关系图表。

[0014] 图5是示出从光纤放大器输出的脉冲光的啁啾量(GDD)与光纤放大器的平均输出之间的关系图表。

[0015] 图6是光源单元的概要构成图。

[0016] 图7是压缩器的俯视图。

- [0017] 图8是压缩器的侧视图。
- [0018] 图9是示出从光纤放大器输出的脉冲光的脉冲时间宽度的压缩特性的图表。
- [0019] 图10是示出基于脉冲光的扫描方法的流程的流程图。
- [0020] 图11是变形例的光源单元的概要构成图。
- [0021] 图12是变形例的压缩器的俯视图。
- [0022] 图13是变形例的光学装置的概要构成图。
- [0023] 图14是示出变形例的光学装置中的脉冲光的脉冲时间宽度的压缩特性的图表。
- [0024] 图15是示出第2实施方式的具有光学装置的显微镜装置的概要构成图。

具体实施方式

[0025] 以下,说明本发明的优选的实施方式。首先,参照图1说明第1实施方式的光加工装置。如图1所示,第1实施方式的光加工装置1具有载物台5、光学装置10、观察单元60。光加工装置1基于根据期望的形状而创建的加工数据,利用控制装置(未图示)控制光学装置10或载物台5等,由此,能够将作为加工对象物的工件W加工成期望的形状。在载物台5的上表面载置有工件W。工件W的材料例如可以为金属,可以为树脂,也可以为玻璃。另外,载物台5可以构成为能够使载置在载物台5的上表面的工件W至少向与光加工装置1的光轴垂直的方向位移。通过驱动载物台5来调节工件W的位置,从而即便是超过后述的光学装置10的扫描宽度的位置也能够照射来自光学装置10的脉冲光。

[0026] 观察单元60具有照明光源61、半反射镜62、成像透镜63、摄像部64。而且,观察单元60包括光学装置10的二向色镜15、物镜17。照明光源61使用LED(Light Emitting Diode:发光二极管)等来构成。照明光源61发出可视光的波长范围的照明光。半反射镜62使从照明光源61发出的照明光的一部分朝向二向色镜15反射。半反射镜62朝向成像透镜63透射被二向色镜15反射的来自工件W的光。半反射镜62的透射率与反射率的比率例如被设定为1:1。成像透镜63使透射过半反射镜62的来自工件W的光成像。摄像部64使用CCD(Charge Coupled Device:电荷耦合器件)或CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor:互补金属氧化物半导体)等的摄像元件来构成。摄像部64对通过成像透镜63成像后的工件W的像进行拍摄。

[0027] 通过摄像部64拍摄获取的工件W的图像显示于未图示的显示装置。能够借助显示于显示装置的图像观察工件W。此外,也可以基于通过摄像部64拍摄获取到的工件W的图像数据,来修正控制装置(未图示)对光学装置10、载物台5的控制量。

[0028] 接下来,说明光学装置10。光学装置10使脉冲光PL聚集(聚拢)于工件W。脉冲光PL的脉冲时间宽度例如为飞秒(fs)级的时间宽度。这种脉冲光PL也被称为超短脉冲光,但在以下的说明中简称为“脉冲光”。为了提高光加工装置1以及后述的显微镜装置201的光轴方向的分辨率,使用被称为时间聚焦的技术。在以下的说明中,有时将被称为时间聚焦的技术简称为“时间聚焦”。另外,有时将具备光学装置10的光加工装置1(或者显微镜装置101)的光轴方向称为z方向,将与光轴垂直的方向称为x方向以及y方向。例如,将图2、图7、图8、图11的用各箭头所示的方向分别称为x方向、y方向、z方向。

[0029] 在此,考虑相对于物体面(例如,工件W的被加工面)聚集脉冲光的情况。将脉冲光的聚光半径设为 w ,将脉冲光的波数设为 k ,将脉冲光的波长设为 λ 。此时,脉冲光的光束直径

成为大致固定的z方向上的范围,即,共焦长度用 $kw^2 = 2\pi w^2/\lambda$ 来表达。若减小脉冲光的聚光半径 w ,则共焦长度变短,光加工装置的光轴方向(z方向)上的分辨率变高。例如,将脉冲光的波长 λ 设为 $1\mu\text{m}$,若将脉冲光的聚光半径 w 变小至 $1\mu\text{m}$ 左右,则脉冲光的光强度高区域(即,共焦长度)在z方向上为 $6\mu\text{m}$ 左右的有限区域。假设使脉冲光的聚光半径 w 变大至 $50\mu\text{m}$ 左右,则共焦长度约为 16mm ,光加工装置的光轴方向(z方向)上的分辨率变低。

[0030] 提出了一种被称为时间聚焦的技术,在该技术中,即使变大脉冲光的聚光半径 w ,也能够提高光轴方向(z方向)上的分辨率。在图2中示出利用了时间聚焦的光学系统的一例。在图2中,衍射光栅510通过衍射现象使从光源单元(未图示)射出的脉冲光PL色散。在衍射光栅510中色散后的脉冲光PL入射至准直透镜520。透射过准直透镜520的脉冲光PL变为平行光并入射至物镜530。透射过物镜530的脉冲光PL聚集至配置在物镜530的焦点的物体面OB。此外,在以下的说明中,只要没有特别限定,则物体面OB为被加工面。

[0031] 另外,衍射光栅510与物体面OB彼此共轭。随着在衍射光栅510中色散后的脉冲光PL趋向准直透镜520,脉冲光PL的脉冲时间宽度变大。然后,当脉冲光PL透射准直透镜520以及物镜530并到达与衍射光栅510共轭的物体面OB时,脉冲光PL的脉冲时间宽度变小,重现入射至衍射光栅510时的原本的脉冲时间宽度。将这种现象称为时间聚焦。在从物体面OB向z方向偏离的位置,脉冲光PL的脉冲时间宽度相对变大,因此,脉冲光PL的峰值功率下降,利用脉冲光PL的加工效率下降。其结果为,能够提高光加工装置的光轴方向(z方向)上的分辨率。

[0032] 在图2例示的利用了时间聚焦的光学系统中,物体面OB附近的脉冲光PL的脉冲时间宽度近似地用下式(1)来表达。

[0033] [数1]

$$[0034] \quad \tau(z) = \tau_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad \dots (1)$$

[0035] 在此, τ_0 表示在脉冲光PL为傅立叶变换极限脉冲(Transform Limited Pulse)的情况下、也就是说在没有啁啾而GDD(Group Delay Dispersion)=0的情况下的脉冲光PL的脉冲时间宽度。在此,设想了傅立叶变换极限脉冲的脉冲光PL入射至衍射光栅510。另外, z_R 近似地用下式(2)来表达。

[0036] [数2]

$$[0037] \quad z_R \approx \frac{2f^2}{k_0 \alpha^2 \Omega^2} \quad \dots (2)$$

[0038] 在此, f 表示物镜530的焦点距离。 k_0 表示在衍射光栅510中色散后的脉冲光PL的光谱中的中心频率处的波数。脉冲光PL的光谱中的频率为 ω 的单色波的相对于物镜530的入射位置处的x方向上的坐标用 $x = \alpha \omega$ 来表达。此外,关于频率 ω ,以脉冲光PL的光谱中的中心频率成为零(0)的方式被设置偏移量。 α 为根据衍射光栅510的色散(或者线密度、入射角)、准直透镜520的焦点距离 f 等而决定的系数。 Ω 为脉冲光PL的光谱中的最大频率。脉冲光PL的相对于物镜530的入射位置的x方向上的宽度(即,衍射光栅510中色散后的脉冲光PL的色散方向上的宽度)大概为 $2\alpha \Omega$ 。在此,关于脉冲光PL的光谱中的单色波的直径 s (参照图2),设定为 $s \ll \alpha \Omega$ 。

[0039] 另外, $z=0$ 的位置与衍射光栅510共轭的位置对应。从式(1)可知, 若为 $z=0$, 则脉冲光PL的脉冲时间宽度最小, 若为 $z>z_R$, 则脉冲光PL的脉冲时间宽度显著变大。因此, 若为 $z>z_R$, 则脉冲光PL的脉冲时间宽度变大, 脉冲光PL的峰值功率下降, 因此, 光加工装置的光轴方向 (z 方向) 上的分辨率可以说为 z_R 的程度。例如, 在 $f=10\text{mm}$ 、 $\alpha\Omega=3\text{mm}$ 、 $\lambda=1\mu\text{m}$ 的情况下, z_R 为 $3\mu\text{m}$ 左右。即, 假设将脉冲光的聚光半径 w 设为 $50\mu\text{m}$ 左右, 根据时间聚焦的效果, 光加工装置的 z 方向上的分辨率也为 μm 级。像这样, 根据时间聚焦的效果, 即使变大脉冲光的聚光半径, 光加工装置的光轴方向 (z 方向) 上的分辨率也变高, 因此, 能够相对于工件进行除去加工等的精细加工。另外, 在工件的材料为透明的树脂、玻璃的情况下, 根据时间聚焦的效果, 能够相对于工件的内部进行精细加工。通过将 $z=0$ 的位置中的脉冲光的峰值功率设定为能够进行相对于工件的加工的加工阈值附近, 能够进一步提高光加工装置的光轴方向上的分辨率 (加工分辨率)。

[0040] 产生时间聚焦的 z 方向上的位置能够通过使脉冲光PL啾啾 (使频率随着时间变化) 来变更。啾啾量在最低阶使用 GDD (fs^2 或则 ps^2) 来表达。啾啾量 β 与产生时间聚焦的 z 方向上的位置的变化 Δz 的关系近似地用下式 (3) 来表达。

[0041] [数3]

$$[0042] \quad \Delta z \approx \beta \Omega^2 z_R \cdots (3)$$

[0043] 在此, $\beta = \text{GDD}/2$ 。例如, 在 $\beta = 10000\text{fs}^2$ ($\text{GDD} = 20000\text{fs}^2$)、 $z_R \sim 10\mu\text{m}$ 、 $\Omega \sim 0.033\text{rad/fs}$ (与 $\sim 70\text{fs}$ 的脉冲光对应) 的情况下, 为 $\Delta z \sim 110\mu\text{m}$ 。

[0044] 为了使傅立叶变换极限脉冲的脉冲光啾啾, 有通过石英等硝材的方法、或利用棱镜对、衍射光栅对 (光栅对) 的方法等。在利用棱镜对的情况下, 通过改变棱镜间的间隔、或者向光路插入棱镜的程度, 能够改变脉冲光的 GDD。在利用衍射光栅对 (光栅对) 的情况下, 通过改变衍射光栅间的间隔, 能够改变脉冲光的 GDD。在文献“Durst E. 他、Simultaneous spatial and temporal focusing for axial scanning, Optics Express, 2006年, 14, 12243”中, 实验性地示出通过调节棱镜对, 使 GDD 变化 11000fs^2 左右, 从而使产生时间聚焦的位置能够变化 $140\mu\text{m}$ 。在该方法中, 由于机械地变更棱镜的位置。所以使产生时间聚焦的位置变化要花费时间。在本实施方式中, 将使用了光纤放大器的光源单元和利用了时间聚焦的光学系统组合, 使产生时间聚焦的位置高速变化。

[0045] 光纤放大器由长度为 $1\text{m} \sim$ 数十 m 左右的光纤构成。光纤的芯径为数 $\mu\text{m} \sim$ 数十 μm 左右。像这样使用细长且芯径小的光纤, 因此, 光纤放大器中的色散、非线性性均大。在利用光纤放大器对脉冲光进行放大时, 从光纤放大器输出的脉冲光的脉冲时间宽度以及光谱宽度根据光纤放大器的放大率而变化。脉冲光的啾啾 (GDD) 大概与“脉冲时间宽度/光谱宽度 (ps/nm)”成正比例。此外, ps/nm 与 ps^2 之间, 例如相对于中心波长 $1.06\mu\text{m}$ 的脉冲光而存在 $\text{ps/nm} = -1.68\text{ps}^2$ 的关系。脉冲光的脉冲时间宽度的变化相对于光纤放大器的放大率的变化方式、脉冲光的光谱宽度的变化相对于光纤放大器的放大率的变化方式通常不同。因此, 期待与光纤放大器的放大率相应地使脉冲光的啾啾 (GDD) 变化。

[0046] 图3示出从光纤放大器输出的脉冲光的脉冲时间宽度与光纤放大器的平均输出之间的关系。图4示出从光纤放大器输出的脉冲光的光谱宽度与光纤放大器的平均输出之间的关系。在图3以及图4示出的图表中, 作为向光纤放大器的输入, 使用周期 = 350fs 、波长 = $1.56\mu\text{m}$ 的脉冲光。作为光纤放大器, 使用长度 $\sim 16\text{m}$ 、模场直径 (Mode Field Diameter: MFD)

~5 μm 、正常色散的铒添加光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier:EDFA)。光纤放大器的平均输出与脉冲光的脉冲能量(每一个脉冲的能量)成正比例。根据图3以及图4可知,相对于光纤放大器的平均输出、即,在使脉冲能量增加时的脉冲时间宽度的增加比例,在使脉冲能量增加时的光谱宽度的增加比例大。

[0047] 图5示出从图3以及图4求出的、从光纤放大器输出的脉冲光的啁啾量(GDD)与光纤放大器的平均输出的关系。图5是光纤放大器的平均输出、即,示出根据脉冲能量的变化,从光纤放大器输出的脉冲光的啁啾量(GDD)在0.17~0.2ps²(170000~200000fs²)的范围内变化。

[0048] 如图1所示,第1实施方式的光学装置10具有光源单元20、第1反射镜11、衍射光栅12、准直透镜13、第2反射镜14、二向色镜15、物镜17。光源单元20例如射出1 μm 的波长范围的脉冲光PL。第1反射镜11使从光源单元20射出的脉冲光PL朝向衍射光栅12反射。衍射光栅12通过衍射现象使被第1反射镜11反射的脉冲光PL色散。准直透镜13使衍射光栅12中色散后的脉冲光PL变为平行。

[0049] 第2反射镜14使透射过准直透镜13的脉冲光PL朝向二向色镜15反射。此外,也可以取代第2反射镜14,而设有使透射过准直透镜13的脉冲光PL朝向二向色镜15反射的电流镜(未图示)。电流镜通过使反射面的朝向变化,能够使脉冲光PL的行进方向变化。通过利用电流镜使脉冲光PL的行进方向变化,能够在工件W中的与物镜17的光轴垂直的平面(被加工面)中进行扫描。电流镜优选设于物镜17的光瞳的位置或者与光瞳共轭的位置。

[0050] 二向色镜15朝向物镜17透射入射至二向色镜15的脉冲光PL。另外,二向色镜15使入射至二向色镜15的来自观察单元60(半反射镜62)的照明光朝向物镜17反射。二向色镜15使经由物镜17而入射至二向色镜15的来自工件W的光(可视光)朝向观察单元60(半反射镜62)反射。

[0051] 物镜17使透射过二向色镜15的脉冲光PL聚集于工件W。此外,衍射光栅12与工件W(被加工面)彼此共轭。另外,物镜17将被二向色镜15反射的照明光照射至工件W。来自被照射照明光的工件W的光入射至物镜17。来自入射至物镜17的工件W的光(可视光)透射物镜17并被二向色镜15反射。

[0052] 接下来,参照图6~图8说明光源单元20。如图6所示,光源单元20具有振荡器22、第1光隔离器23、第2光隔离器24、第1光纤放大器25、第2光纤放大器26、准直透镜29、压缩器31。振荡器22利用锁模光纤激光器来构成。振荡器22产生脉冲时间宽度为100fs~1ps左右的傅立叶变换极限脉冲即脉冲光。第1光隔离器23设在振荡器22与第1光纤放大器25之间。第2光隔离器24设在第1光纤放大器25与第2光纤放大器26之间。第1光隔离器23以及第2光隔离器24仅使向正向方向行进的脉冲光透射,遮挡向相反方向行进的光。

[0053] 第1光纤放大器25使用正常色散的铒添加光纤放大器(EDFA)来构成。第1光纤放大器25也可以使用正常色散的镱添加光纤放大器(Ytterbium Doped Fiber Amplifier:YDFA)来构成。在第1光纤放大器25设有第1泵浦LD(激光二极管)27。第1泵浦LD27使激发光(也被称为泵光)入射至第1光纤放大器25。第1光纤放大器25利用从第1泵浦LD27入射的激发光,对从振荡器22产生的脉冲光进行放大。通过改变第1泵浦LD27的泵浦电流,能够变更第1光纤放大器25的放大率(即,输出)。第1光纤放大器25为比第2光纤放大器26长的细长且芯径小的光纤放大器。由此,利用色散、非线性性相对大的第1光纤放大器25,来决定脉冲光

的啁啾的特性 (GDD)。

[0054] 第2光纤放大器26使用铟添加光纤放大器 (EDFA) 来构成。第2光纤放大器26也可以使用镱添加光纤放大器 (YDFA) 来构成。在第2光纤放大器26设有第2泵浦LD (激光二极管) 28。第2泵浦LD28使激发光 (也被称为泵光) 入射至第2光纤放大器26。第2光纤放大器26利用从第2泵浦LD28入射的激发光, 对从第1光纤放大器25输出的对脉冲光进行放大。通过改变第2泵浦LD28的泵浦电流, 能够变更第2光纤放大器26的放大率 (即, 输出)。第2光纤放大器26为比第1光纤放大器25短的短且芯径大的光纤放大器。由此, 利用色散、非线性性相对小的第2光纤放大器26, 决定输出 (脉冲光的脉冲能量)。

[0055] 作为放大器, 通过使用色散、非线性性相对大的第1光纤放大器25、以及色散、非线性性相对小的第2光纤放大器26, 能够一边使从放大器 (第1光纤放大器25以及第2光纤放大器26) 输出的脉冲光的啁啾量 (GDD) 变化, 一边减小脉冲光的脉冲能量的变动。此外, 也可以取代第2光纤放大器26, 而设有固体放大器来作为第2放大器。而且, 在需要很大的脉冲能量的情况下, 也可以在第2放大器之后设置第3放大器。另外, 在能够允许伴随脉冲光的啁啾量 (GDD) 的变化的脉冲能量的变动的情况下, 也可以省略第2光纤放大器26。在该情况下, 在以下的说明中, 只要将第2光纤放大器26的输出理解为第1光纤放大器25的输出即可。

[0056] 准直透镜29使从第2光纤放大器26输出的脉冲光变为平行。压缩器31对从第2光纤放大器26输出且透射过准直透镜29的脉冲光的脉冲时间宽度进行压缩, 射出傅立叶变换极限脉冲即脉冲光PL。

[0057] 例如如图7以及图8所示, 压缩器31具有输出用反射镜32、第1衍射光栅33和第2衍射光栅34的衍射光栅对、以及屋脊反射镜35。透射过准直透镜29的脉冲光从输出用反射镜32通过向与光轴垂直的-y方向偏离的位置。通过了输出用反射镜32的脉冲光通过第1衍射光栅33和第2衍射光栅34而在空间上色散。被第1衍射光栅33和第2衍射光栅34色散的脉冲光被屋脊反射镜35反射, 并按照第2衍射光栅34和第1衍射光栅33的顺序返回。按照第2衍射光栅34和第1衍射光栅33的顺序返回来的脉冲光被屋脊反射镜35向+y方向偏移, 因此, 在输出用反射镜32发生反射而向外部 (第1反射镜11) 射出。这种压缩器31具有负色散 ($GDD < 0$), 通过改变第1衍射光栅33与第2衍射光栅34的间隔, 能够使压缩器31的色散变化。

[0058] 图9示出从图6示出的两级构成的放大器 (第1光纤放大器25以及第2光纤放大器26) 输出的脉冲光的脉冲时间宽度的压缩特性。图9示出的图表的横轴表示在第1光纤放大器25以及第2光纤放大器26之后配置的具有衍射光栅对的压缩器31的色散量 ($ps^2 = 10^6 fs^2$), 纵轴表示脉冲光的脉冲时间宽度 (fs)。图9示出的图表的▲标记表示第1光纤放大器25中的第1泵浦LD27的泵浦电流为600mA的情况下的压缩特性。图9示出的图表的■标记表示第1光纤放大器25中的第1泵浦LD27的泵浦电流为1000mA的情况下的压缩特性。此外, 在第1光纤放大器25中的第1泵浦LD27的泵浦电流为600mA、1000mA任一者的情况下, 第2光纤放大器26中的第2泵浦LD28的泵浦电流均为固定的。在第1光纤放大器25中的第1泵浦LD27的泵浦电流为600mA时, 用于得到最小的脉冲时间宽度的压缩器31的色散量为 $-0.163ps^2$, 即, 脉冲光的啁啾量 (GDD) 为 $+0.163ps^2$ 。在第1光纤放大器25中的第1泵浦LD27的泵浦电流为1000mA时, 用于得到最小的脉冲时间宽度的压缩器31的色散量为 $-0.148ps^2$, 即, 脉冲光的啁啾量 (GDD) 为 $+0.148ps^2$ 。由此可知, 通过使第1光纤放大器25中的第1泵浦LD27的泵浦电流在600mA ~ 1000mA的范围变化, 能够使从两级构成的放大器 (第1光纤放大

器25以及第2光纤放大器26)输出的脉冲光的啁啾量(GDD)仅变化 $0.015\text{ps}^2=15000\text{fs}^2$ 。

[0059] 另外,在第1光纤放大器25中的第1泵浦LD27的泵浦电流为600mA时,第2光纤放大器26的输出为477mW。在第1光纤放大器25中的第1泵浦LD27的泵浦电流为1000mA时,第2光纤放大器26的输出为537mW。在该实验中,由于将第2光纤放大器26中的第2泵浦LD28的泵浦电流设为固定,所以第2光纤放大器26的输出稍微变动,但通过调节第2泵浦LD28的泵浦电流,也能够将第2光纤放大器26的输出保持为固定的范围。另外,在第1光纤放大器25中的第1泵浦LD27的泵浦电流为600mA、1000mA任一者的情况下,脉冲光的最小的脉冲时间宽度几乎都相同($\sim 115\text{fs}$)。如上所述,根据图6示出的两级构成的放大器(第1光纤放大器25以及第2光纤放大器26),能够一边使脉冲光的脉冲能量以及压缩后的最小的脉冲时间宽度保持为大致固定、一边仅使脉冲光的啁啾量(GDD)变化。

[0060] 此外,在图6示出的两级构成的放大器(第1光纤放大器25以及第2光纤放大器26)的例子中, $\Delta\text{GDD}\sim 15000\text{fs}^2$ 、 $\Omega\sim 0.02\text{rad/fs}$ (与 $\sim 115\text{fs}$ 的脉冲光对应),因此,根据前述的式(3),成为 $\Delta z\sim 3\times z_R$ 。如利用前述的式(2)说明的那样, z_R 使用根据衍射光栅12的色散(或者、线密度、入射角)、准直透镜13的焦点距离 f_c 等决定的系数 α 、物镜17的焦点距离 f 等来设定。假设若设定为 $z_R=10\mu\text{m}$,则产生时间聚焦的 z 方向上的位置的变化 Δz 成为 $30\mu\text{m}$ 。即,在上述例子中,通过在600mA与1000mA之间调制第1泵浦LD27的泵浦电流,能够使产生时间聚焦的位置向光轴方向(z 方向)变化 $30\mu\text{m}$ 地进行扫描。

[0061] 在第1光纤放大器25以及第2光纤放大器26为铟添加光纤放大器(EDFA)或者镱添加光纤放大器(YDFA)的情况下,虽然也会根据芯径、泵浦状态而不同,但相对于第1泵浦LD27以及第2泵浦LD28的激发光(泵浦光)的调制的增益的响应(即,相对于泵浦电流的调制的增益的响应)大多数情况下达到 $\sim 10\text{kHz}$ 。也就是说,能够以 $\sim 10\text{kHz}$ 的高速使第1光纤放大器25以及第2光纤放大器26的增益变化。基于上述的实验结果,意味着能够使脉冲光的啁啾量(GDD)在 $\sim 10\text{kHz}$ 左右变化。根据该方法,与改变棱镜的位置等的机械方法相比,能够简单地使脉冲光的啁啾量(GDD)高速变化。像这样,通过使第1泵浦LD27以及第2泵浦LD28的泵浦电流高速调制,能够使第1光纤放大器25以及第2光纤放大器26的增益(放大率)高速变化,由此,能够使脉冲光的啁啾量(GDD)高速变化,使产生时间聚焦的位置高速变化,能够高速进行光轴方向(z 方向)的扫描。

[0062] 接下来,说明使用了以上述方式构成的光加工装置1的光学装置10的、利用脉冲光的扫描方法。图10是示出利用脉冲光的扫描方法的流程的流程图。首先,通过光源单元20的振荡器22产生脉冲光(步骤ST1)。此时,振荡器22产生作为傅立叶变换极限脉冲的脉冲光。

[0063] 接下来,利用第1光纤放大器25以及第2光纤放大器26对脉冲光进行放大(步骤ST2)。从振荡器22产生的脉冲光透射第1光隔离器23,并入射至第1光纤放大器25。第1光纤放大器25对从振荡器22产生的脉冲光进行放大。从第1光纤放大器25输出的脉冲光透射第2光隔离器24,并入射至第2光纤放大器26。第2光纤放大器26对从第1光纤放大器25输出的脉冲光进行放大。从第2光纤放大器26输出的脉冲光透射准直透镜29而变为平行,并入射至压缩器31。压缩器31对透射过准直透镜29的脉冲光的脉冲时间宽度进行压缩,射出傅立叶变换极限脉冲即脉冲光PL。

[0064] 接下来,利用衍射光栅12使脉冲光色散(步骤ST3)。从光源单元20的压缩器31射出的脉冲光PL被第1反射镜11反射而入射至衍射光栅12。衍射光栅12通过衍射现象使被第1反

射镜11反射的脉冲光PL色散。在衍射光栅12中色散后的脉冲光PL透射准直透镜13而变为平行,并入射至第2反射镜14。此时,利用衍射光栅12和准直透镜13,产生时间聚焦所需的、脉冲光PL的空间啁啾。

[0065] 接下来,利用物镜17使脉冲光聚集(步骤ST4)。被第2反射镜14反射的脉冲光PL透射二向色镜15并入射至物镜17。物镜17相对于工件W聚集透射过二向色镜15的脉冲光PL。此时,通过时间聚焦的效果使脉冲光PL的脉冲时间宽度变小,在工件W的被加工面重现入射至衍射光栅12时的原本的脉冲时间宽度。例如,即使将脉冲光PL的聚光半径 w 设为 $50\mu\text{m}$ 左右,通过时间聚焦的效果,也能够提高光加工装置1的光轴方向(z 方向)上的分辨率,能够相对于工件W进行除去加工等的精细加工。另外,在工件W的材料为透明的树脂、玻璃的情况下,通过时间聚焦的效果,能够相对于工件W的内部进行精细加工。此外,如上所述,通过物镜17聚集的脉冲光PL的脉冲时间宽度通过产生时间聚焦而成为在入射至衍射光栅12时的脉冲光PL的脉冲时间宽度。这包括如下的情况:通过物镜17聚集的脉冲光PL的脉冲时间宽度不仅变得与入射至衍射光栅12时的脉冲光PL的脉冲时间宽度(完全)相同,而且与入射至衍射光栅12时的脉冲光PL的脉冲时间宽度也大致相同的情况。

[0066] 然后,使产生时间聚焦的位置在物镜17的光轴方向上变化来进行扫描(步骤ST5)。此时,通过对第1泵浦LD27以及第2泵浦LD28的泵浦电流进行调制,使第1光纤放大器25以及第2光纤放大器26的放大率变化。由此,使脉冲光PL的啁啾量(GDD)变化,使产生时间聚焦的位置在物镜17的光轴方向上变化来进行光轴方向(z 方向)上的扫描。此外,在相对于工件W连续照射来自光学装置10的脉冲光PL的状态下,上述的产生脉冲光的步骤(ST1)、对脉冲光进行放大的步骤(ST2)、使脉冲光色散的步骤(ST3)、聚集脉冲光的步骤(ST4)、以及进行扫描的步骤(ST5)分别并行进行。

[0067] 根据第1实施方式,光加工装置1的光学装置10具有对脉冲光进行放大的第1光纤放大器25以及第2光纤放大器26、使脉冲光色散的衍射光栅12、对在衍射光栅12中色散后的脉冲光进行聚集的物镜17,能够分别独立地变更第1光纤放大器25以及第2光纤放大器26的放大率。此外,利用物镜17聚集的脉冲光的脉冲时间宽度通过产生时间聚焦而成为在入射至衍射光栅12时的脉冲光的脉冲时间宽度。如上所述,通过高速调制第1泵浦LD27的泵浦电流,能够使第1光纤放大器25的放大率高速变化,因此,能够使脉冲光的啁啾量(GDD)高速变化,能够使产生时间聚焦的位置(z 方向的位置)高速变化而高速地进行光轴方向上的扫描。另外,通过时间聚焦的效果,光加工装置1的光轴方向(z 方向)上的分辨率变高,因此,通过使产生时间聚焦的位置(z 方向的位置)高速变化,能够相对于工件W高速地进行除去加工等的精细加工。另外,通过对第2泵浦LD28的泵浦电流进行适当地控制,来调节第2光纤放大器26的放大率,能够一边使脉冲光的啁啾量(GDD)变化,一边将脉冲光的输出的变化抑制在固定的范围内。

[0068] 另外,也可以在第2光纤放大器26的输入侧或者输出侧设置声光调制器(AOM)等的光量调节器对脉冲光的脉冲能量进行控制。由此,能够一边使脉冲光的啁啾量(GDD)变化,一边减小脉冲光的脉冲能量的变动。

[0069] 另外,也可以设有对从第2光纤放大器26输出的脉冲光的脉冲时间宽度进行压缩的压缩器31。由此,能够得到傅立叶变换极限脉冲即脉冲光。

[0070] 在上述的第1实施方式中设有振荡器22,但不限于此。例如,也可以不设置振荡器

22,而是设为由第1光纤放大器25对来自设于光加工装置1的外部的脉冲光发生器的脉冲光进行放大。在该情况下,能够省略上述的使脉冲光产生的步骤(ST1)。

[0071] 在上述的第1实施方式中,设有通过衍射现象使脉冲光色散的衍射光栅12,但不限于此。作为使脉冲光色散的色散元件,也可以取代衍射光栅12而设有棱镜等。此外,利用色散元件使脉冲光色散是指,根据脉冲光的波长将脉冲光的光路在空间上分离。

[0072] 在上述的第1实施方式中,通过调制第1泵浦LD27以及第2泵浦LD28的泵浦电流,改变了第1光纤放大器25以及第2光纤放大器26的放大率,但不限于此。例如,也可以通过利用设于第1光纤放大器25的输入侧的声光调制器(AOM)等控制输入脉冲光的光量,来有效地变更第1光纤放大器25的放大率,使脉冲光的啁啾量(GDD)变化。另外,还可以设为通过设于第2光纤放大器26的输入侧、或者输出侧的声光调制器(AOM)等控制脉冲光的光量,来有效地变更第2光纤放大器26的放大率,将第2光纤放大器26的输出保持在固定的范围内。

[0073] 在上述的第1实施方式中,光源单元20具有两级构成的放大器(第1光纤放大器25以及第2光纤放大器26),但不限于此,也可以只具有一个放大器。例如图11所示,光源单元70也可以具有振荡器22、光隔离器73、光纤放大器75、准直透镜29、压缩器31。此外,光隔离器73与第1实施方式的第1光隔离器23同样地构成。光纤放大器75与第1实施方式的第1光纤放大器25同样地构成。另外,准直透镜29使从光纤放大器75输出的脉冲光变为平行。在光纤放大器75设有泵浦LD77。泵浦LD77与第1实施方式的第1泵浦LD27同样地构成,通过改变泵浦LD77的泵浦电流,能够变更光纤放大器75的放大率(即,输出)。另外,也可以不设置振荡器22,而设为使光纤放大器75对来自设于光加工装置的外部的脉冲光发生器的脉冲光进行放大。

[0074] 在上述的第1实施方式中,压缩器31使用衍射光栅对(光栅对)来构成,但不限于此,也可以使用棱镜对来构成。例如图12所示,压缩器131可以具有输出用反射镜32、第1棱镜133和第2棱镜134的棱镜对、屋脊反射镜35。透射过准直透镜29的脉冲光从输出用反射镜32通过向与光轴垂直的-y方向偏离的位置。通过了输出用反射镜32的脉冲光利用第1棱镜133和第2棱镜134而在空间上色散。被第1棱镜133和第2棱镜134色散的脉冲光被屋脊反射镜35反射,并按照第2棱镜134和第1棱镜133的顺序返回。按照第2棱镜134和第1棱镜133的顺序返回的脉冲光利用屋脊反射镜35而向+y方向偏移,因此,被输出用反射镜32反射而向外部(第1反射镜11)射出。这种压缩器131具有负色散($GDD < 0$),但通过改变第1棱镜133与第2棱镜134的间隔,能够使压缩器131的色散变化。

[0075] 在上述的第1实施方式中,压缩器31设于光源单元20,但不限于此,压缩器也可以不设置在光源单元。例如图13所示,变形例的光学装置110具有光源单元120、第1衍射光栅111和第2衍射光栅112的衍射光栅对、反射镜114、物镜117。光源单元120具有振荡器122、光隔离器123、光纤放大器125、准直透镜129。

[0076] 振荡器122利用锁模光纤激光器来构成。振荡器122产生脉冲光,该脉冲光为脉冲时间宽度为100fs~1ps左右的傅立叶变换极限脉冲。光隔离器123设在振荡器122与光纤放大器125之间。光隔离器123仅使正向方向行进的脉冲光透射,遮挡向相反方向行进的光。

[0077] 光纤放大器125使用正常色散的铒添加光纤放大器(EDFA)来构成。光纤放大器125也可以使用正常色散的镱添加光纤放大器(YDFA)来构成。在光纤放大器125设有泵浦LD(激光二极管)127。泵浦LD127使激发光(泵光)入射至光纤放大器125。光纤放大器125利用从泵

浦LD127入射的激发光,对振荡器122产生的脉冲光进行放大。通过改变泵浦LD127的泵浦电流,能够变更光纤放大器125的放大率(即,输出)。准直透镜129使从光纤放大器125输出的脉冲光变为平行。此外,光纤放大器也可以为前述的第1实施方式的两级构成的放大器(第1光纤放大器25以及第2光纤放大器26)。另外,也可以不设置振荡器122,而设为使光纤放大器对来自设于光加工装置的外部的脉冲光发生器的脉冲光进行放大。

[0078] 光源单元120经由光纤放大器125射出具有正啁啾的脉冲光PL。将从光源单元120射出的脉冲光PL的GDD设为 D_p , $D_p > 0$ 。从光源单元120射出的脉冲光PL通过第1衍射光栅111与第2衍射光栅112而在空间上色散。将第1衍射光栅111与第2衍射光栅112的衍射光栅对中的色散设为 D_g 。此时,以成为 $D_g = -D_p$ 的方式对第1衍射光栅111与第2衍射光栅112的间隔进行调节。在从第1衍射光栅111与第2衍射光栅112的衍射光栅对通过的脉冲光PL产生空间啁啾(spatial chirp)。从该衍射光栅对通过的脉冲光PL在空间上的频率成分分离,因此,虽然脉冲光PL的GDD为0(即, $D_p + D_g = 0$),但不会成为傅立叶变换极限脉冲的脉冲时间宽度。在通常的具有衍射光栅对的压缩器中,脉冲光两次通过衍射光栅对(double pass),因此,不产生空间啁啾,得到傅立叶变换极限脉冲的脉冲时间宽度。

[0079] 从第1衍射光栅111和第2衍射光栅112的衍射光栅对通过的脉冲光PL被反射镜114反射,利用物镜117相对于工件W聚光。此外,也可以在反射镜114与物镜117之间设置上述的第1实施方式的二向色镜(未图示)。通过利用物镜117聚集从衍射光栅对(第1衍射光栅111和第2衍射光栅112)通过而产生了空间啁啾的脉冲光PL,得到时间聚焦的效果。也就是说,刚透射过物镜117的脉冲光PL的脉冲时间宽度最大,随着接近工件W(物镜117的焦点面),脉冲光PL的脉冲时间宽度变小,在工件W的被加工面(物镜117的焦点面)处脉冲光PL的脉冲时间宽度最小。

[0080] 在变形例的光学装置110中,可以说第1衍射光栅111与第2衍射光栅112的衍射光栅对消除了从光源单元120射出的脉冲光PL的GDD,同时,对从光源单元120射出的脉冲光PL赋予时间聚焦所需的空间啁啾。由此,与上述的第1实施方式同样地,通过高速调制泵浦LD127的泵浦电流,能够使光纤放大器125的放大率高速变化,因此,能够使脉冲光的啁啾量(GDD)高速变化,能够使产生时间聚焦的位置(z方向的位置)高速变化。另外,通过时间聚焦的效果使光加工装置的光轴方向(z方向)上的分辨率变高,因此,使产生时间聚焦的位置(z方向的位置)高速变化,由此,能够相对于工件W高分辨率且高速地进行除去加工等的精细加工。

[0081] 图14示出从变形例的光学装置110的光纤放大器125输出的脉冲光的脉冲时间宽度的压缩特性。图14示出的图表的横轴表示在光纤放大器125之后配置的衍射光栅对(第1衍射光栅111与第2衍射光栅112)的作为压缩器的色散量($f s^2$),纵轴表示脉冲光的脉冲时间宽度($f s$)。在此,在实验性地获取图14的压缩特性时采用两次通过压缩器的构成。图14示出的图表的◆标记表示光纤放大器125中的泵浦LD127的泵浦电流为1.0A的情况下的压缩特性。图14示出的图表的■标记表示光纤放大器125中的泵浦LD127的泵浦电流为2.8A的情况的压缩特性。图14示出的图表的▲标记表示光纤放大器125中的泵浦LD127的泵浦电流为5.0A的情况的压缩特性。

[0082] 在光纤放大器125中的泵浦LD127的泵浦电流为1.0A时,光纤放大器125的输出为122mW。在光纤放大器125中的泵浦LD127的泵浦电流为2.8A时,光纤放大器125的输出为

918mW。在光纤放大器125中的泵浦LD127的泵浦电流为5.0A时,光纤放大器125的输出为1970mW。从图14可知,通过使光纤放大器125的输出在100mW~2000mW的范围变化,能够使从光纤放大器125输出的脉冲光的啾啾量(GDD)仅变化约 48000fs^2 。另外,在光纤放大器125中的泵浦LD127的泵浦电流为1.0A、2.8A、5.0A的任一者的情况下,脉冲光的最小的脉冲时间宽度都几乎相同($\sim 90\text{fs}$)。以上,根据图13示出的变形例,能够将脉冲光的压缩后的最小的脉冲时间宽度保持大致固定,并且使脉冲光的啾啾量(GDD)变化。

[0083] 此外,在变形例的光学装置110中, $\Delta\text{GDD}\sim 48000\text{fs}^2$ 、 $\Omega\sim 0.026\text{rad/fs}$ (与 $\sim 90\text{fs}$ 的脉冲光对应),因此,根据前述的式(3)而成为 $\Delta z\sim 16\times z_R$ 。与上述的第1实施方式同样地,假设设定为 $z_R=10\mu\text{m}$,则产生时间聚焦的z方向上的位置的变化 Δz 为 $160\mu\text{m}$ 。

[0084] 接下来,参照图15说明本申请的第2实施方式的显微镜装置。如图15所示,第2实施方式的显微镜装置201具有载物台205、光学装置210、检测单元260。显微镜装置201也被称为双光子激发荧光显微镜或者多光子激发荧光显微镜。在载物台205的上表面载置有样本SA。样本SA例如可以为细胞。

[0085] 检测单元260具有聚光透镜261、检测部262。而且,检测单元260包括光学装置210的二向色镜215、电流镜216、216、物镜217。聚光透镜261聚集来自被二向色镜215反射的样本SA的荧光。检测部262使用光电倍增管(photomultiplier tube:PMT)、光电二极管(PD)等来构成。检测部262对来自利用聚光透镜261聚集的样本SA的荧光进行检测,输出检测信号。基于由检测部262检测到的检测信号,利用未图示的图像处理部进行图像处理,利用基于图像处理部的图像处理而得到的样本SA的图像被显示于未图示的显示装置。

[0086] 接下来,说明第2实施方式的光学装置210。光学装置210相对于样本SA聚集作为激发光的脉冲光。脉冲光的脉冲时间宽度例如为飞秒(fs)级的时间宽度。如图15所示,光学装置210具有光源单元20、第1反射镜11、衍射光栅12、准直透镜13、第2反射镜14、二向色镜215、电流镜216、216、物镜217。光源单元20、第1反射镜11、衍射光栅12、准直透镜13、以及第2反射镜14为与第1实施方式的光源单元20、第1反射镜11、衍射光栅12、准直透镜13、以及第2反射镜14同样的构成,使用与第1实施方式相同的附图标记,并省略详细的说明。

[0087] 二向色镜215使入射至二向色镜215的脉冲光PL朝向电流镜216、216透射。另外,二向色镜215将经由物镜217以及电流镜216、216入射至二向色镜215的来自样本SA的荧光朝向检测单元260(聚光透镜261)反射。

[0088] 电流镜216、216使透射过二向色镜215的脉冲光PL朝向物镜217反射。另外,电流镜216、216使来自透射过物镜217的样本SA的荧光朝向二向色镜215反射。电流镜216、216通过使反射面的朝向变化,能够使脉冲光PL的行进方向变化。通过利用电流镜216、216使脉冲光PL的行进方向变化,能够在样本SA中的与物镜217的光轴垂直的平面(观察面)中进行扫描。电流镜216、216优选设在物镜217的光瞳的位置或者与光瞳共轭的位置。

[0089] 物镜217相对于样本SA聚集利用电流镜216、216反射的脉冲光PL。此外,衍射光栅12、样本SA(观察面)、检测部262彼此共轭。

[0090] 接下来,说明使用了以上述方式构成的显微镜装置201的光学装置210的、基于脉冲光的扫描方法。第2实施方式的扫描方法与在第1实施方式中说明的扫描方法相同,因此,与第1实施方式同样地参照图10来进行说明。首先,与第1实施方式同样地,使脉冲光产生(步骤ST1)。接下来,与第1实施方式同样地,对脉冲光进行放大(步骤ST2)。

[0091] 接下来,通过衍射光栅12使脉冲光色散(步骤ST3)。在第2实施方式中,光源单元20例如射出 $1\mu\text{m}$ 的波长范围的脉冲光PL,来作为激发光。从光源单元20射出的脉冲光PL利用第1反射镜11反射而入射至衍射光栅12。衍射光栅12利用衍射现象使利用第1反射镜11反射的脉冲光PL色散。在衍射光栅12中色散后的脉冲光PL透射准直透镜13而变为平行,并入射至第2反射镜14。此时,利用衍射光栅12与准直透镜13,产生时间聚焦所需的、脉冲光PL的空间啁啾。

[0092] 接下来,利用物镜217聚集脉冲光(步骤ST4)。由第2反射镜14反射的脉冲光PL透射二向色镜215且被电流镜216、216反射。被电流镜216、216反射的脉冲光PL入射至物镜217。物镜217相对于样本SA聚集由电流镜216、216反射的脉冲光PL。此外,利用物镜217聚集的脉冲光PL的脉冲时间宽度通过产生时间聚焦,而成为在入射至衍射光栅12时的脉冲光PL的脉冲时间宽度。这还包括如下的情况:通过该物镜217聚集的脉冲光PL的脉冲时间宽度不仅与在入射衍射光栅12时的脉冲光PL的脉冲时间宽度(完全)相同,还与入射至衍射光栅12时的脉冲光PL的脉冲时间宽度大致相同。

[0093] 然后,使产生时间聚焦的位置在物镜217的光轴方向上变化而进行扫描(步骤ST5)。此时,通过调制第1泵浦LD27以及第2泵浦LD28的泵浦电流,使第1光纤放大器25以及第2光纤放大器26的放大率变化。由此,使脉冲光PL的啁啾量(GDD)变化,使产生时间聚焦的位置在物镜217的光轴方向上变化来进行光轴方向(z方向)的扫描。另外,此时,通过利用电流镜216、216使脉冲光PL的行进方向变化,进行与物镜217的光轴垂直的方向(XY方向)上的扫描。此外,在相对于样本SA连续照射来自光学装置210的脉冲光PL的状态下,使上述脉冲光发生的步骤(ST1)、对脉冲光进行放大的步骤(ST2)、使脉冲光色散的步骤(ST3)、聚集脉冲光的步骤(ST4)、以及进行扫描的步骤(ST5)分别并行进行。

[0094] 通过作为激发光的脉冲光PL的照射,样本SA所包含的荧光物质被双光子激发,射出波长比激发光(脉冲光PL)短的荧光。此时,通过时间聚焦的效果使脉冲光PL的脉冲时间宽度变小,在样本SA的观察面(物镜217的焦点面)中重现入射至衍射光栅12时的原本的脉冲时间宽度。通过时间聚焦的效果,显微镜装置201的光轴方向(z方向)上的分辨率变高,因此,仅在物镜217的焦点附近的微小区域中产生双光子泵浦。因此,通过使产生时间聚焦的位置(z方向的位置)变化,能够进行光轴方向(z方向)上的扫描,通过与基于电流镜216、216的在与光轴垂直的方向上的扫描进行组合,能够生成样本SA的三维图像。

[0095] 此外,来自样本SA的荧光入射至物镜217。透射过物镜217的荧光被电流镜216、216反射,而入射至二向色镜215。入射至二向色镜215的荧光被该二向色镜215反射,入射至聚光透镜261。透射过聚光透镜261的荧光被聚集至检测部262。此外,衍射光栅12、样本SA(观察面)、检测部262彼此共轭。因此,通过构成为作为激发光的脉冲光PL被物镜217聚集至样本SA的观察面,能够使利用双光子泵浦发生的荧光中的、通过物镜217的荧光不泄漏地到达检测部262。

[0096] 根据第2实施方式,显微镜装置201的光学装置210具有:对脉冲光进行放大的第1光纤放大器25以及第2光纤放大器26;使脉冲光色散的衍射光栅12;使在衍射光栅12中色散后的脉冲光聚集的物镜217,能够变更第1光纤放大器25以及第2光纤放大器26的放大率。此外,利用物镜217聚集的脉冲光的脉冲时间宽度通过产生时间聚焦成为在入射至衍射光栅12时的脉冲光的脉冲时间宽度。与第1实施方式同样地,通过高速调制第1泵浦LD27的泵浦

电流,能够使第1光纤放大器25的放大率高速变化,因此,能够使脉冲光的啁啾量(GDD)高速变化,能够使产生时间聚焦的位置(z方向的位置)高速变化。另外,通过时间聚焦的效果,即使将脉冲光的聚光半径设为 $5 \sim 10\mu\text{m}$ 左右,显微镜装置201的光轴方向(z方向)上的分辨率也变高,因此,使产生时间聚焦的位置(z方向的位置)高速变化,由此能够高速地进行光轴方向(z方向)的扫描。因此,通过与基于电流镜216、216的与光轴垂直的方向的扫描组合,能够高速地生成样本SA的三维图像。

[0097] 另外,与第1实施方式同样地,也可以通过控制第2泵浦LD28的泵浦电流对第2光纤放大器26的放大率进行调节,由此,将从第2光纤放大器26输出的脉冲光的输出设为固定的范围内。或者,也可以在第2光纤放大器26的输入侧或者输出侧设置声光调制器(AOM)等的光量调节器,对脉冲光的脉冲能量进行控制。由此,能够使脉冲光的啁啾量(GDD)变化,并且减少脉冲光的脉冲能量的变动。

[0098] 另外,与第1实施方式同样地,也可以设置对第2光纤放大器26输出的脉冲光的脉冲时间宽度进行压缩的压缩器31。由此,能够得到傅立叶变换极限脉冲的脉冲光。

[0099] 在上述的第2实施方式中,与第1实施方式同样地,也可以不设置振荡器22,第1光纤放大器25对来自设于显微镜装置201的外部的脉冲光发生器的脉冲光进行放大。在该情况下,能够省略使上述的脉冲光发生的步骤(ST1)。

[0100] 在上述的第2实施方式中,与第1实施方式同样地,也可以作为使脉冲光色散的色散元件,取代衍射光栅12而设有棱镜等。

[0101] 在上述的第2实施方式中,与第1实施方式同样地,通过利用设于第1光纤放大器25的输入侧的声光调制器(AOM)等对输入脉冲光的光量进行控制,有效地变更第1光纤放大器25的放大率,使脉冲光的啁啾量(GDD)变化。另外,也可以利用设于第2光纤放大器26的输入侧、或者输出侧的声光调制器(AOM)等对脉冲光的光量进行控制,有效地变更第2光纤放大器26的放大率,将第2光纤放大器26的输出保持在固定的范围内。

[0102] 在上述的第2实施方式中,光源单元20也可以与第1实施方式同样地,不限于两级构成的放大器(第1光纤放大器25以及第2光纤放大器26),只具有一个放大器。

[0103] 在上述的第2实施方式中,压缩器31也可以与第1实施方式同样地,不限于衍射光栅对(光栅对),而使用棱镜对来构成。

[0104] 在上述的第2实施方式中,与第1实施方式同样地,压缩器31设于光源单元20,但不限于此,压缩器也可以不设置于光源单元。例如,显微镜装置201的光学装置也可以与第1实施方式的变形例的光学装置110同样构成。

[0105] 在上述的第2实施方式中,作为显微镜装置201的一例,例示并说明双光子激发荧光显微镜(多光子激发荧光显微镜),但不限于此,例如,可以为二次谐波发生(Second Harmonic Generation:SHG)显微镜、三次谐波发生(Third Harmonic Generation:THG)显微镜。

[0106] 附图标记说明

[0107] 1光加工装置(第1实施方式)

[0108] 10光学装置

[0109] 12衍射光栅13准直透镜

[0110] 17物镜

- [0111] 20光源单元
- [0112] 22振荡器(脉冲光发生器)
- [0113] 25第1光纤放大器26第2光纤放大器
- [0114] 27第1泵浦LD 28第2泵浦LD
- [0115] 31压缩器
- [0116] 110光学装置(变形例)
- [0117] 111第1衍射光栅112第2衍射光栅
- [0118] 117物镜
- [0119] 120光源单元
- [0120] 122振荡器(脉冲光发生器)
- [0121] 125光纤放大器
- [0122] 127泵浦LD
- [0123] 201显微镜装置(第2实施方式)
- [0124] 210光学装置217物镜
- [0125] PL脉冲光。

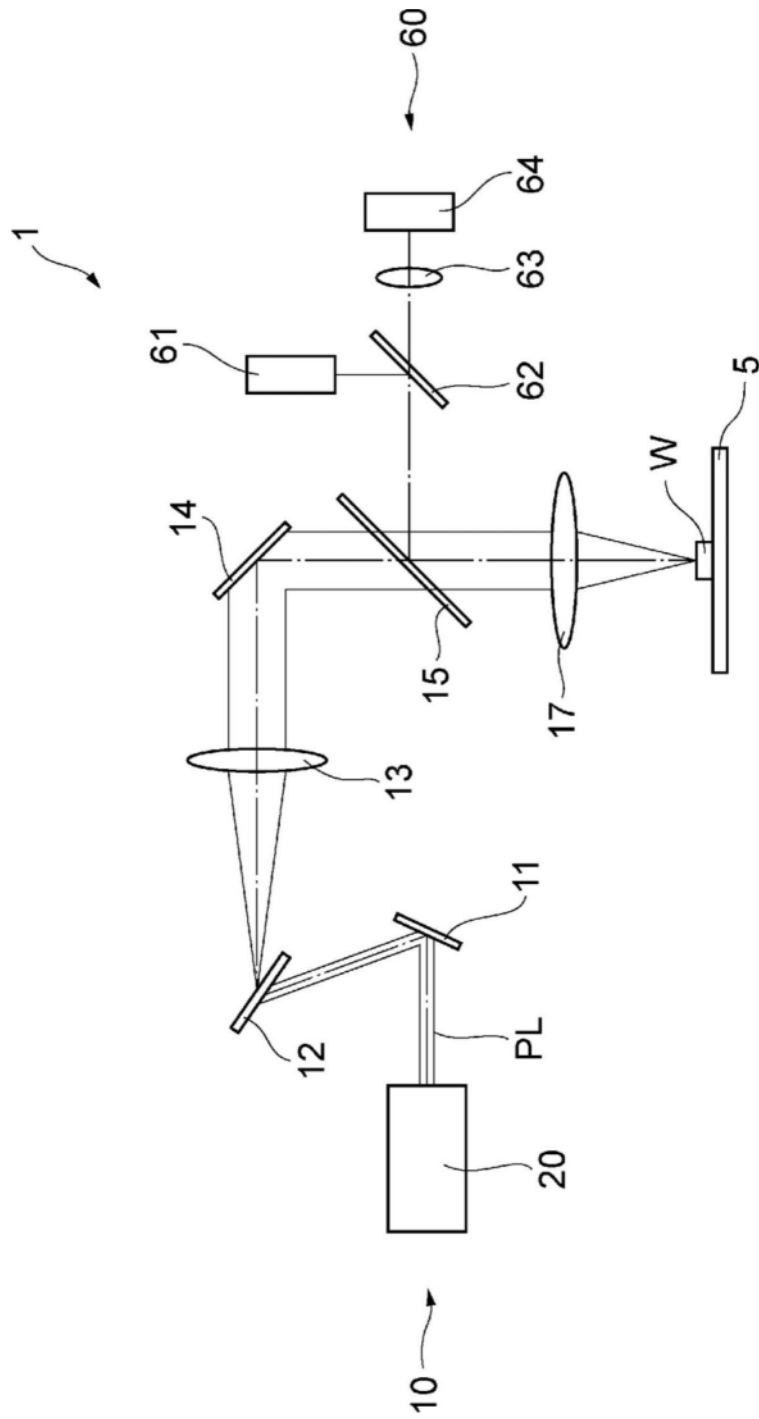


图1

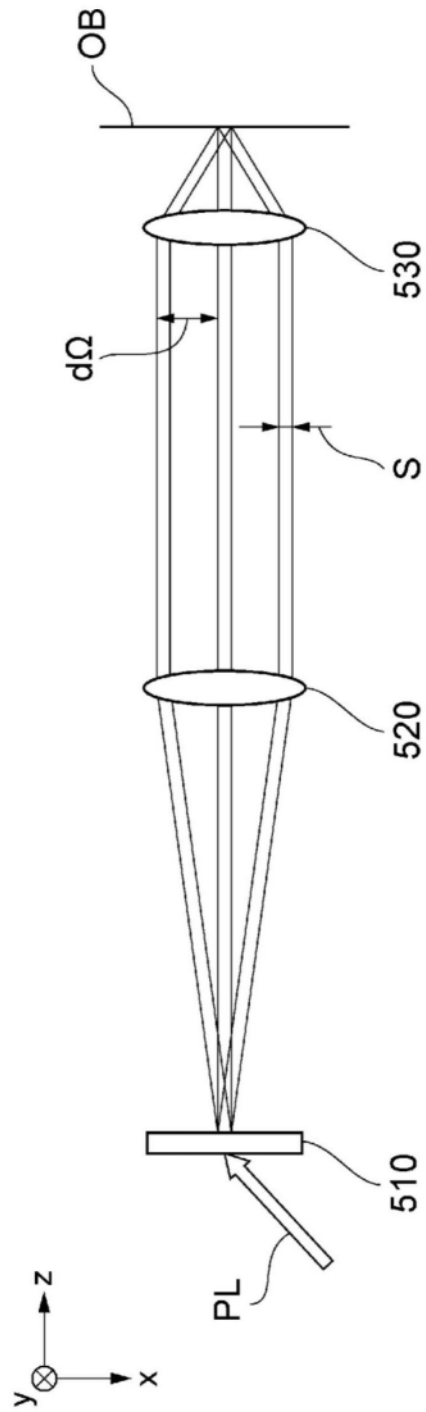


图2

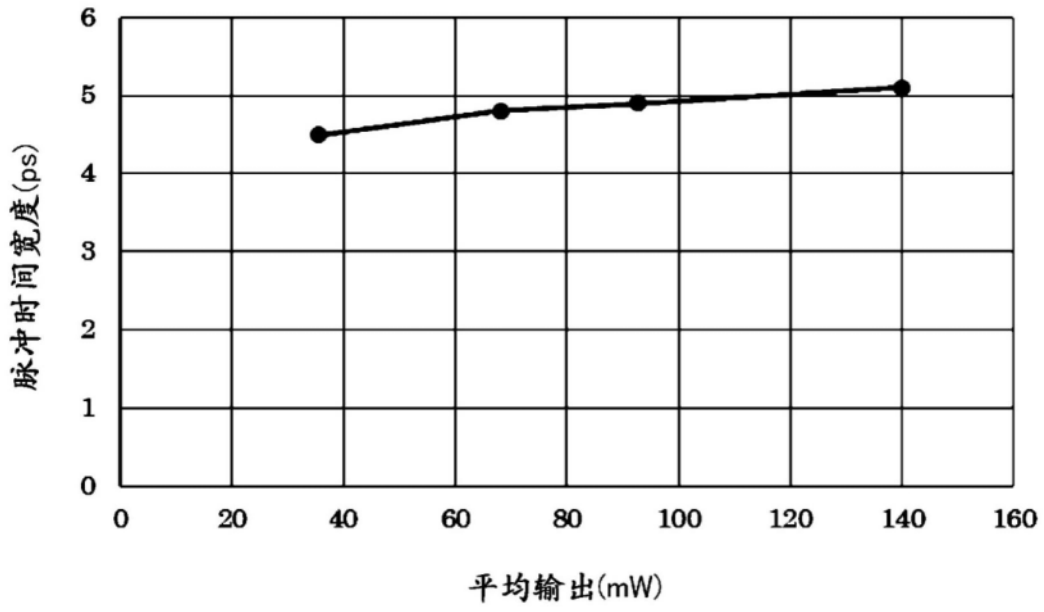


图3

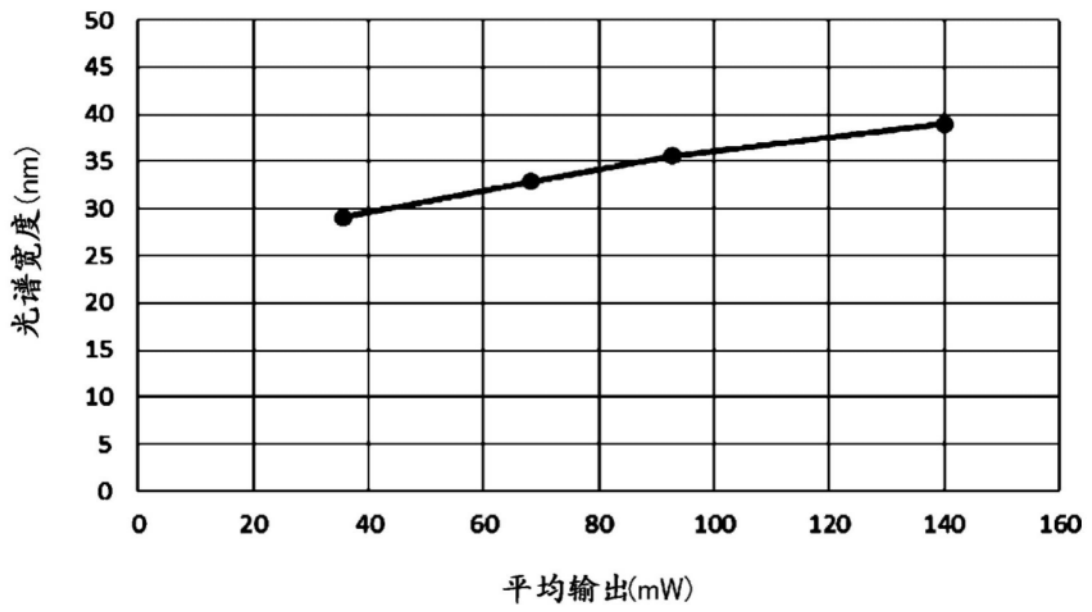


图4

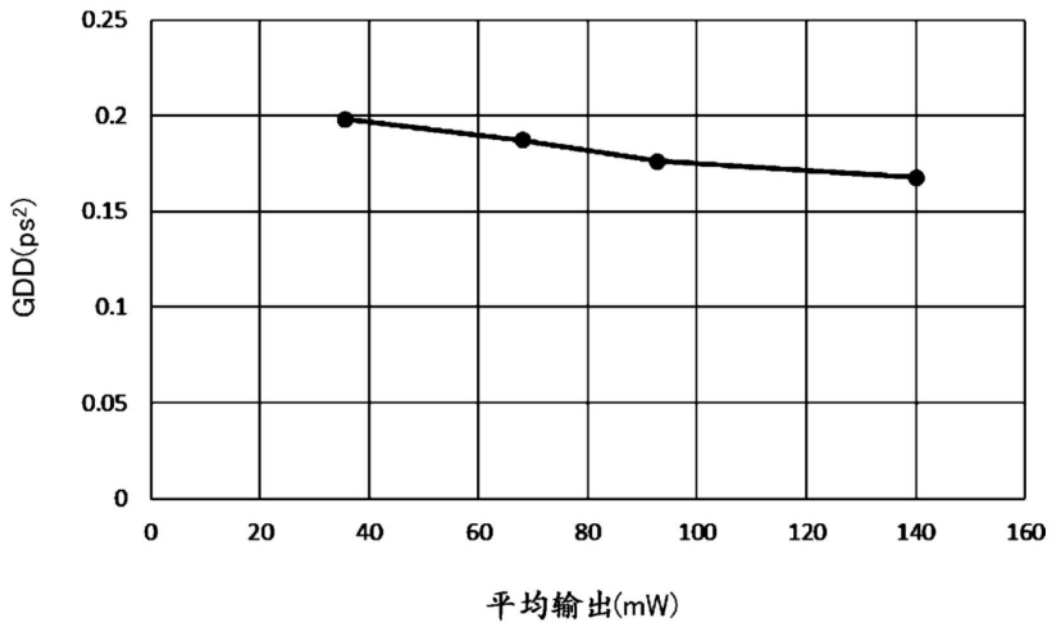


图5

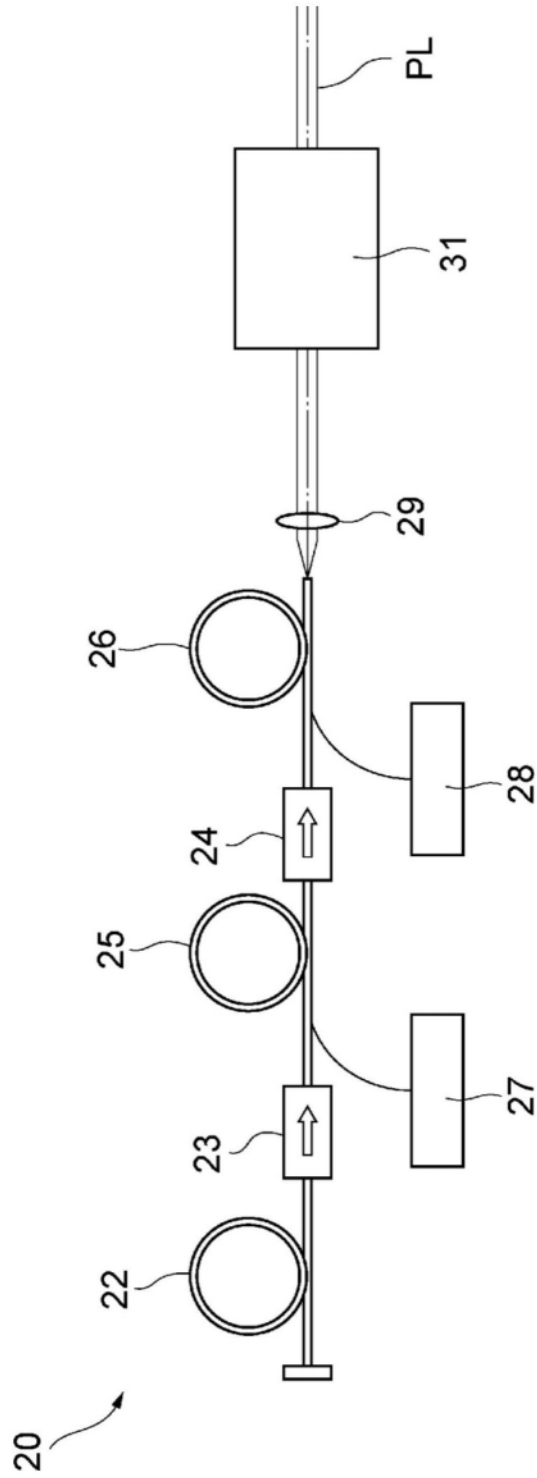


图6

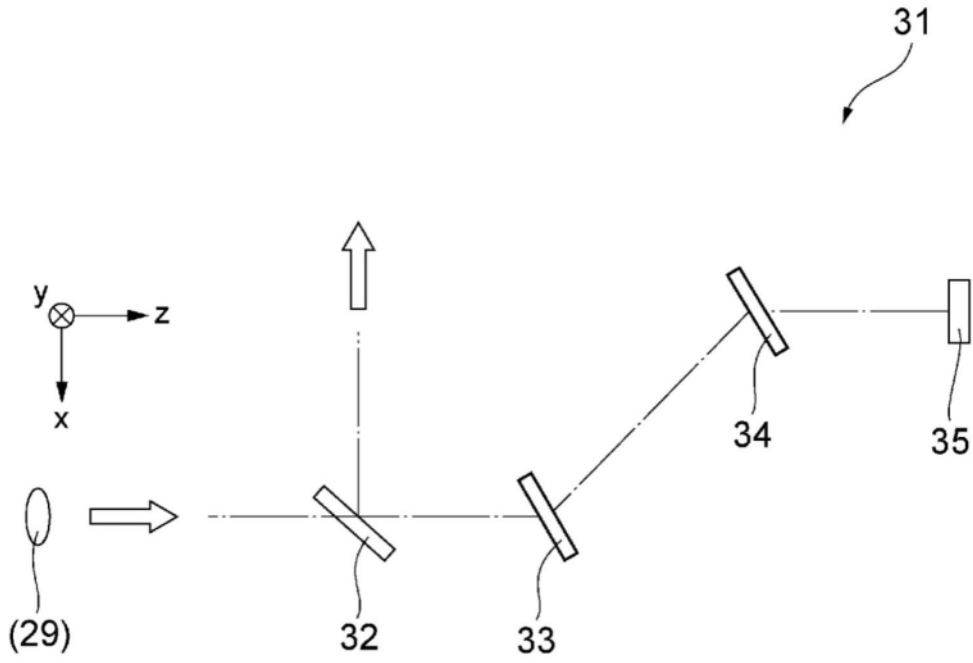


图7

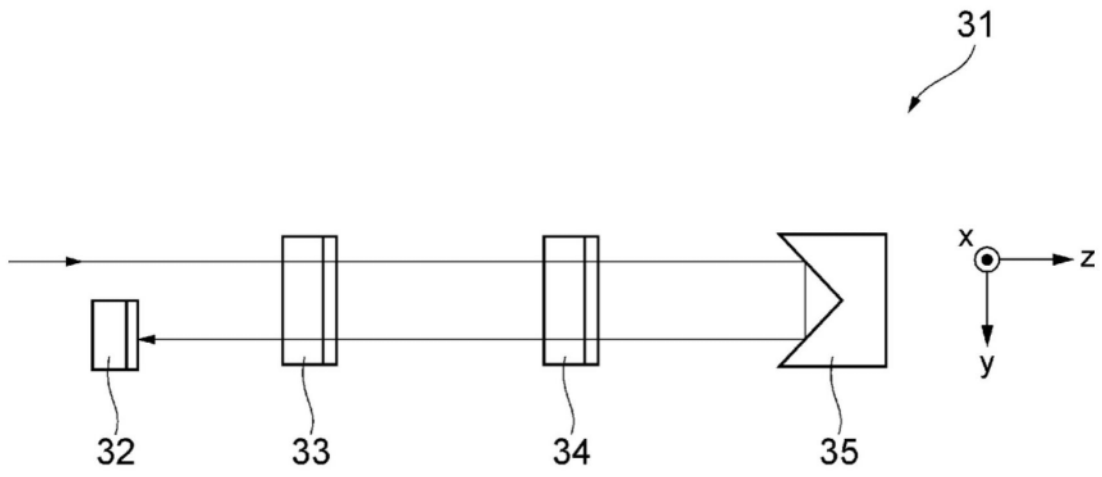


图8

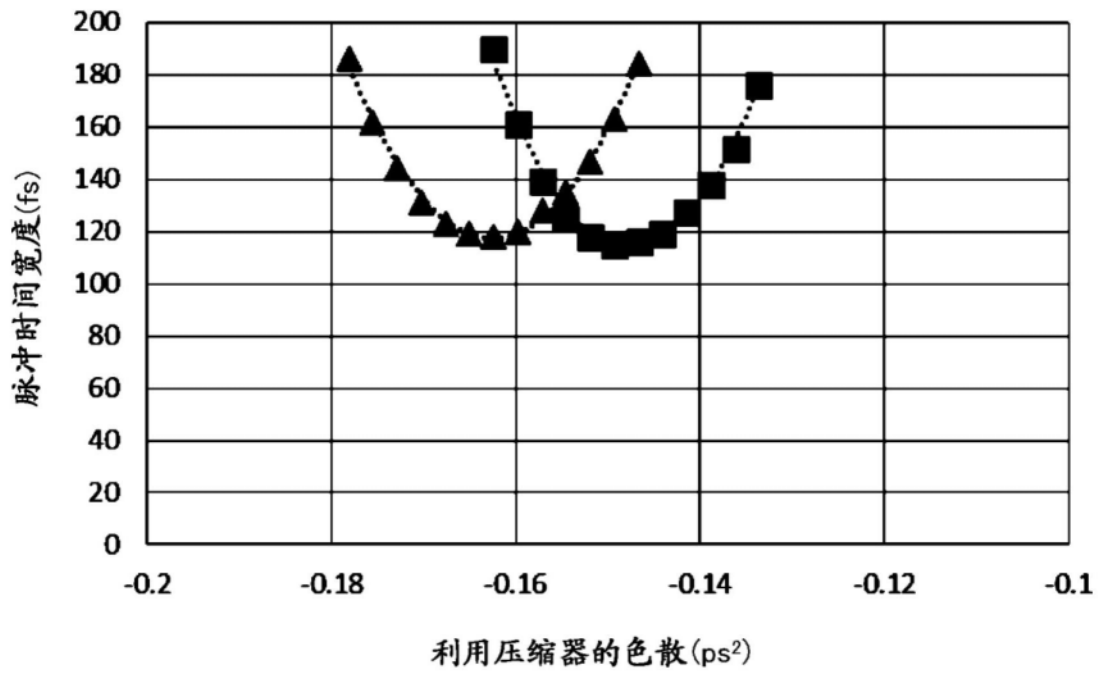


图9

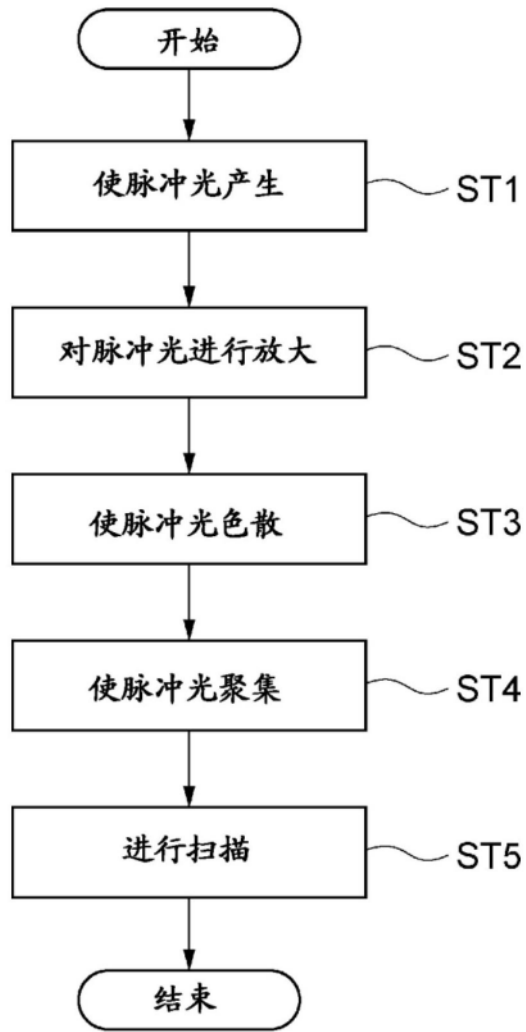


图10

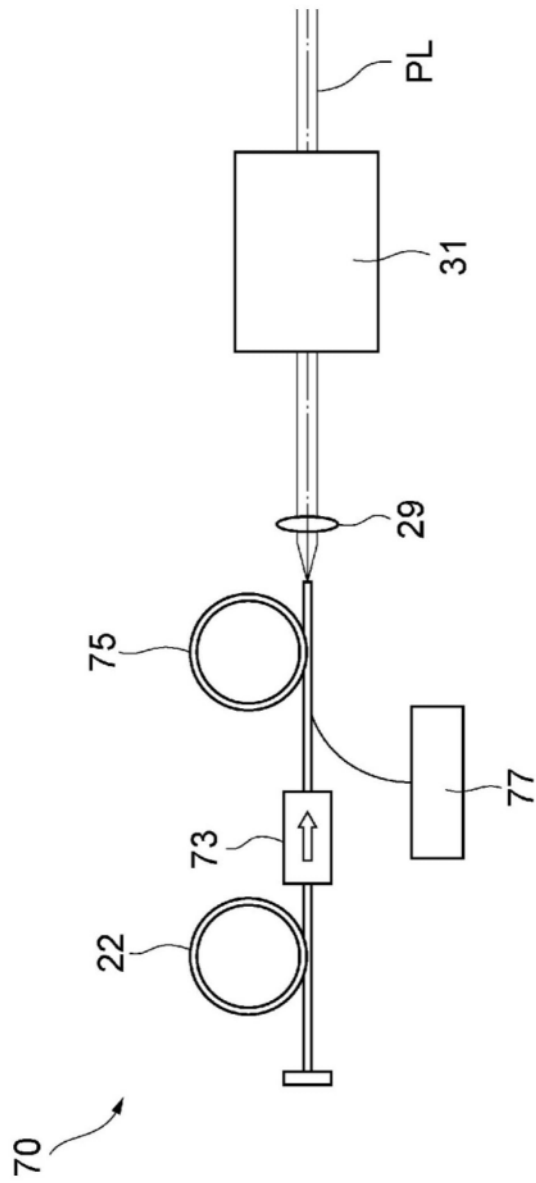


图11

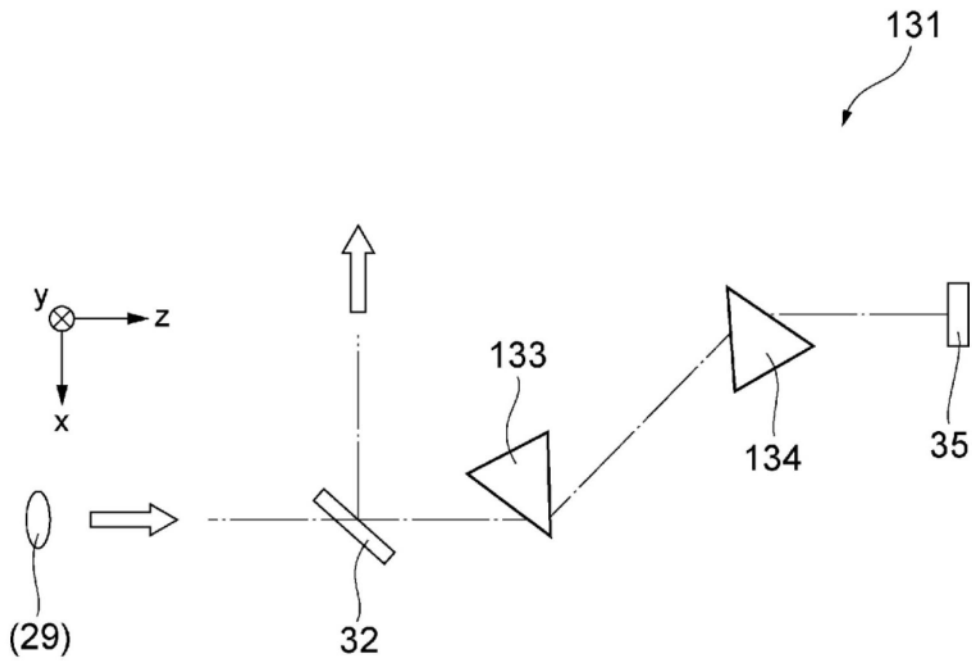


图12

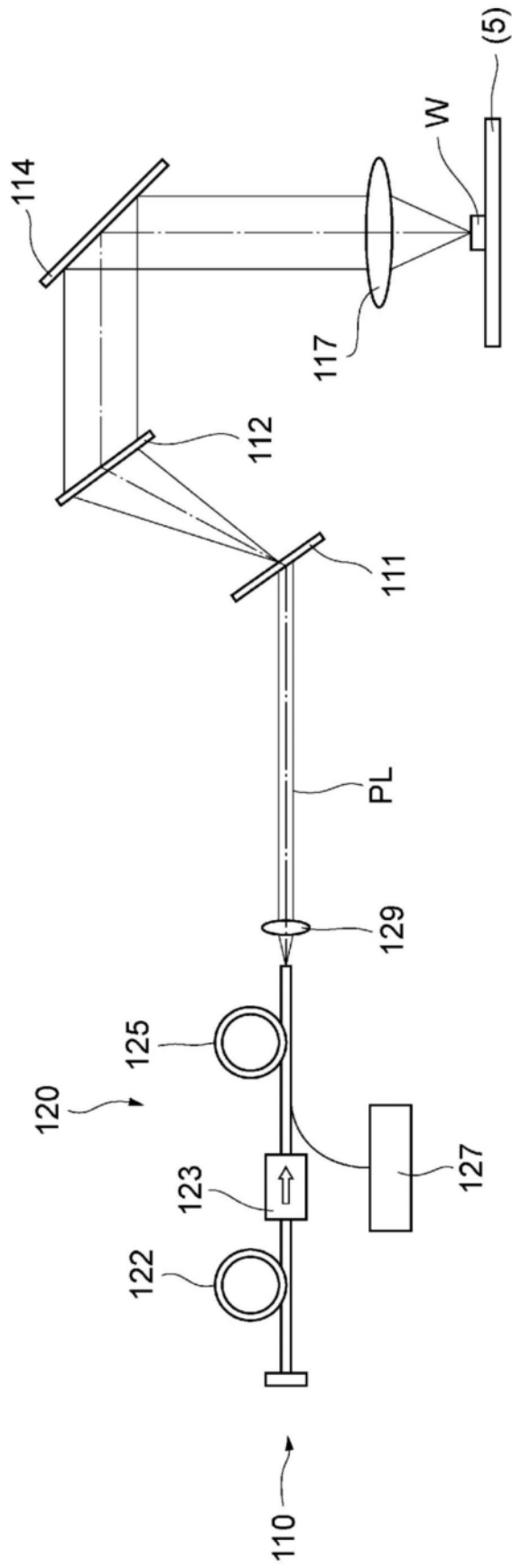


图13

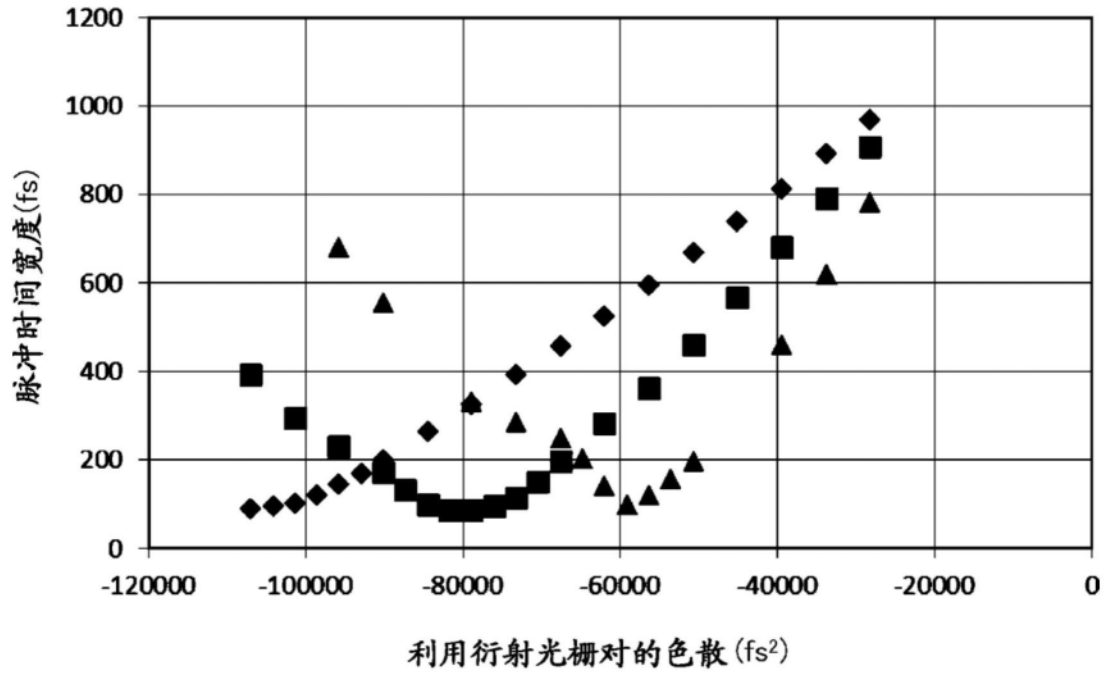


图14

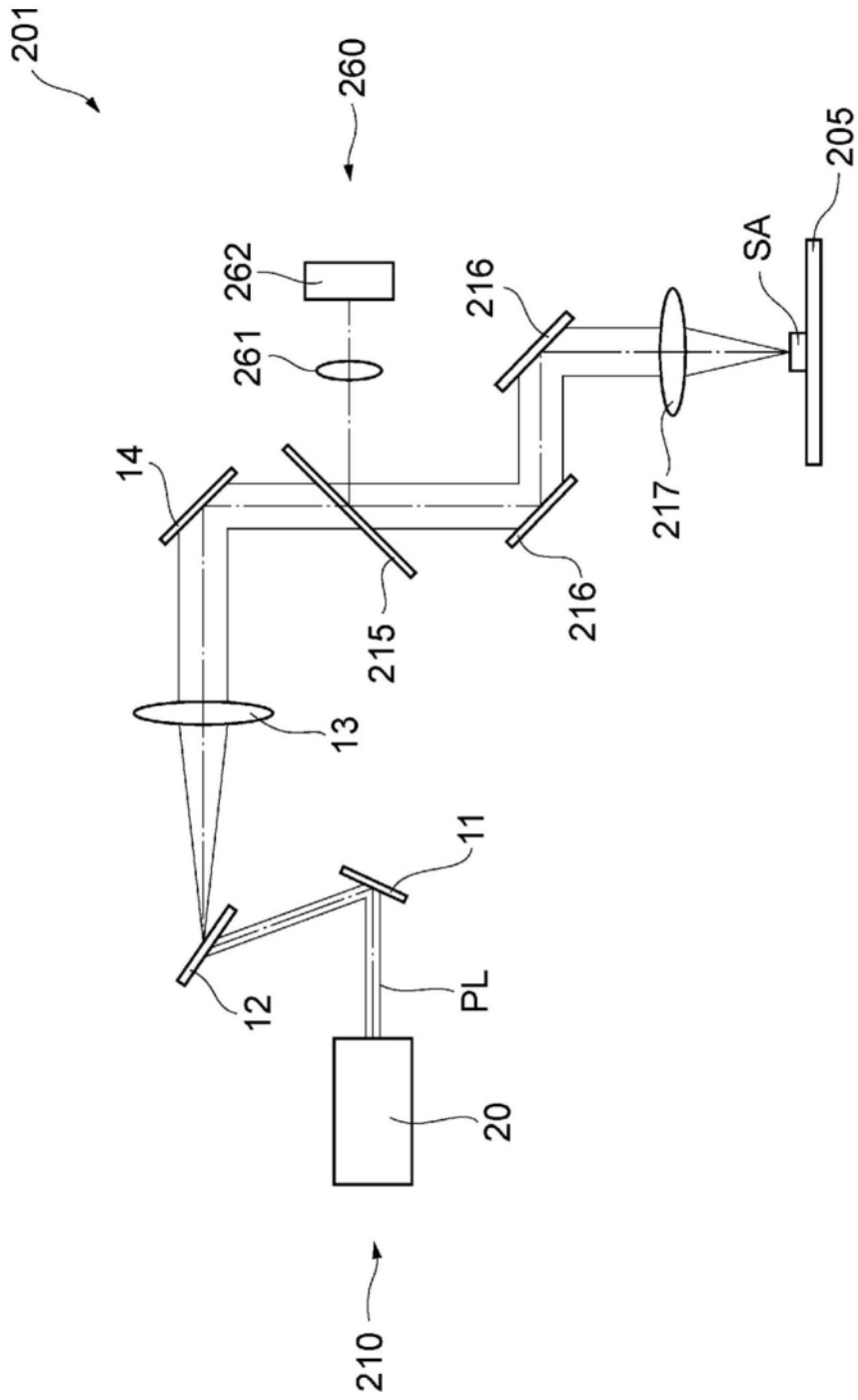


图15