



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114535782 B

(45) 授权公告日 2024. 08. 13

(21) 申请号 202210239106.1

(22) 申请日 2017.11.13

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 114535782 A

(43) 申请公布日 2022.05.27

(30) 优先权数据  
15/352,385 2016.11.15 US

(62) 分案原申请数据  
201780069421.1 2017.11.13

(73) 专利权人 相干公司  
地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 M·R·格林伯格 D·M·高迪奥西  
J·戴勒

(74) 专利代理机构 余姚德盛专利代理事务所  
(普通合伙) 33239

专利代理师 周积德

(51) Int.Cl.  
B23K 26/00 (2014.01)  
B23K 26/06 (2014.01)  
B23K 26/0622 (2014.01)  
B23K 26/073 (2006.01)  
B23K 26/70 (2014.01)  
C03B 33/09 (2006.01)

(56) 对比文件  
JP 2006216820 A, 2006.08.17  
US 2003127441 A1, 2003.07.10

审查员 卢娟芳

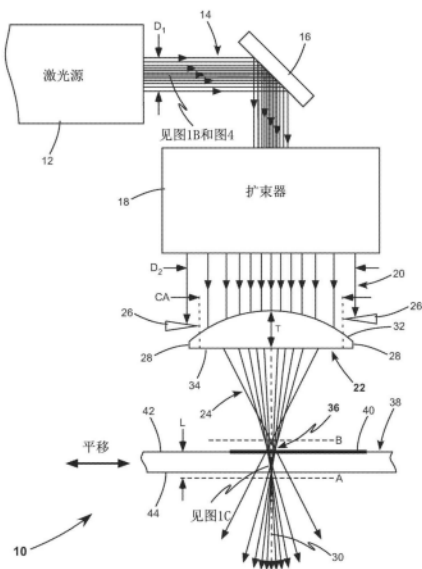
权利要求书2页 说明书7页 附图7页

(54) 发明名称

一种切割由脆性材料制成的工件的方法

(57) 摘要

用于切割脆性材料的设备包括扩束器(18), 与非球面聚焦透镜(22)、孔径(CA)和产生脉冲激光辐射束(14)的激光源(12)相结合。非球面透镜(22)和孔径(CA)将脉冲激光辐射束形成成为沿着非球面聚焦透镜(22)的光轴具有均匀强度分布的细长焦点。细长焦点延伸穿过由脆性材料制成的工件(38)的整个厚度。通过沿切割线描绘光轴来切割工件(38)。脉冲激光辐射的每个脉冲或脉冲串都会在工件(38)的整个厚度上产生延伸的缺陷。



1. 一种沿切割线切割由脆性材料制成的工件的方法,所述方法包括步骤:  
传送激光辐射束,所述激光辐射是脉冲的且具有小于20皮秒的脉冲持续时间;  
扩展所述激光辐射束以过填充非球面聚焦透镜的通光孔径,使得只有一部分扩展的激光辐射束在所述通光孔径内并且填充所述通光孔径,并且通过所述非球面聚焦透镜透射;  
形成聚焦的具有细长焦点的激光辐射束,通过聚焦所述透射的激光辐射束结合衍射到所述通光孔径边缘的所述激光辐射束,所述细长焦点沿所述非球面聚焦透镜的光轴具有大致均匀的强度分布;  
定位所述工件使得所述细长焦点在入射表面和出射表面之间与所述工件重叠,并且所述光轴截取所述切割线;以及  
沿所述切割线描绘所述光轴。
2. 如权利要求1所述的切割方法,其中,所述扩展的激光辐射束在所述通光孔径内的部分为85%至95%。
3. 如权利要求1所述的切割方法,其中,所述大致均匀的强度分布包括多个峰值,所述峰值强度与平均峰值强度相差小于20%。
4. 如权利要求1所述的切割方法,其中,所述细长焦点从所述入射表面延伸到所述出射表面。
5. 如权利要求1所述的切割方法,其中,所述传送的激光辐射束具有脉冲能量,所述非球面聚焦透镜的设计使位于所述细长焦点内的一小部分所述脉冲能量最大化。
6. 如权利要求1所述的切割方法,其中,所述通光孔径由位于所述扩展的激光辐射束内的离散孔径限定。
7. 如权利要求1所述的切割方法,其中,所述通光孔径由所述非球面聚焦透镜的边缘限定。
8. 如权利要求1所述的切割方法,其中,所述非球面聚焦透镜是平凸透镜,具有凸非球面和相对的平坦表面。
9. 如权利要求8所述的切割方法,其中,所述非球面聚焦透镜被定向成使得所述扩展的激光辐射束入射在所述凸非球面上。
10. 如权利要求8所述的激光切割设备,其中,所述非球面聚焦透镜被定向成使得所述扩展的激光辐射束入射在所述平坦表面上。
11. 如权利要求1所述的切割方法,其中,所述非球面聚焦透镜包括球面聚焦透镜和非球面相位板。
12. 如权利要求11所述的切割方法,其中,所述非球面相位板是衍射光学元件。
13. 如权利要求1所述的切割方法,其中,所述激光辐射束由无焦扩束器扩展。
14. 如权利要求1所述的切割方法,其中,所述激光辐射束由负透镜扩展。
15. 如权利要求1所述的切割方法,其中,通过平移所述工件描绘沿着所述切割线的所述光轴。
16. 如权利要求1所述的切割方法,其中,所述传送的激光辐射束具有脉冲串,每个脉冲串包含多个单独的脉冲。
17. 如权利要求1所述的切割方法,其中,所述脆性材料是玻璃。
18. 如权利要求17所述的切割方法,其中,所述玻璃被化学强化。

19. 如权利要求1所述的切割方法, 其中, 在所述工件中的延伸的缺陷由所述细长焦点内的所述激光辐射产生。

## 一种切割由脆性材料制成的工件的方法

[0001] 本发明是申请号为201780069421.1、申请日为2017年11月13日、发明名称为“利用非球面聚焦设备和扩束器切割脆性材料的激光设备”的专利的分案申请。

### 技术领域

[0002] 本发明一般涉及透明脆性材料的激光加工。本发明特别涉及使用具有约20皮秒或更短的脉冲持续时间的形成细长焦点的超短脉冲激光辐射束切割玻璃工件。

### 背景技术

[0003] 激光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,包括玻璃和蓝宝石等脆性材料。传统的机械加工产生不希望的缺陷,例如当加工后的材料受到应力时可能传播的微裂纹,从而降低和削弱加工的材料。使用聚焦的脉冲激光辐射束对脆性材料进行激光加工,可产生精确的切口和孔,具有高质量的边缘和壁,同时最大限度地减少不需要的缺陷的形成。工业进步需要对越来越多的脆性材料进行激光加工,同时要求提高加工速度和精度。

[0004] 透明脆性材料通过激光辐射的非线性吸收与聚焦的脉冲激光辐射束相互作用。脉冲激光辐射可以包括一系列单个脉冲或快速脉冲串。每个单个脉冲或脉冲串在光束焦点处在透明脆性材料中产生缺陷。通过沿着工件中的切割路径平移聚焦的脉冲激光辐射束来产生一系列缺陷,从而削弱材料。然后,薄的工件可以自发地分离,而厚的工件可以在施加应力的附加步骤中分离。一种这样的方法是沿着切割路径施加具有被材料吸收的波长的激光束,这通过加热引起机械应力。

[0005] 近年来,已开发出化学强化玻璃,并广泛用作消费电子装置的显示屏的覆盖玻璃。通过离子交换过程实现化学强化。将硅酸盐玻璃板浸入含有钾离子( $K^+$ )的盐溶液中。较大的钾离子代替位于玻璃表面附近的较小的钠离子( $Na^+$ ),从而在玻璃的表面层内引起压缩。在这些表面层之间,玻璃内部处于拉伸状态,从而补偿表面压缩。高表面层压缩使化学强化玻璃极硬(莫氏硬度约为6.5),并且耐刮擦和机械冲击。蓝宝石(莫氏9级)是一种用于某些装置的替代硬质玻璃材料。

[0006] 用于消费电子装置的覆盖玻璃通常具有约300微米( $\mu m$ )至1.1毫米(mm)的厚度。聚焦良好的脉冲激光辐射产生的缺陷通常延伸到几十微米深。切割工件的整个厚度需要在改变聚焦深度的同时沿着切割路径多次扫描聚焦的激光辐射。

[0007] 已经使用各种手段开发了商业激光加工工艺以产生长焦点,从而减少了沿切割路径所需的扫描次数并提高了激光切割设备的生产率。使用轴棱镜或等效相位掩模作为聚焦元件,从具有高斯横模的光束产生“贝塞尔光束”。轴棱镜是关于光轴旋转对称的锥形棱镜。相位掩模是一种衍射光学元件(DOE),并且制造起来通常相当昂贵。在实践中,通常需要额外的望远镜来对贝塞尔光束进行去放大,并消除由于轴棱镜或DOE的不完美制造而导致的严重的强度调制。使用贝塞尔光束产生的缺陷可能具有卫星结构,这可能导致质量差的切割边缘。

[0008] 产生长焦点的另一种方法是产生自引导的“细丝”。由于折射率的非线性分量,在材料中具有高强度的聚焦的脉冲激光辐射束变得进一步聚焦。非线性聚焦和强度之间的正反馈产生等离子体。等离子体内的较低折射率导致散焦。聚焦和散焦之间的平衡维持细丝内的等离子体状态。细丝的传播沿着聚焦元件的光轴在材料中产生空隙。细丝激光加工需要高脉冲能量,接近当前一代超短脉冲激光源的实际限制,并精确控制所有光束参数。材料特性的相对较小的变化(例如正常的材料不均匀性)和光束参数(例如,拍摄间噪声和激光-激光束质量)可能导致细丝激光切割过程中失去控制。

[0009] 需要一种告效的激光切割方法,该方法将沿着使用较低脉冲能量的切割路径单次切割强化玻璃或蓝宝石。优选地,该方法应该是确定性的并且对材料特性和光束参数的变化不敏感。

## 发明概述

[0010] 本发明涉及切割具有入射表面和出射表面的脆性材料。根据本发明的激光设备包括传送准直的脉冲激光辐射束的激光源。脉冲激光辐射具有小于约20皮秒的脉冲持续时间,并且准直光束具有第一直径。提供一种非球面聚焦透镜,其具有光轴和通光孔径。提供无焦扩束器,其位于激光源与非球面聚焦透镜之间。无焦扩束器布置成将准直光束从第一直径扩展到第二直径。第二直径大于非球面聚焦透镜的通光孔径,使得仅扩展的准直光束的一部分在通光孔径内。非球面聚焦透镜将脉冲激光束的一部分聚焦在通光孔径内。聚焦光束具有与光轴同轴的细长焦点。细长焦点沿光轴具有大致均匀的强度分布。细长的焦点与入射表面与出射表面之间的脆性材料重叠。

## 附图说明

[0011] 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。

[0012] 图1A示意性地示出了根据本发明的激光切割设备的一个优选实施方案,用于在由脆性材料制成的工件中产生延伸的缺陷,该设备包括传送脉冲激光辐射束的激光源、无焦扩束器和形成具有均匀强度分布的细长焦点的非球面聚焦透镜。

[0013] 图1B示意性地示出了图1A的脉冲激光辐射束中的横向高斯强度分布。

[0014] 图1C示意性地示出了图1A的细长焦点中的均匀强度分布。

[0015] 图2示意性地示出了根据本发明的激光切割设备的另一个优选实施方案,类似于图1A的实施方案,但是,其中无焦扩束器由负透镜代替。

[0016] 图3示意性地示出了根据本发明的激光切割设备的又一优选实施方案,类似于图1A的实施方案,但是,其中非球面聚焦透镜包括球面聚焦透镜和非球面相位板。

[0017] 图4是示意性地示出图1A的激光辐射束中的脉冲的时序图。

[0018] 图5是示意性地示出根据本发明的非球面聚焦透镜的非球面和商用球面透镜的球面的截面形状的曲线图,表面的顶点位于原点,表面由凹陷表示作为离光轴的径向位移的函数。

[0019] 图6A是示意性地示出作为沿着与图2的实施方案类似的传统激光切割设备的光轴

的位移的函数的计算强度的曲线图,但是,传统激光切割设备具有球面平凸聚焦透镜而不是本发明的非球面聚焦透镜,球面平凸聚焦透镜具有+35mm的特定焦距。

[0020] 图6B是示意性地示出作为沿图1A的激光切割设备的光轴的位移的函数的计算强度的曲线图,非球面聚焦透镜具有+25mm的标称焦距,并且脉冲激光辐射束欠填充非球面聚焦透镜的通光孔径。

[0021] 图6C是示意性地示出作为沿与图6B相同的激光切割设备的光轴的位移的函数的计算强度的曲线图,但是,脉冲激光辐射束过填充非球面聚焦透镜的通光孔径。

[0022] 图7A是示意性地示出作为沿图1A的激光切割设备的光轴的位移的函数的计算强度的曲线图,在非球面聚焦透镜的通光孔径外的激光辐射束中具有约5%的脉冲能量。

[0023] 图7B是示意性地示出作为沿着与图7A相同的激光切割设备的光轴的位移的函数的计算强度的曲线图,但是,在非球面聚焦透镜的通光孔径外的激光辐射束中具有约10%的脉冲能量。

[0024] 图7C是示意性地示出作为沿与图7A相同的激光切割设备的光轴的位移的函数的计算强度的曲线图,但是在非球面聚焦透镜的通光孔径外的激光辐射束中具有约15%的脉冲能量。

## 发明详述

[0025] 现在参考附图,其中相同的部件用相同的标号表示,图1A示意性地示出了根据本发明的激光切割设备的一个优选实施方案10。设备10包括激光源12,其输送具有光束直径“ $D_1$ ”的准直的脉冲激光辐射束14。准直光束14由任选的转向镜16引导到无焦扩束器18中,该无焦扩束器18被设置成截取准直光束14并形成扩展的脉冲激光辐射束20,扩展的脉冲激光辐射束20被准直并具有更大的光束直径“ $D_2$ ”。无焦扩束器是光学设计领域中众所周知的扩束元件,并且其描述对于理解本发明的原理不是必需的。

[0026] 非球面聚焦透镜22被布置成截取扩展的准直光束20并形成聚焦的脉冲激光辐射束24。选择光束直径 $D_2$ 以使非球面聚焦透镜22的通光孔径“CA”过填充( $D_2 > CA$ )。只有一部分扩展的准直光束20在通光孔径CA内。该部分通过非球面聚焦透镜22透射并形成聚焦光束24。较小的互补部分,包括扩展的准直光束20的外围光线,不被非球面聚焦透镜22聚焦。非球面聚焦透镜22的通光孔径CA可以是由离散孔径26限定,该离散孔径26位于无焦扩束器18与非球面聚焦透镜22之间,并且物理地阻挡外围光线,如图所示。可替代地,通光孔径CA可以由非球面聚焦透镜22的边缘28限定,边缘28可以是其光学边缘或其物理边缘。

[0027] 非球面聚焦透镜22具有光轴30、非球面32和相对表面34。非球面32具有凸非球面形状,这将在下面详细描述。表面34可以是平坦的或可以具有球形或非球形的凸形。非球面聚焦透镜22优选地是具有平坦表面34的平凸透镜。非球面聚焦透镜22可以如图所示定向,具有入射在非球面32上的扩展的准直光束20,或者可以定向为具有入射在表面34上的扩展的准直光束20。对于优选的平凸非球面聚焦透镜,具有入射在平坦表面34上的扩展的准直光束20的取向具有以下优点:非球面聚焦透镜的聚焦特性对于透镜的精确厚度“T”不敏感。

[0028] 聚焦光束24沿光轴30会聚到细长焦点36。从靠近光轴30的非球面聚焦透镜22出射的近轴光线会聚到垂直于光轴30的平面“A”。非球面聚焦透镜22的“标称焦距”被定义为非球面聚焦透镜22与平面A之间的距离。从靠近边缘28的非球面聚焦透镜22出射的光线会聚

到平面“B”,该平面“B”比平面A更靠近非球面聚焦透镜。细长焦点36在平面A和B之间延伸。细长焦点36在平面A和B之间沿光轴30具有均匀的强度分布,这将在下面详细描述。

[0029] 由脆性材料制成的工件38定位成使得光轴30截取图中通过粗线所示的切割线40。聚焦光束24通过入射表面42进入工件38并通过相对的出射表面44离开工件38。工件38定位成使得细长焦点36在入射表面42与出射表面44之间与工件38重叠。工件38的“标称焦深”“L”被定义为入射表面42与平面A之间的距离。工件38可以完全位于细长焦点36内,具有位于平面A和B之间的两个表面42和44,如图所示。可替代地,工件38可以部分地位于细长焦点36内,而不脱离本发明的精神和范围。通过如图所示平移工件38,沿着切割线40描绘光轴30,同时施加聚焦的脉冲激光辐射束24来完成切割。切割线40可以是直的或弯曲的,如应用所要求的。

[0030] 图1B示意性地示出了准直光束14的横截面强度分布。图1B是作为距准直光束14的中心的径向位移的函数的激光辐射强度的曲线图。许多激光源中的光学谐振器具有由高斯函数描述的最低阶横模。这种横向高斯强度分布在附图中示出并且具有对应于光束中心处的最大强度的 $13.5\% \left(\frac{1}{e^2}\right)$ 的光束半径“ $\omega$ ”。为了便于说明,光束直径 $D_1$ 在本文中定义为直径 $3.03\omega$ ,其包含准直光束14中的99%的功率。类似地,光束直径 $D_2$ 包含扩展的准直光束20中的99%的功率。

[0031] 图1C示意性地示出了聚焦光束24沿光轴30的均匀强度分布。细长焦点36在图中的平面A和B之间具有大致恒定的强度。在实践中,由本发明形成的强度分布是“大致均匀的”,如下文所述。

[0032] 图2示意性地示出了根据本发明的激光切割设备的另一优选实施方案50。设备50类似于图1A的激光切割设备10,但是,无焦扩束器18被作为扩束元件的负透镜52代替。负透镜52截取准直光束14并形成扩展的脉冲激光辐射束54,扩展的脉冲激光辐射束54发散并过填充非球面聚焦透镜22的通光孔径“CA”。图2描绘了由非球面聚焦透镜22的边缘28限定的孔径CA的示例。非球面聚焦透镜22布置成截取扩展的发散光束54并形成聚焦光束24。该图描绘了工件38部分地位于细长焦点36内的示例。在该示例中,标称焦深L小于工件38的厚度。

[0033] 图3示意性地示出了根据本发明的激光切割设备的又一优选实施方案60。设备60类似于图1A的激光切割设备10,非球面聚焦透镜22由球面聚焦透镜62和非球面相位板64代替,它们一起形成非球面聚焦透镜66。球面聚焦透镜62具有球面68和相对表面34。球面68具有凸球形。球面聚焦透镜62和非球面相位板64共同形成具有细长焦点36的聚焦光束24。该图描绘了工件38的另一个示例,其部分地位于细长焦点36内。在该示例中,标称焦深L大于工件38的厚度。

[0034] 非球面相位板64优选地是衍射光学元件(DOE),其改变从球面聚焦透镜62传播的聚焦光束的波前,以沿光轴30形成细长焦点36。非球面相位板64被定制以匹配球面聚焦透镜62的特定设计。激光切割设备60具有以下优点:球面聚焦透镜62可以从商业光学供应商获得的标准平凸透镜。

[0035] DOE可商购获得,例如来自纽约Rochester的RPC Photonics公司。具有可编程波前调制的有源DOE(也称为“空间光调制器”)也是可商购的,例如来自德国柏林的HoloEye。使

用用于非球面相位板64的有源DOE使得设备60能够对由不同材料制成或具有不同厚度的工件进行激光切割而不需要更换任何光学元件。如果需要,可以将孔径结合到非球面相位板64的设计中,以限制通光孔径CA。

[0036] 图4是示意性地示出图1A的准直的脉冲激光辐射束14中的超短脉冲的脉冲串的时序图。“超短”脉冲在本文中定义为具有小于约20皮秒(ps)的脉冲持续时间“ $\delta T$ ”。通常,较短的脉冲持续时间产生具有较好边缘质量的切割工件。例如,使用具有几百飞秒的 $\delta T$ 的脉冲形成的边缘具有比使用具有几十皮秒的 $\delta T$ 的脉冲形成的边缘更低的表面粗糙度。

[0037] 脉冲串内的各个脉冲被时间间隔“ $T_p$ ”分开,并且连续的脉冲串被时间间隔“ $T_b$ ”分开,时间间隔“ $T_b$ ”是一个脉冲串的第一脉冲与下一个脉冲串的第一脉冲之间的间隔。这些时间间隔分别对应于脉冲重复率和脉冲串频率。工件的脉冲串频率和平移速度决定了沿切割线的缺陷间距。对于由具有特定厚度的特定材料制成的工件,存在最佳的缺陷间隔以实现最佳边缘质量。

[0038] 优选地,每个脉冲串有2到10个脉冲,最优选每个脉冲串有5个脉冲。优选地,脉冲重复率大于约10兆赫兹(MHz)。最优选地,脉冲重复率为约40MHz至约50MHz。优选地,脉冲串频率为约50千赫兹(kHz)至约1MHz。最优选地,脉冲串频率为约100kHz至约400kHz。

[0039] 用于图1的激光切割设备10、图2的激光切割设备50和图3的激光切割设备60的合适的激光源12是从加利福尼亚州圣克拉拉市的Coherent公司获得的HyperRapid™ 50HE激光系统。该激光系统采用主振荡器功率放大器(MOPA)架构,以高达200kHz的脉冲串频率提供能量超过200微焦耳( $\mu J$ )的超短脉冲的脉冲串,相当于最大值可达到的平均功率超过40瓦(W)。每个脉冲串多达10个脉冲是在脉冲重复率约为50MHz的情况下产生的。输出的脉冲激光辐射束具有10ps的典型脉冲持续时间和约1064纳米(nm)的波长。HyperRapid™ 50HE激光系统包括可用作过程快门的声光调制器(AOM)。当AOM打开时,激光系统提供连续的一系列脉冲串。

[0040] 图5示意性地示出了用于图1A的激光切割设备10的非球面聚焦透镜22的示例性非球面32。表面34是平坦的。示例性非球面32(实线)的精确形状通过作为距光轴30的径向位移的函数的平行于光轴30的位移(在光学领域中称为“下垂”)以横截面图示。为了比较,图5包括具有接近非球面32的下垂的商业球面平凸透镜的球面70(虚线)的精确形状。商业球面平凸透镜是来自新泽西的Thorlabs of Newton的部件号LA1027。Thorlabs透镜LA1027的规定焦距为+35毫米(mm)。每个表面的顶点72位于图纸的原点。用于计算非球面32和球面70的精确形状的等式在下文中给出。

[0041] 图6A是示意性地示出作为在典型激光切割设备的焦点附近沿着光轴30的位移的函数的计算强度的曲线图。典型的激光切割设备类似于图2的激光切割设备50,但是具有球面平凸面聚焦透镜,该球面平凸面聚焦透镜具有球面凸面,而不是具有非球面32的非球面聚焦透镜22。该计算使用具有球面70的Thorlabs透镜LA1027,如图5所示。负透镜52是Thorlabs的部件号LC1120,其具有-100mm的特定焦距。用于示例性工件38的入射表面42和出射表面44的位置由图6A中的垂直虚线表示。示例性工件38具有1.51的折射率和1.1mm的厚度。Gorilla™ Glass(纽约Corning的Corning公司提供的化学强化玻璃)和BK7玻璃(通常可用的商用玻璃)的折射率均约为1.51。

[0042] 由Thorlabs透镜LA1027施加到聚焦光束上的球面像差产生细长焦点,这在图6A中

示出在沿光轴的扩展范围内分布的强度,从小于34mm到约37mm。在没有球面像差的情况下,强度分布将是约36.6mm为中心的单个峰。尽管示例性工件的整个厚度暴露于脉冲激光辐射束,但是大部分脉冲能量被输送到示例性工件的外部,这是低效的。

[0043] 图6B是示意性地示出作为在图1A的激光切割设备10的细长焦点36附近沿光轴30的位移的函数的计算强度的曲线图。简单的非球面聚焦透镜22具有焦距“ $f(r)$ ”,其对于扩展的准直光束20内的光线线性地取决于距光轴30的径向位移“ $r$ ”:

$$[0044] \quad f(r) = f(0) - \Delta f \cdot r, \quad (1)$$

[0045] 其中“ $f(0)$ ”是标称焦距,“ $\Delta f$ ”是常数。产生图6B所示强度分布的简单非球面聚焦透镜的标称焦距 $f(0)$ 为25mm,常数 $\Delta f$ 为0.16,通光孔径CA为50mm。扩展的准直光束20具有25mm的高斯光束直径 $2\omega$ 。图6B中描绘的焦点是细长的,但是在沿着光轴的比图6A中所示的细长焦点较小的范围内,这能够将更高比例的脉冲能量输送到工件。图6B示出了本发明中的非球面聚焦透镜22的优点。

[0046] 图6C是示意性地示出作为在图1A的激光切割设备10中沿光轴30的位移的函数的计算强度的曲线图,包括用于计算图6B的简单非球面聚焦透镜22,但具有25mm的较小的通光孔径CA。尽管较小的通光孔径防止13.5%的脉冲能量到达工件38,但是与图6B相比,孔径26的边缘处的衍射沿光轴30形成更均匀的强度分布。图6B中的细长焦点比图6B中所示的细长焦点更好地定义,从约23.2mm的位移延伸到约24.8mm的位移。图6C示出了孔径26与本发明中的非球面聚焦透镜22组合的优点。

[0047] 图7A是示意性地示出作为在图1A的激光切割设备10的细长焦点36附近沿光轴30的位移的函数的计算强度的曲线图,具有图5中所示的示例性非球面32。扩展的准直光束20具有25mm的高斯光束直径 $2\omega$ ,并且孔径26具有30.6mm的直径。孔径26防止扩展的准直光束20中的约5%的脉冲能量到达示例性工件38,其具有1.51的折射率和1.1mm的厚度。

[0048] 图5中描绘的示例性非球面32设计成在示例性工件内形成细长焦点,以最小损耗将脉冲能量输送给示例性工件。在图7A中,几乎所有的激光辐射在约24.1mm的位移与约25.2mm的位移之间被输送到细长焦点,从而暴露出示例性工件的整个厚度。具有示例性非球面32的非球面聚焦透镜22被设计成取向而具有入射在平坦表面34上的扩展的准直光束20以及从示例性非球面32出射的聚焦光束24。非球面聚焦透镜22由BK7玻璃制成,对于波长为 $1.064\mu\text{m}$ 的辐射,折射率为1.51。

[0049] 图7A,7B和7C示出了图1A的激光切割设备10中沿光轴30的强度。激光切割设备10具有示例性非球面32,其中孔径26的直径分别为30.6mm,25.0mm和24.3mm。孔径26分别防止约5%,约10%和约15%的脉冲能量到达示例性工件38。图7A中的最大强度峰值位于出射表面44附近。图7B具有大致均匀的强度分布。图7C所示的最大强度峰值位于入射表面42处。图7A,7B和7C描绘了如何调整细长焦点36中的强度分布以优化特定工件38的切割。在通光孔径CA内部的扩展的准直光束20的部分优选地为约85%至约95%,最优选约90%。

[0050] 图7A,7B和7C所示的计算出的强度分布中的每一个都在整个均匀强度分布具有多个峰值。这些高频峰值或强度调制是由聚焦光束24内的相干激光辐射的光学干涉引起的。沿细长焦点36计算的强度峰值大致对应于使用本发明在工件中产生的延伸缺陷中观察到的调制。类似地,计算强度的谷值有时对应于延伸缺陷中的不连续性。

[0051] 相比于暴露于较低强度的材料,暴露于强度分布中的峰值的材料在较低脉冲能量

下超过受控缺陷形成以及不希望缺陷形成的阈值。因此,在处理脆性材料时考虑峰强度是有用的。“均匀强度分布”在本文中是指总体形状与平均强度相差小于约20%的强度分布,而不考虑由光学干涉引起的高频峰值。“大致均匀的强度分布”在本文中定义为峰值强度与平均峰值强度相差小于约20%的强度分布。

[0052] 现在回到图5,非球面32的精确形状由一组非球面参数“ $\beta$ ”和半径参数“R”限定。非球面32上的每个点都有下垂:

$$[0053] \quad z(r) = \frac{r^2}{R \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2} \right)} + \beta_1 \cdot r + \beta_2 \cdot r^2 + \beta_3 \cdot r^3 + \beta_4 \cdot r^4 + \beta_5 \cdot r^5 + \beta_6 \cdot r^6 + \beta_7 \cdot r^7 + \beta_8 \cdot r^8. \quad (2)$$

[0054] 以毫米为单位的示例性非球面32的精确下垂定义为: $R=22.6\text{mm}$ ,  $\beta_1=3.838 \times 10^{-4}$ ,  $\beta_2=-6.330 \times 10^{-2}\text{mm}^{-1}$ ,  $\beta_3=8.990 \times 10^{-5}\text{mm}^{-2}$ ,  $\beta_4=4.500 \times 10^{-5}\text{mm}^{-3}$ ,  $\beta_5=1.424 \times 10^{-6}\text{mm}^{-4}$ ,  $\beta_6=-4.250 \times 10^{-7}\text{mm}^{-5}$ ,  $\beta_7=2.200 \times 10^{-8}\text{mm}^{-6}$ ,  $\beta_8=-4.650 \times 10^{-10}\text{mm}^{-7}$ 。以mm为单位的球面70的精确下垂是:

$$[0055] \quad z(r) = \frac{r^2}{R \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2} \right)}, \quad (3)$$

[0056] 其中 $R=-18.05\text{mm}$ 。对于球形表面,R对应于表面的物理半径。

[0057] 总之,聚焦脉冲激光束以形成具有均匀强度分布的细长焦点,用于切割脆性材料。上述实施方案使用非球面聚焦透镜和孔径,以由具有横向高斯强度分布的脉冲激光辐射束形成细长焦点。可以优化光学设计以高效地将激光辐射聚焦在脆性材料的整个厚度上,从而产生延伸的缺陷,使得脆性材料能够沿着切割线一次切割。受控且高效地输送激光辐射以产生延伸的缺陷减少了切割由硬脆材料(例如强化玻璃)制成的工件所需的脉冲能量和时间。本发明不依赖于产生自引导细丝以产生每个延伸缺陷。因此,本发明对脉冲激光辐射源的光束特性相对不敏感。

[0058] 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绘的实施方案。相反,本发明仅受所附权利要求的限制。

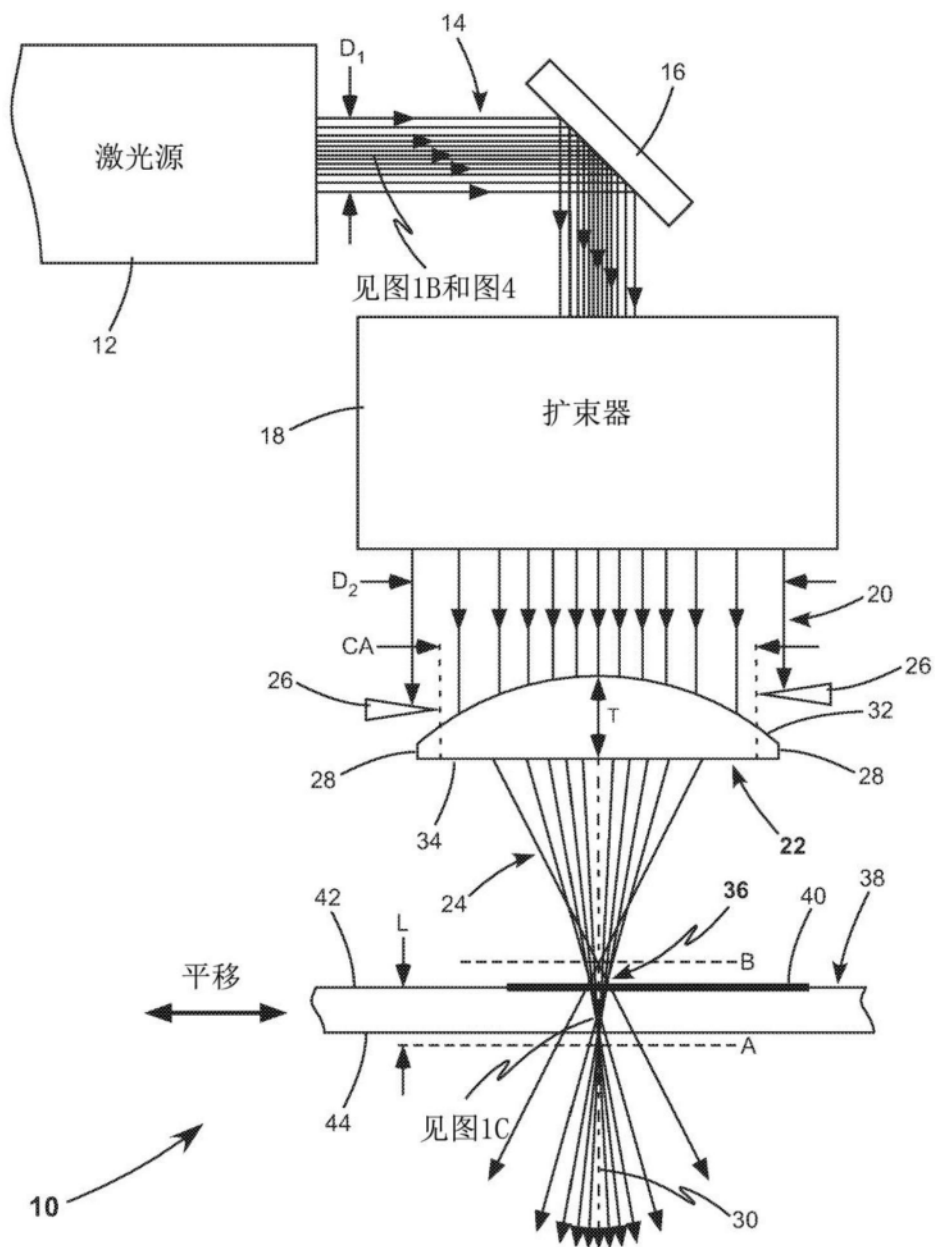


图1A

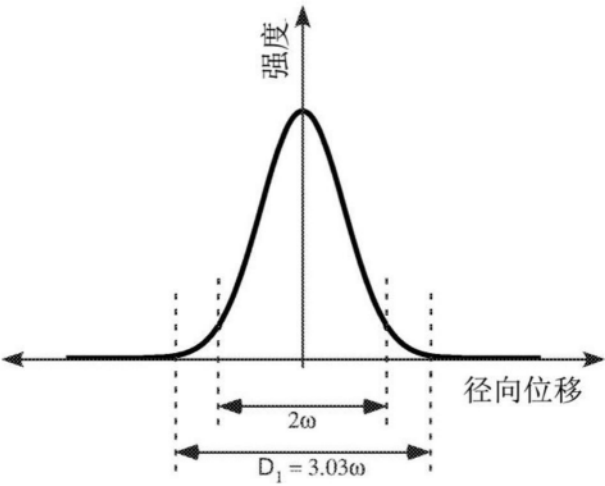


图1B

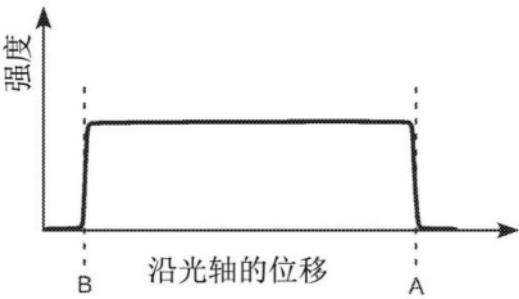


图1C

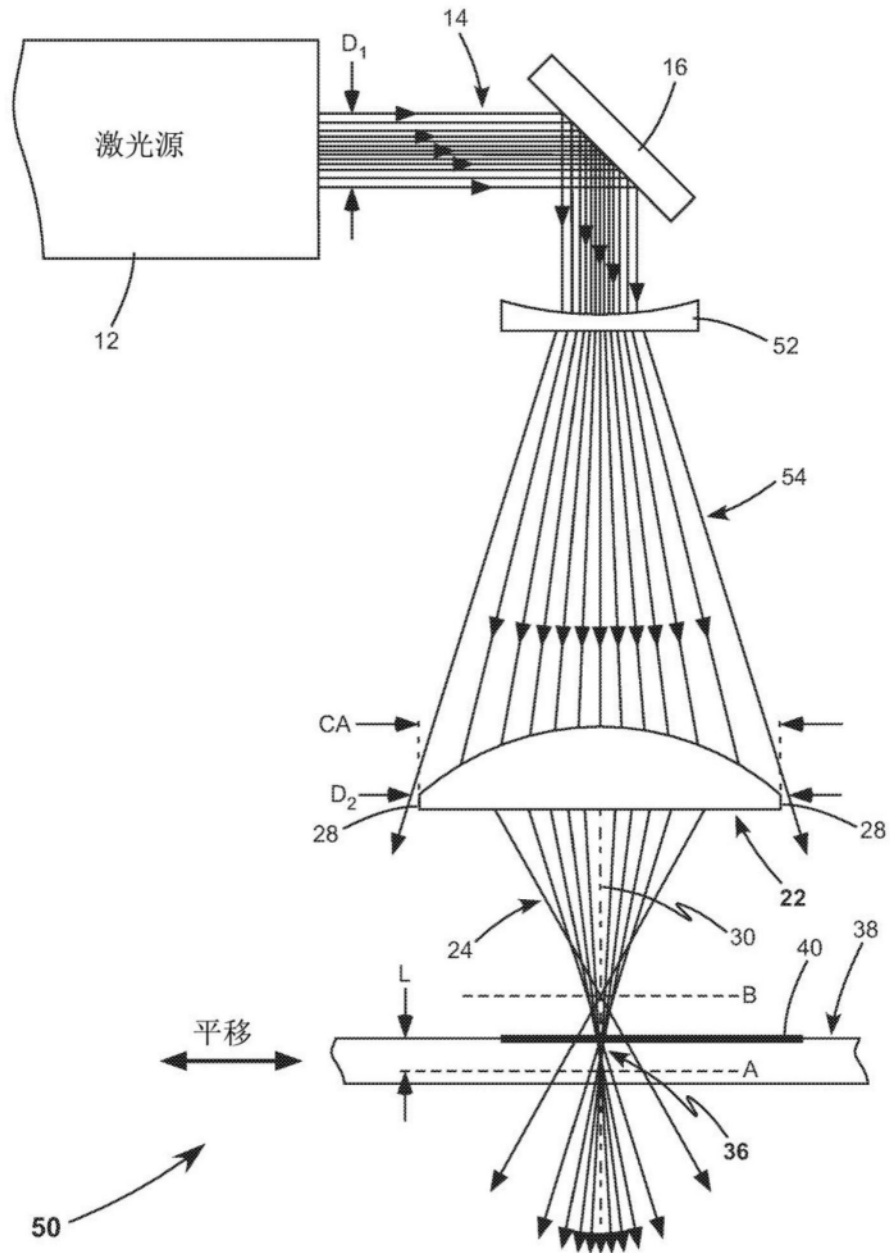


图2

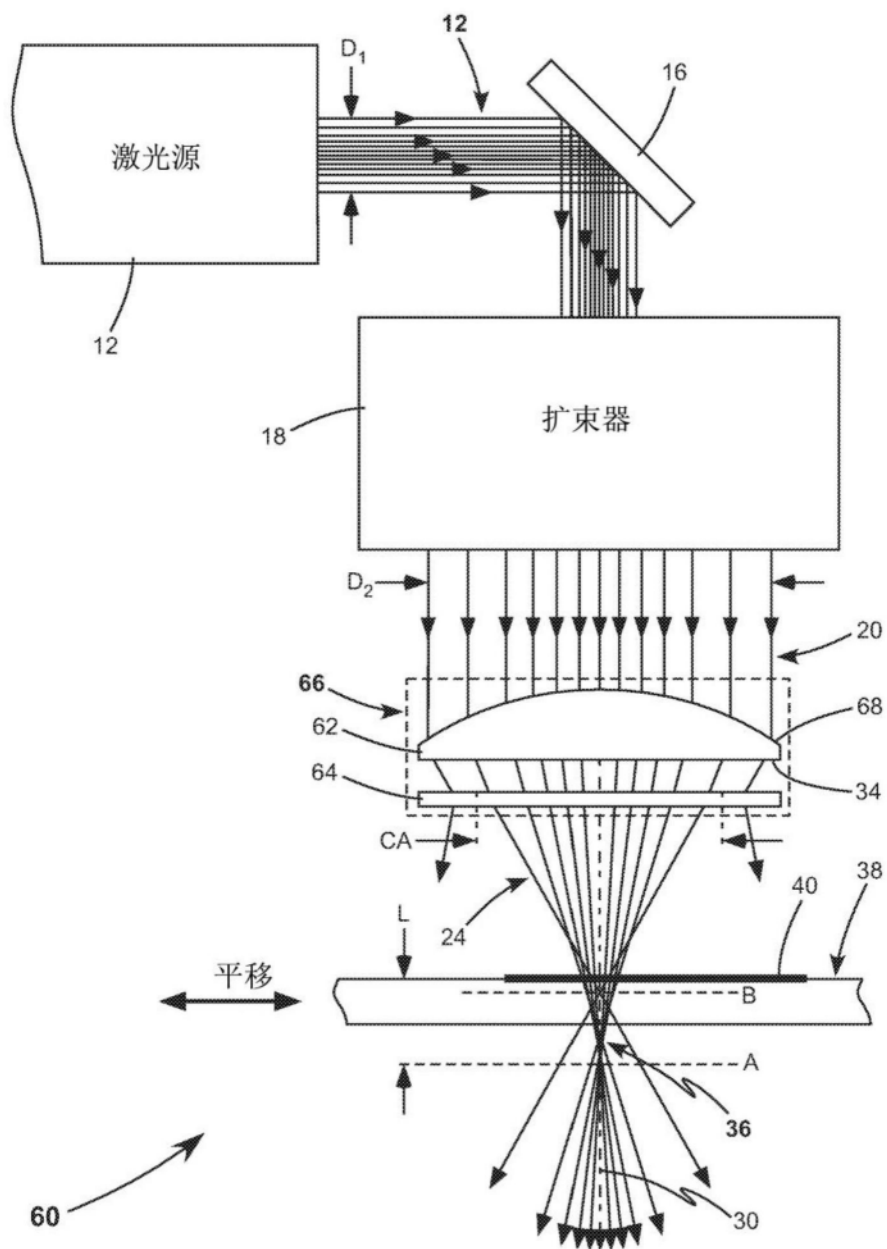


图3

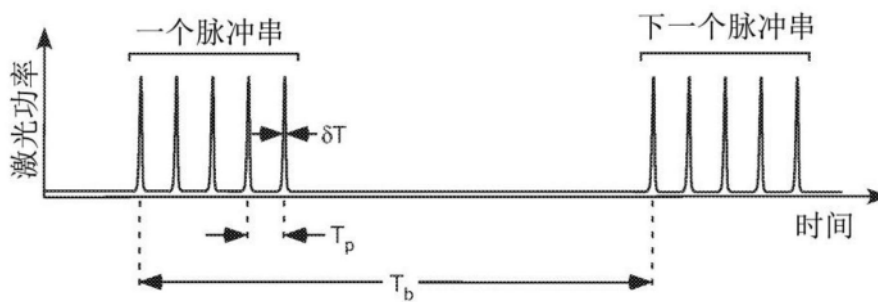


图4

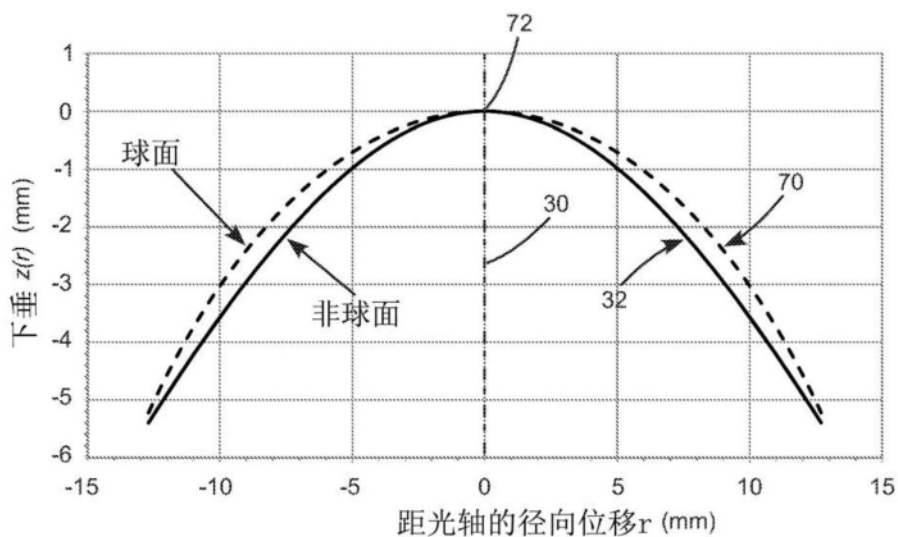


图5

(现有技术)

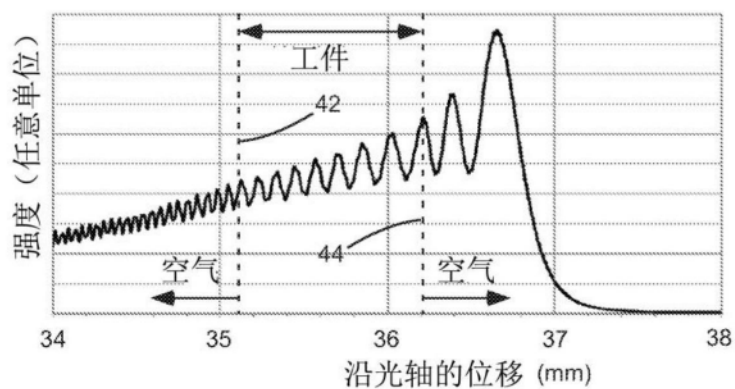


图6A

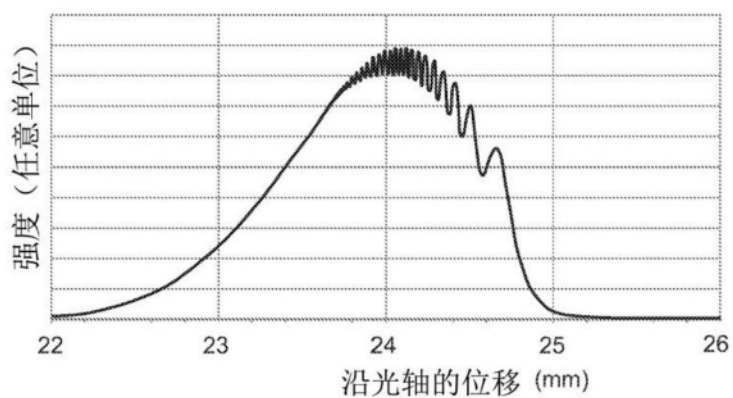


图6B

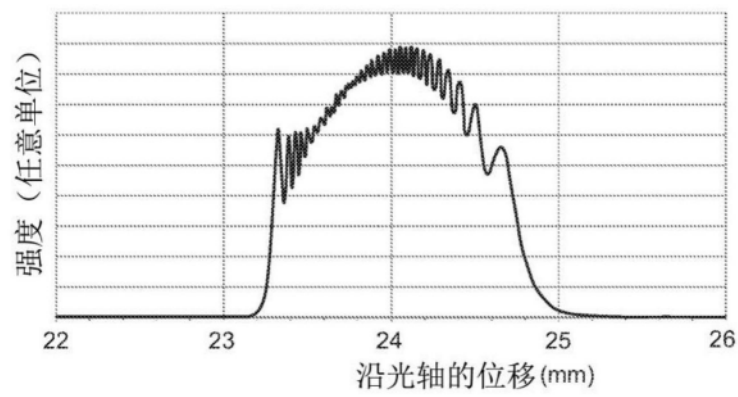


图6C

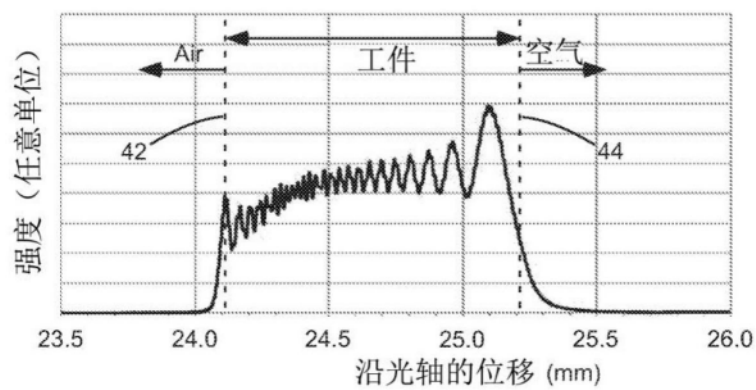


图7A

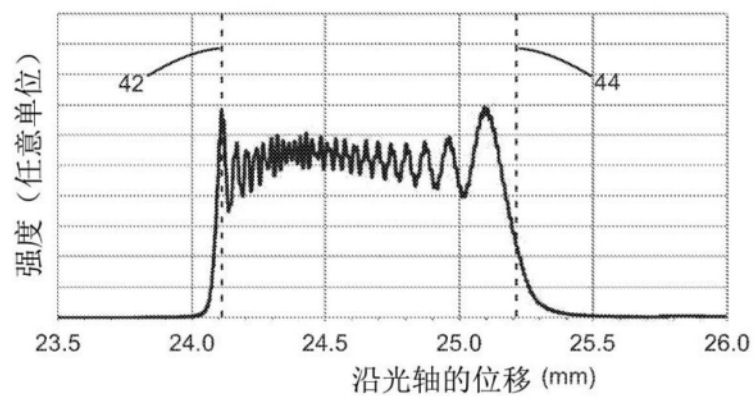


图7B

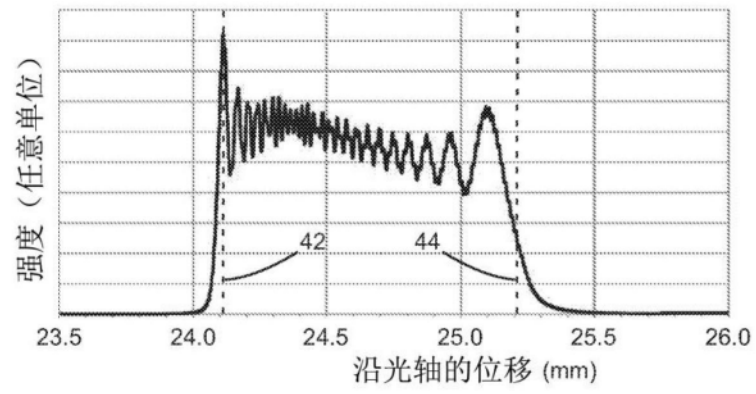


图7C