



## (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109997075 B

(45) 授权公告日 2023.03.14

(21) 申请号 201780052222.X

(74) 专利代理机构 余姚德盛专利代理事务所

(22) 申请日 2017.08.04

(普通合伙) 33239

(65) 同一申请的已公布的文献号

专利代理人 郑洪成

申请公布号 CN 109997075 A

(51) Int.CI.

(43) 申请公布日 2019.07.09

G02F 1/35 (2006.01)

(30) 优先权数据

(56) 对比文件

62/379,639 2016.08.25 US

CN 101933201 A, 2010.12.29

15/664,176 2017.07.31 US

JP 2003042967 A, 2003.02.13

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

CN 101027161 A, 2007.08.29

2019.02.25

CN 101013249 A, 2007.08.08

(86) PCT国际申请的申请数据

CN 105490144 A, 2016.04.13

PCT/EP2017/069855 2017.08.04

Andreas Hoffmann 等. Extremely

(87) PCT国际申请的公布数据

Nonlinear Optics Using Shaped Pulses

W02018/036792 EN 2018.03.01

Spectrally Broadened in an Argon- or

Sulfur Hexafluoride-Filled Hollow-Core  
Fiber.《Appl. Sci.》.2015,

(73) 专利权人 相干凯撒斯劳滕有限公司

审查员 马桂英

地址 德国凯撒斯劳滕

(72) 发明人 R·克纳佩

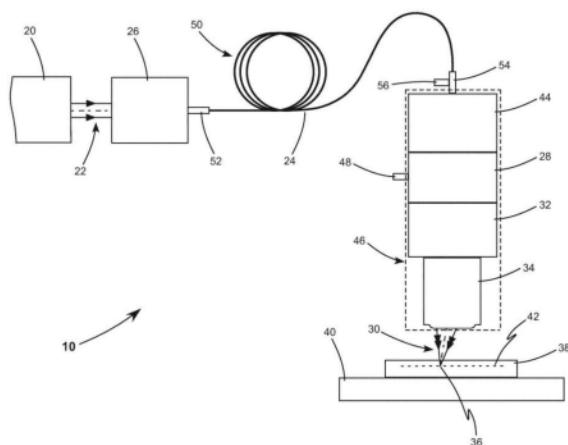
权利要求书1页 说明书4页 附图2页

(54) 发明名称

模块化紫外线脉冲激光光源

(57) 摘要

用于产生用于材料加工的紫外(UV)脉冲激光辐射的装置(10)包括提供红外(IR)脉冲激光辐射的激光源(20)和频率转换模块(28)。位于频率转换模块(28)内的四硼酸锂(Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>)晶体(72)通过非线性谐波产生将IR脉冲激光辐射转换成UV脉冲激光辐射。频率转换模块(28)是一个密封的外壳，其可以抽空或含有干燥气体。柔性光纤组件(24)将来自激光源的IR脉冲激光辐射传输到频率转换模块。



1. 产生紫外脉冲激光辐射的装置,包括:

激光源,在基波波长处产生脉冲激光辐射束,所述脉冲激光辐射的脉冲持续时间在100飞秒与200皮秒之间;

频率转换模块,该频率转换模块具有气密密封的封闭的内部容积;

空心光纤,布置成将脉冲激光辐射束从激光源传输到所述频率转换模块,其中所述空心光纤的空心含有气体并且被配置为光谱加宽穿过所述光纤的激光辐射;

自由空间压缩器,用于接收光谱加宽的激光辐射并在时间上压缩通过其中的脉冲;

第一非线性晶体和第二非线性晶体,位于所述频率转换模块的封闭的内部空间内;

其中所述脉冲激光辐射束顺序通过空心光纤、所述压缩器、所述第一非线性晶体和所述第二非线性晶体传播;并且

其中,所述第一非线性晶体和第二非线性晶体被布置成产生作为基波波长处的四次或五次谐波的紫外脉冲激光辐射束。

2. 如权利要求1所述的装置,其中,所述第二非线性晶体由四硼酸锂制成。

3. 如权利要求1所述的装置,其中,所述空心光纤的空心包含的气体的压力受调节。

4. 如权利要求1所述的装置,还包括光束扫描器和聚焦透镜,所述光束扫描器布置成拦截和偏转紫外脉冲激光辐射束,所述聚焦透镜布置成拦截偏转的紫外脉冲激光辐射束并将紫外脉冲激光束聚焦到工件上。

5. 如权利要求4所述的装置,其中,所述紫外脉冲激光辐射束在气密外壳中的所述频率转换模块与所述聚焦透镜之间传播。

6. 如权利要求5所述的装置,其中,所述气密外壳被抽空。

7. 如权利要求5所述的装置,其中,所述气密外壳用干燥气体吹扫。

8. 如权利要求7所述的装置,其中,所述干燥气体是干净的干燥空气。

9. 如权利要求1所述的装置,其中,所述紫外脉冲激光辐射束的波长为266纳米。

10. 如权利要求1所述的装置,其中,所述紫外脉冲激光辐射束的波长为244纳米。

11. 如权利要求1所述的装置,其中,所述频率转换模块的封闭的内部容积被抽空。

12. 如权利要求1所述的装置,其中,用干燥气体吹扫所述频率转换模块的封闭的内部容积。

13. 如权利要求12所述的装置,其中,干燥气体是干净的干燥空气。

14. 如权利要求1所述的装置,其中,所述空心光纤的模场直径大于15微米。

15. 如权利要求1所述的装置,其中离开所述光纤的脉冲激光辐射具有大于20皮秒的脉冲持续时间,并且其中所述自由空间压缩器布置成将脉冲激光辐射的脉冲持续时间减小到小于20皮秒。

16. 如权利要求1所述的装置,其中离开光纤的脉冲激光辐射具有大于1皮秒的脉冲持续时间,并且其中所述自由空间压缩器布置成将脉冲激光辐射的脉冲持续时间减小到小于1皮秒。

## 模块化紫外线脉冲激光光源

[0001] 优先权

[0002] 本申请要求于2016年8月25日提交的美国临时申请序列号62/379,639和2017年7月31日提交的美国非临时专利申请号15/664,176的优先权，其公开内容整体通过引用结合于本文中。

### 技术领域

[0003] 本发明一般涉及产生紫外(UV)激光辐射束。本发明特别涉及产生UV脉冲激光辐射束，例如，波长短于约380纳米，脉冲持续时间小于约20皮秒。

### 背景技术

[0004] 激光材料加工越来越多地用于对各种材料进行切割，钻孔，标记和划线。传统的机械加工会产生粗糙的表面和不需要的缺陷，例如微裂纹，这会降低和削弱加工材料。使用聚焦脉冲激光辐射束的激光材料加工产生更精确的切口和孔，具有更高质量的边缘和壁，同时最小化不需要的缺陷的形成。科学的研究和制造方面的进步正在导致激光材料加工越来越多的材料，同时要求更高的加工速度和更高的精度。

[0005] 使用固态增益介质的高功率激光源产生具有红外(IR)波长的基本激光辐射，通常波长大于约750纳米(nm)。通过非线性光学晶体中的谐波产生，IR激光辐射被转换成可见光和紫外(UV)激光辐射。与较长波长的辐射相比，短波长激光辐射能够钻出更小的孔，制作更精细的标记和划出更精细的特征。因此，UV激光辐射优先用于加工许多类型的材料。然而，紫外激光辐射会降低光学器件性能，特别是光学器件也会暴露在环境氧气和湿气中。谐波生成晶体和任何光束整形或光束传输光学器件都容易受到这种损坏。

[0006] 某些激光源产生脉冲激光辐射束，其包括具有飞秒或皮秒脉冲持续时间的脉冲，例如脉冲持续时间大于约100飞秒(fs)且小于约20皮秒(ps)的脉冲。高于阈值强度的聚焦脉冲激光辐射通过烧蚀去除工件上的材料，从而最小化由周围材料的过度加热引起的不希望的附带损伤。大多数材料在紫外波长处的烧蚀阈值低于在IR基波波长处的烧蚀阈值。因此，使用UV脉冲激光辐射可以在更高速度下进行更高质量的加工。

[0007] 许多现代光电器件具有复合结构。发光二极管、光伏电池和触摸屏包括覆盖有不同材料层的基板。覆盖层可以包括掺杂半导体层、薄金属膜、薄聚合物膜和薄导电氧化物膜。通常将薄膜层沉积在结构上，然后通过去除材料来图案化。使用由短波长激光辐射提供的空间选择性以及结合层材料的烧蚀阈值之间的差异，聚焦的UV脉冲激光辐射束可以选择地去除薄膜而不损坏下面的材料。

[0008] 通过材料在三维中移动聚焦的激光辐射束，特征以材料制成或图案化成薄膜层。线性平移台支撑工件并通过聚焦光束在三维空间内平移工件，直至达到最大受控扫描速度。使用最先进的电流计驱动电机可以获得更高的横向扫描速度，以使未聚焦束偏转，从而将聚焦束横向穿过工件。

[0009] 需要一种能够产生聚焦的UV脉冲束并将聚焦束精确地传送到工件的激光材料加

工装置。激光材料加工装置应该能够抵抗UV激光辐射的光学损伤。优选地，脉冲具有足够的能量来烧蚀宽范围的材料，并且脉冲能量是可控的，以选择性地烧蚀复合结构中的薄膜。

[0010] 发明概述

[0011] 在一个方面，根据本发明的UV脉冲激光辐射产生装置包括产生脉冲激光辐射束的激光源。脉冲激光辐射具有在约100飞秒与约200皮秒之间的脉冲持续时间。提供了一种频率转换模块。频率转换模块具有密封气密的封闭的内部空间。提供并布置光纤以将脉冲激光辐射束从激光源传输到频率转换模块。四硼酸锂晶体位于频率转换模块的封闭的内部容积内。四硼酸锂晶体被布置成拦截脉冲激光辐射束并由此产生UV脉冲激光辐射束。

## 附图说明

[0012] 包含在说明书中并构成说明书一部分的附图示意性地示出了本发明的优选实施方案，并且与上面给出的一般描述和下面给出的优选实施方案的详细描述一起用于解释本发明原理。

[0013] 图1是示意性地示出根据本发明的UV脉冲激光辐射产生装置的一个优选实施方案的外视图，UV脉冲激光辐射产生装置包括激光源、光纤耦合模块、光纤、频率转换模块、光束扫描模块、聚焦透镜和工件。

[0014] 图2部分地以横截面示意性地示出了图1的UV脉冲激光辐射产生装置的附加细节。

[0015] 发明详述

[0016] 现在转向附图，其中相同的特征由相同的附图标记表示。图1示意性地示出了根据本发明的紫外(UV)脉冲激光辐射产生装置的一个优选实施方案10。装置10包括激光源20，其产生脉冲激光辐射22，其脉冲持续时间在约100飞秒(fs)和200皮秒(ps)之间。脉冲激光辐射束22具有红外(IR)波长，其是激光源20的基波波长。举例来说，掺杂镱(Yb<sup>3+</sup>)的增益光纤产生约976纳米(nm)或约1030nm的激光辐射。钕(Nd<sup>3+</sup>)掺杂的增益晶体产生约1064nm的激光辐射。脉冲激光辐射束22通过光纤耦合模块26耦合到光纤24中，光纤耦合模块26可以是如图所示的分立模块或集成到激光源20中。

[0017] 光纤24将脉冲激光辐射束22传输到频率转换模块28，该频率转换模块28通过非线性谐波产生将脉冲激光辐射束22转换成UV脉冲激光辐射束30。UV脉冲激光辐射束30的UV波长是基波波长的四分之一或五分之一。对于示例性基波波长976nm，四次谐波波长为244nm，五次谐波波长为195nm。对于示例性基波波长1064nm，四次谐波波长为266nm，五次谐波波长为213nm。

[0018] 频率转换模块28连接到光束扫描模块32，光束扫描模块32偏转UV脉冲激光辐射束30。光束扫描模块32连接到聚焦透镜34，聚焦透镜34将UV脉冲激光辐射束30聚焦到工件38处的聚焦位置36。工件38由平移台40支撑和定位。聚焦透镜34和平移台40控制聚焦位置36相对于工件38的纵向位移。光束扫描模块32和平移台40控制焦点位置36的横向位移。

[0019] 聚焦透镜34最好是“F-Theta物镜”。F-Theta物镜通过光束扫描模块32将UV脉冲激光辐射束30的角位移转换成平坦焦平面42中的焦点位置36的比例横向位移。平面焦平面42位于距聚焦透镜34的固定距离处。F-Theta物镜可从例如新泽西州的Thorlabs of Newton购得。

[0020] 可选的脉冲压缩模块44位于光纤24与频率转换模块28之间。如果从光纤24出射的

激光辐射束22的脉冲持续时间大于约20ps，则可选的脉冲压缩模块44将包括在装置10中，如果脉冲持续时间大于约1ps，则优选包括可选的脉冲压缩模块44。可选的脉冲压缩模块44在时间上将脉冲激光辐射束22压缩到小于约20ps的脉冲持续时间，优选地小于约1ps。最小可访问脉冲持续时间受到从光纤24出射的脉冲激光辐射22的光谱带宽的限制。可以选择压缩脉冲持续时间以优化非线性谐波产生或满足激光材料加工应用的要求。

[0021] 可选的脉冲压缩模块44、频率转换模块28、光束扫描模块32和聚焦透镜34一起形成气密外壳46(在图中用虚线表示)。至少一个吹扫端口48提供用于抽空气密外壳46或用干燥气体吹扫气密外壳46的装置。举例来说，可以用干燥氮气或干净的干燥空气吹扫气密外壳46。为了理解本发明的原理，不需要详细描述产生真空或供应吹扫气体的装置，因此，这里没有给出。

[0022] 光纤24是光纤组件50中的主要元件，其还包括输入连接器52、输出连接器54、气体端口56和包围光纤24的保护导管(未示出)。光纤24和保护导管是柔性的，这使得气密外壳46能够独立于激光源20和光纤耦合模块26定位和定向。光纤组件50可以使用输入连接器52与光纤耦合模块26连接或分离。输出连接器54将光纤组件50连接到频率转换模块28或可选的脉冲压缩模块44。

[0023] 光纤24具有中空芯，脉冲激光辐射束22通过该中空芯传播，并且具有相对大的模场直径(MFD)。光纤24最好是具有“Kagome”结构的光子晶体光纤(PCF)。Kagome PCF具有包层结构和包层尺寸，以相位失配包层模式和核心模式。特别是，包层结构在基波波长处没有横向共振。因此，传播的脉冲激光辐射束22被限制在中空芯内。光纤24的MFD优选大于约15微米( $\mu\text{m}$ )，最优选约40 $\mu\text{m}$ 。Kagome PCF可从法国Limoges的GL photonics SAS商购获得，并在美国专利第8,306,379号中进一步描述。

[0024] 可以抽空光纤24的中空芯以最小化由于吸收造成的传输损失。可替代地，中空芯可以包含气体，其通过非线性自相位调制(SPM)引起脉冲激光辐射束22的光谱展宽。光纤组件50是气密密封的，并通过气体端口56抽空或充满气体。气体端口56在输出连接器54中示出，但是气体端口可以位于输入连接器52中，而不脱离精神和本发明的范围。气体优选是干净的干燥空气(CDA)，并且优选具有小于约10巴的压力。中空纤维中的光谱展宽量主要通过调节气体压力来控制。

[0025] 举例来说，选择具有40 $\mu\text{m}$  MFD的3.5米(m)长Kagome PCF来光谱加宽IR脉冲激光辐射束22。每个IR脉冲具有约90微焦耳( $\mu\text{J}$ )能量和约9ps持续时间。Kagome PCF含有CDA，压力约为2.5巴。IR脉冲在光谱上从进入输入连接器52的约0.3nm扩展到从输出连接器54出射的约2.5nm。附加的光谱带宽使得可选的脉冲压缩模块44能够将IR脉冲激光辐射束22压缩到更短的最小脉冲持续时间。示例性的2.5nm IR脉冲可以从大约9ps压缩到大约780fs。通过担架的传输效率约为95%，通过压缩器的传输效率约为75%。

[0026] 图2示意性地示出了图1的UV脉冲激光辐射产生装置10的另外细节。光纤耦合模块26包括光束指向调谐器60、光束衰减器62和光纤耦合透镜64。光束指向调谐器60控制入射在光纤耦合透镜64上的脉冲激光辐射束22的精确视轴对准。光束指向调谐器60和光纤耦合透镜64被定位和布置成以最佳效率将脉冲激光辐射束22耦合到光纤24中。光束衰减器62减小脉冲激光辐射22的光束的脉冲能量，以调节光纤24中的SPM，从而进一步控制从输出连接器54出射的脉冲激光辐射束22的光谱带宽。

[0027] 可选的脉冲压缩模块44包括准直透镜66、光束衰减器68和脉冲压缩器70。准直透镜66被定位和布置成在从输出连接器54出射之后准直脉冲激光辐射束22。光束衰减器68减小脉冲激光辐射束22的脉冲能量,以调节紫外脉冲激光辐射束30的脉冲能量。如上所述,脉冲压缩器70在时间上压缩脉冲激光辐射束22。在时间上压缩脉冲激光辐射束的装置在本领域中是公知的。例如,光谱宽的脉冲激光辐射束被布置成传播通过色散介质,例如一对棱镜或一对衍射光栅。为了理解本发明的原理,不需要详细描述衰减脉冲能量和时间压缩脉冲激光辐射束的装置,因此,这里没有给出。在没有可选的脉冲压缩模块44的情况下,准直透镜66和光束衰减器68可以包括在频率转换模块28中,而不脱离本发明的精神和范围。

[0028] 频率转换模块28包括非线性晶体72和非线性晶体74,以将脉冲激光辐射束22转换成UV脉冲激光辐射束30。非线性谐波产生四次或五次谐波波长通常需要两到三个晶体。可以使用多种潜在的转换组合。举例来说,在一种组合中,非线性晶体72将基波波长转换为二次谐波波长,而非线性晶体74将二次谐波波长转换为四次谐波波长。在另一种组合中,非线性晶体72将基波波长转换为三次谐波波长,非线性晶体74将基波波长和三次谐波波长转换为四次谐波波长。

[0029] 适用于非线性晶体72的材料包括三硼酸锂( $\text{LiB}_3\text{O}_5$ )或 $\beta$ -硼酸钡( $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ )。非线性晶体74优选由四硼酸锂( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ )制成。每个非线性晶体优选地位于脉冲激光辐射束22的腰部中。通过将脉冲激光辐射束22聚焦到较小的腰部直径来提高非线性谐波产生的效率,从而增加非线性晶体内的脉冲激光辐射束22的强度。

[0030] 对于上述示例性转换组合和示例性脉冲持续时间,激光源20优选地产生至少50W的基波波长功率,非线性晶体72优选地产生至少30W的二次谐波波长功率,非线性晶体74优选地产生至少5W的四次谐波波长功率。激光源20最优选产生至少80W的基波波长功率,非线性晶体72最优选产生至少50W的二次谐波波长功率,非线性晶体74最优选产生至少10W的四次谐波波长功率。

[0031] 光束扫描模块32包括光束扩展器76和光束扫描器78。光束扩展器76控制入射在光束扫描器78和聚焦透镜34上的UV脉冲激光辐射30的光束直径。通常根据激光材料加工应用的聚焦要求来选择UV脉冲激光辐射束30的直径。光束扫描器78优选地使用电流计驱动的镜子来偏转UV脉冲束激光辐射30。电流计扫描器可从例如德国Puchheim的Scanlab AG商购获得。

[0032] 气密外壳46在图1和2中示出,具有一个共同的吹扫端口48,该吹扫端口48位于频率转换模块28中并且具有流体连接的所有模块。吹扫端口可以位于气密外壳46的任何模块中。可替代地,包括气密外壳46的任何一个模块可以单独封闭并具有专用的吹扫端口,而不脱离本发明的精神和范围。为了封闭模块,将包括入口窗口和出口窗口以将激光辐射束传入和传出模块。如果单个模块被替换或更换,则具有单独封闭的模块的装置优先用于在维修期间最小化污染。

[0033] 以上根据优选实施方案和其他实施方案描述了本发明。然而,本发明不限于这里描述和描述的实施方案。相反,本发明仅受所附权利要求的限制。

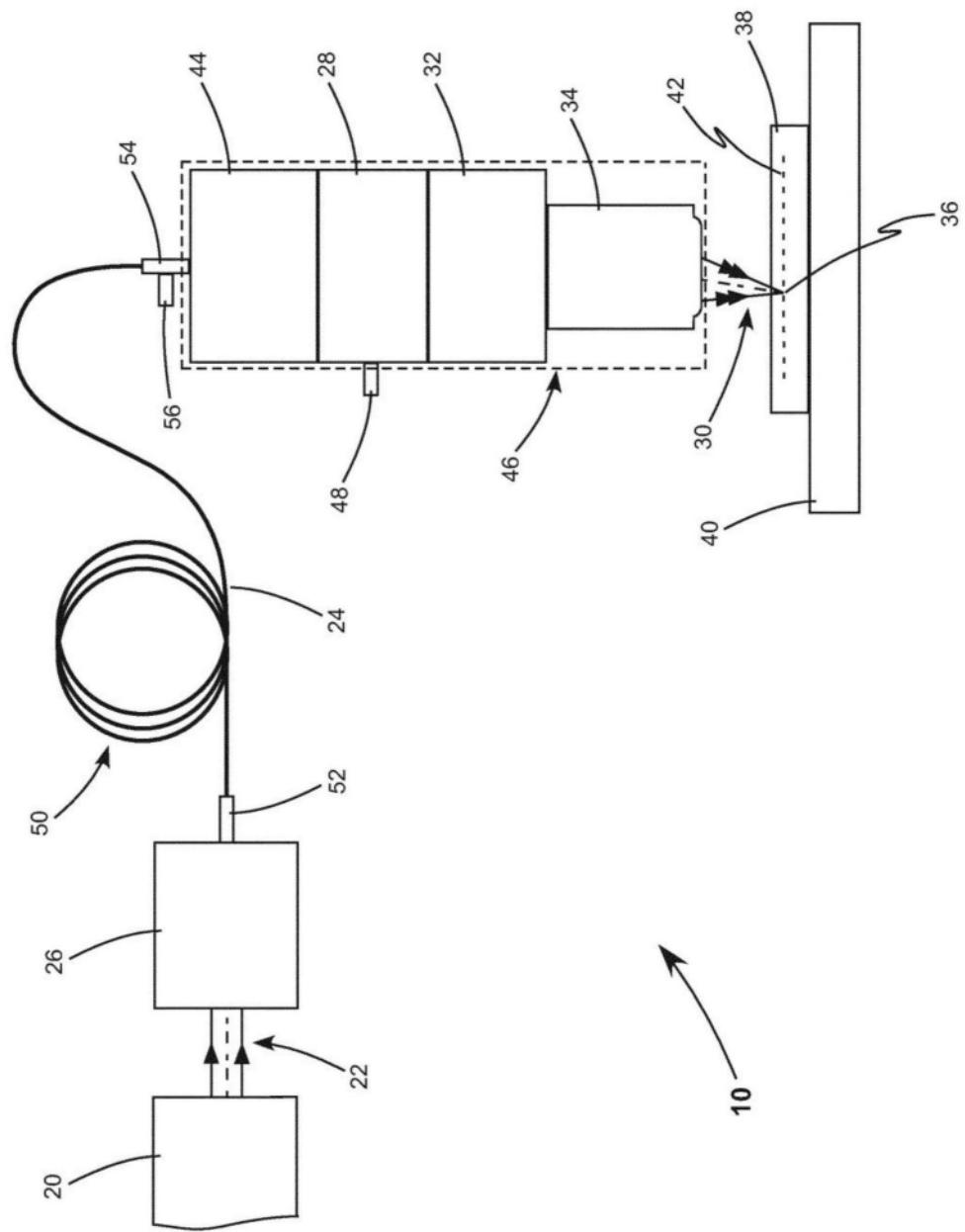


图1

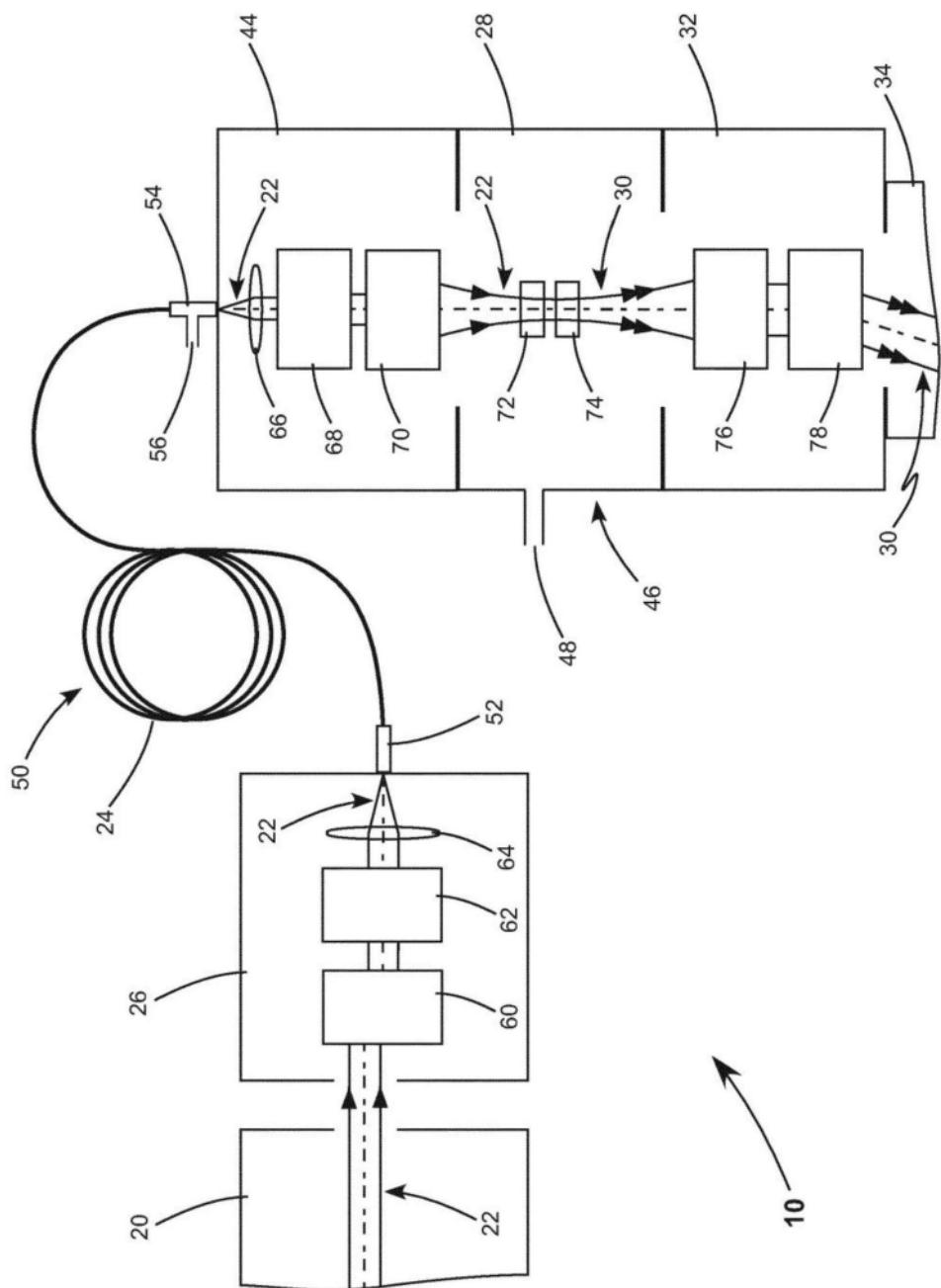


图2