



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102844941 A

(43) 申请公布日 2012. 12. 26

(21) 申请号 201180010844. 9

(22) 申请日 2011. 02. 24

(30) 优先权数据

12/712, 086 2010. 02. 24 US

(85) PCT申请进入国家阶段日

2012. 08. 24

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2011/026055 2011. 02. 24

(87) PCT申请的公布数据

W02011/106510 EN 2011. 09. 01

(71) 申请人 爱尔康手术激光股份有限公司

地址 美国加利福尼亚

(72) 发明人 M·卡瓦维蒂斯

(74) 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利商标事务所 11038

代理人 李晓芳

(51) Int. Cl.

H01S 3/02(2006. 01)

H01S 3/10(2006. 01)

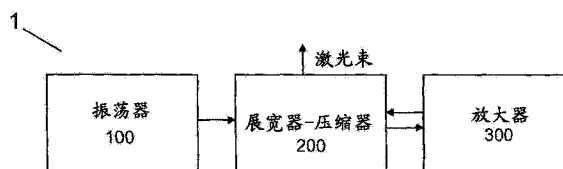
权利要求书 2 页 说明书 29 页 附图 12 页

(54) 发明名称

具有可调节重复率和简化结构的高功率飞秒激光器

(57) 摘要

本发明提供了用于构造并操作飞秒脉冲激光器的设计和技术。激光引擎的一个示例包括：振荡器，其产生并输出飞秒种子脉冲束；展宽器-压缩器，其展宽所述种子脉冲的持续时间，以及放大器，其接收经展宽的种子脉冲，放大所选择的经展宽的种子脉冲的幅度以产生经放大的展宽脉冲，并将所述经放大的展宽脉冲的激光束输出回所述展宽器-压缩器，所述展宽器-压缩器压缩脉冲的持续时间并输出飞秒脉冲的激光束。所述放大器包括色散控制器，所述色散控制器补偿经放大的展宽脉冲的色散，使得在手术之间或根据扫描速度能调节激光的重复率。所述激光引擎可以是紧凑的，总光路小于 500 米，并且具有少量的光学元件，例如，少于 50 个。



1. 一种可变的重复率的激光引擎,包括:
振荡器,其产生并输出飞秒种子脉冲束;
集成的展宽器-压缩器,其展宽所述种子脉冲的持续时间;以及
Q 切换腔倒空再生放大器,其放大所选择的经展宽的种子脉冲的幅度,以产生经放大的展宽脉冲;其中

所述展宽器-压缩器压缩所述经放大的展宽脉冲的持续时间,以便输出飞秒激光脉冲;以及

所述激光引擎的光学元件的数量少于 75。

2. 根据权利要求 1 所述的激光引擎,其中:

所述激光引擎的光学元件的数量少于 50。

3. 根据权利要求 1 所述的激光引擎,其中:

所述激光引擎的除所述振荡器之外的部分中的光学元件的数量少于 50。

4. 根据权利要求 1 所述的激光引擎,其中:

所述激光引擎的除所述振荡器之外的部分中的光学元件的数量少于 35。

5. 根据权利要求 1 所述的激光引擎,其中,光学元件是下列之一:

反射镜、透镜、平行板、偏振器、隔离器、任何可切换的光学元件、折射元件、透射元件或反射元件。

6. 根据权利要求 1 所述的激光引擎,其中:

所述光学元件使得光从空气进入该光学元件并且退出该光学元件而进出空气。

7. 根据权利要求 1 所述的激光引擎,所述集成的展宽器-压缩器包括:

啁啾体布拉格光栅。

8. 根据权利要求 1 所述的激光引擎,所述放大器包括:

色散补偿器,其补偿由所述放大器的光学元件引起的色散。

9. 根据权利要求 1 所述激光引擎,所述放大器包括:

两个端面镜,其限定共振腔;以及

两个折叠式反射镜,其折叠所述放大器内的共振光学通路,其中,所述两个端面镜和所述两个折叠式反射镜中的至少一个是啁啾反射镜。

10. 根据权利要求 1 所述激光引擎,其中:

所述激光引擎被配置为以第一重复率输出激光束;并且

随后用与所述激光引擎的所有光学元件的布置基本相同的布置,以第二重复率输出激光束,其中

所述第一重复率和所述第二重复率在 10kHz-2MHz、50kHz-1MHz 或 100kHz-500kHz 中的一者的范围内。

11. 根据权利要求 10 所述的激光引擎,其中:

所述激光引擎被配置为使得所述第一重复率能够在少于 1 秒的变化时间内变成所述第二重复率。

12. 根据权利要求 1 所述的激光引擎,所述放大器包括:

在所述端面镜之间的可切换的偏振器,所述可切换的偏振器能够在少于 5ns、4ns 和 3ns 中的一者内在以下状态之间切换:

所述可切换的偏振器调节所述经放大的展宽脉冲的偏振的状态 ;以及
所述可切换的偏振器基本不调节所述经放大的展宽脉冲的偏振的状态。

13. 根据权利要求 1 所述的激光引擎,所述放大器包括 :

至少一个聚焦镜 ;以及

激光晶体,其位于极其接近所述聚焦镜的焦点的位置。

14. 一种激光引擎,包括 :

振荡器,其产生并输出飞秒种子脉冲束 ;

展宽器 - 压缩器,其展宽所述种子脉冲的持续时间 ;以及

放大器,其

从所述展宽器 - 压缩器接收经展宽的种子脉冲,

放大所选择的经展宽的种子脉冲的幅度,以产生经放大的展宽脉冲,以及

输出所述经放大的展宽脉冲 ;其中,

所述展宽器 - 压缩器

接收所述经放大的展宽脉冲,

压缩所述经放大的展宽脉冲的持续时间,以及

输出脉冲持续时间少于 1,000 飞秒的的飞秒脉冲的激光束 ;其中,

所述激光引擎中除振荡器之外的部分中的光学元件的数量少于 50。

15. 根据权利要求 14 所述的激光引擎,其中 :

所述激光引擎中的光学元件的数量少于 75。

具有可调节重复率和简化结构的高功率飞秒激光器

技术领域

[0001] 本专利文献涉及飞秒激光器,包括具有可调节重复率的高功率飞秒激光器。

背景技术

[0002] 在许多当今越来越具挑战的激光器应用中,持续要求每个脉冲携带高能量的较短脉冲。这些特征有希望对于激光器应用实现更好的控制和更大的操作速度。在这个领域的进展中,显著的一步是输出飞秒激光脉冲的激光系统的出现及成熟。这些飞秒激光器可以用于各种各样的应用,包括多种不同类型的眼科手术,在这些手术中,这些超短脉冲可以提供良好受控的组织修正。

发明内容

[0003] 本文献提供了用于构造并操作飞秒脉冲激光器的设计和技术,包括具有啁啾脉冲放大的激光系统的示例和实施方式,其中一些具有少量的光学元件,一些具有低的故障频率,其它的具有适当的小的物理空间,还有其它的可以允许在基本不重新调节系统的情况下改变重复率,并且一些降低了对热聚焦的敏感性。

[0004] 例如,激光引擎的一些示例包括:振荡器,其产生并输出飞秒种子脉冲束;展宽器-压缩器,其展宽所述种子脉冲的持续时间;以及放大器,其从所述展宽器-压缩器接收经展宽的种子脉冲,放大所选择的经展宽的种子脉冲的幅度,以产生经放大的展宽脉冲,并且输出经放大的展宽脉冲的激光束,其中,所述展宽器-压缩器接收所述经放大的展宽脉冲的激光束,压缩所述经放大的展宽脉冲的持续时间,并输出脉冲持续时间少于1,000飞秒的飞秒脉冲的激光束,并且所述放大器包括色散补偿器,所述色散补偿器减少所述经放大的展宽脉冲的色散。

[0005] 在一些示例中,振荡器是二极管泵浦光纤振荡器,并输出变换受限的种子脉冲。

[0006] 在一些示例中,振荡器产生种子脉冲持续时间少于1,000飞秒的光束。

[0007] 在一些实施方式中,振荡器输出种子脉冲重复率在10-100MHz和20-50MHz中的一者的范围内的光束。

[0008] 在一些实施方式中,展宽器-压缩器包括啁啾体布拉格光栅。

[0009] 在一些实施方式中,展宽器-压缩器包括光热折射玻璃。

[0010] 在一些实施方式中,展宽器-压缩器将飞秒种子脉冲的持续时间展宽超过10倍。

[0011] 在一些实施方式中,展宽器-压缩器将飞秒种子脉冲的持续时间展宽至1,000-200,000飞秒的展宽持续时间。

[0012] 在一些实施方式中,激光引擎不包含可调谐的展宽器-压缩器。

[0013] 在一些实施方式中,激光引擎包括偏振器以及所述振荡器和所述展宽器-压缩器之间的 $\lambda/4$ 板,它将经展宽的种子脉冲束重定向到放大器。

[0014] 在一些实施方式中,激光引擎包括法拉弟隔离器,所述法拉弟隔离器从展宽器-压缩器接收经展宽的种子脉冲束,朝向放大器输出经展宽的种子脉冲束,从放大器接

收经放大的展宽脉冲的激光束,朝向展宽器-压缩器的压缩器端口输出经放大的展宽脉冲的激光束,并且将振荡器与经放大的展宽脉冲的激光束隔离。

[0015] 在一些实施方式中,放大器包括光学元件,并且色散补偿器引入符号与放大器的光学元件引入的色散相反的色散。

[0016] 在一些实施方式中,由色散补偿器引入的色散与除色散补偿器外的放大器的光学元件在一次往返内引入的色散的幅度基本相等,并且符号相反。

[0017] 在一些实施方式中,色散补偿器包括啁啾反射镜、啁啾光纤、啁啾光栅、棱镜或啁啾透射光学元件中的至少一个。

[0018] 在一些实施方式中,放大器包括放大所选择的经展宽的种子脉冲的幅度的增益材料、限定共振腔的两个端面镜以及折叠放大器内的共振光学通路的两端式反射镜,其中,所述两个端面镜和两个折叠式反射镜中的至少一个是啁啾反射镜。

[0019] 在一些实施方式中,啁啾反射镜在经放大的展宽脉冲中引入负色散。

[0020] 在一些实施方式中,激光引擎被配置为以第一重复率,并且随后用与激光引擎的所有光学元件基本相同的布置、以不同的第二重复率输出光光束。

[0021] 在一些实施方式中,第一重复率和第二重复率落入 10kHz-2MHz、50kHz-1MHz 或 100kHz-500kHz 的范围中的一者内。

[0022] 在一些实施方式中,当未改变的激光引擎针对第一重复率和第二重复率利用不同的光学元件的布置时,激光引擎可以被改变,以用与第一重复率基本相同的所有光学元件的布置,以第二重复率输出激光束。

[0023] 在一些实施方式中,放大器被配置为在保持放大器的光学布置不变的情况下,当改变重复率时,使放大器中的经放大的展宽脉冲的往返次数改变。

[0024] 在一些实施方式中,放大器具有少于 1 米的端面镜-端面镜的折叠式光学通路。

[0025] 在一些实施方式中,放大器是腔倒空再生放大器、啁啾脉冲放大器或 Q 切换放大器。

[0026] 在一些实施方式中,放大器在端面镜之间的光学通路中包括可切换的偏振器,它可以通过在可切换的偏振器调节经放大的展宽脉冲的偏振的调节偏振状态和可切换的偏振器基本不调节经放大的展宽脉冲的偏振的不调节偏振状态之间切换来选择经展宽的脉冲。

[0027] 在一些实施方式中,激光引擎可以包括高电压功率开关,所述高电压功率开关以少于 5 纳秒、4 纳秒或 3 纳秒的上升时间控制可切换的偏振器从不调节偏振状态转换至调节偏振状态。

[0028] 在一些实施方式中,激光引擎在 1-120 秒、10-60 秒和 20-50 秒中的一者之内将飞秒脉冲的激光束的第一重复率变为第二重复率。

[0029] 在一些实施方式中,激光引擎在处于 1 μ s-1s 范围的变化时间内将飞秒脉冲的激光束的第一重复率变为第二重复率。

[0030] 在一些实施方式中,放大器包括至少一个聚焦镜和位于与聚焦镜的焦点接近之处的激光晶体。

[0031] 在一些实施方式中,激光引擎被配置为使得当激光引擎的重复率从第一值改变为第二值时(两个值的范围均为 10kHz-2MHz),那么所输出的激光束的直径的改变小于 10% 和

20% 中的一个,或者所输出的激光束的中心的移动小于光束直径的 20% 和 40% 中的一个。

[0032] 在一些实施方式中,激光束的飞秒脉冲的能量范围为 1-100 μ J/ 脉冲、10-50 μ J/ 脉冲或 20-30 μ J/ 脉冲中的一个。

[0033] 在一些实施方式中,激光引擎输出功率大于 0.1W、1W 或 10W 中的一个的激光束。

[0034] 在一些实施方式中,激光引擎是眼科手术系统的一部分。

[0035] 在一些实施方式中,用激光引擎产生激光束的方法包括以下步骤:用振荡器产生持续时间少于 1000 飞秒的种子脉冲束;使用脉冲展宽器展宽所述种子脉冲的持续时间;使用放大器放大所选择的经展宽的种子脉冲的幅度,以产生经放大的展宽脉冲;使用脉冲压缩器将经放大的展宽脉冲的持续时间压缩至少于 1,000 飞秒;输出具有 10kHz-2MHz 范围内的第一重复率并且脉冲持续时间少于 1,000 飞秒的飞秒脉冲的激光束;在基本不改变激光引擎的光学布置的情况下,将所述重复率从第一重复率变为 10kHz-2MHz 范围内的第二重复率,以及输出具有第二重复率并且脉冲持续时间少于 1,000 飞秒的飞秒脉冲的激光束。

[0036] 在一些实施方式中,放大的步骤包括在放大器中利用色散补偿器,以减少由放大器的光学组件引起的经放大的展宽脉冲的色散。

[0037] 在一些实施方式中,减少色散的步骤包括通过放大器中的至少一个啁啾反射镜引入补偿色散,其中,补偿色散与每次往返除色散补偿器之外的放大器的所有光学元件引入的色散幅度基本相等并且符号相反。

[0038] 在一些实施方式中,改变重复率的步骤包括在保持放大器的光学布置基本不变的同时改变放大器中往返的次数。

[0039] 在一些实施方式中,由同一个展宽器-压缩器执行展宽步骤和压缩步骤。

[0040] 在一些实施方式中,在已完成输出具有第一重复率的激光束之后,输出具有在 1-120 秒、10-60 秒或 20-50 秒中的一者之内第二重复率的激光束。

[0041] 在一些实施方式中,在处于 1 μ s-1s 范围的变化时间内,将重复率从第一重复率变为第二重复率。

[0042] 在一些实施方式中,激光引擎包括:振荡器,其产生脉冲持续时间少于 1000 飞秒的脉冲光束;展宽器-压缩器,其展宽所述光束的脉冲的持续时间;以及放大器,其放大经展宽的光脉冲的幅度,以产生经放大的展宽脉冲,其中,所述展宽器-压缩器压缩经放大的展宽脉冲的持续时间,并输出激光脉冲的光束;并且激光引擎可操作于输出具有处于 10kHz-2MHz 范围内的第一重复率的激光脉冲束,并且随后利用与激光引擎的所有光学元件基本相同的布置,输出具有处于 10kHz-2MHz 范围内的第二重复率的激光脉冲束,对于第一重复率和第二重复率,激光脉冲的持续时间少于 1000 飞秒。

[0043] 在一些实施方式中,放大器包括色散补偿器,所述色散补偿器至少部分地补偿由放大器的光学元件引入的色散。

[0044] 在一些实施方式中,放大器在放大器的端面镜之间包括可切换的偏振器,所述可切换的偏振器以少于 5 纳秒、4 纳秒和 3 纳秒的上升时间,在可切换的偏振器调节经放大的展宽脉冲的偏振的状态和可切换的偏振器不调节经放大的展宽脉冲的偏振的状态之间切换。

[0045] 在一些实施方式中,放大器包括至少一个聚焦镜;以及位于所述聚焦镜的焦点附近的增益晶体。

[0046] 在一些实施方式中,激光引擎在少于 60 秒、1 秒和 $10\mu\text{s}$ 中的一者的时间内,在第一重复率和第二重复率之间切换。

[0047] 在一些实施方式中,激光引擎包括:振荡器,其输出飞秒种子脉冲;展宽器,其展宽所述种子脉冲的持续时间;放大器,其将经展宽的种子脉冲放大成经放大的展宽脉冲,并且包括色散补偿器,用于补偿由放大器的光学元件引入的经放大的展宽脉冲的色散;以及压缩器,其接收经放大的展宽脉冲,压缩所述经放大的展宽脉冲的持续时间,并输出飞秒脉冲的激光束。

[0048] 在一些实施方式中,重复率可变的激光引擎包括 Q 切换腔倒空再生放大器,所述放大器包括两个端面镜,其中,所述激光引擎输出飞秒激光脉冲;并且端面镜之间的光学通路的长度小于 2 米。

[0049] 在一些实施方式中,端面镜之间的光学通路的长度小于 1 米。

[0050] 在一些实施方式中,激光引擎包括振荡器,所述振荡器产生被传输至放大器的种子脉冲,其中,从在振荡器中产生种子脉冲的光子的点至激光引擎输出激光脉冲的点之间的总自由空间的光路长度小于 500 米、300 米和 150 米中的一个。

[0051] 在一些实施方式中,放大器的腔的所有边缘尺寸小于 1 米或 0.5 米中的一个,其中,所述放大器的腔容纳放大器的所有光学元件。

[0052] 在一些实施方式中,放大器的占地面积小于 1m^2 或 0.5m^2 中的一个。

[0053] 在一些实施方式中,激光引擎包括展宽器-压缩器,所述展宽器-压缩器包括啁啾体布拉格光栅。

[0054] 在一些实施方式中,放大器包括色散补偿器,所述色散补偿器补偿由放大器的光学元件引入的色散。

[0055] 在一些实施方式中,放大器包括放大激光脉冲的幅度的激光晶体;以及折叠放大器内的共振光学通路的两个折叠式反射镜,其中两个端面镜和两个折叠式反射镜中的至少一个是啁啾反射镜。

[0056] 在一些实施方式中,激光引擎被配置为输出具有处于重复率范围内的第一重复率的激光束;并且随后用与激光引擎的所有光学元件基本相同的布置,输出具有处于该重复率范围内的第二重复率的激光束。

[0057] 在一些实施方式中,第一重复率和第二重复率落入 10kHz-2MHz、50kHz-1MHz 或 100kHz-500kHz 中的一者的范围内。

[0058] 在一些实施方式中,激光引擎被配置为使得在少于 60 秒、1 秒和 $1\mu\text{s}$ 中的一者的时间内,第一重复率可变为第二重复率。

[0059] 在一些实施方式中,放大器在端面镜之间包括可切换的偏振器,所述可切换的偏振器能够在少于 5ns、4ns 或 3ns 中的一者内,在可切换的偏振器调节经放大的脉冲的偏振的状态和可切换的偏振器基本不调节经放大的脉冲的偏振的状态之间切换。

[0060] 在一些实施方式中,放大器包括至少一个聚焦端面镜;以及位于与所述聚焦端面镜的焦点接近之处的激光晶体。

[0061] 在一些实施方式中,激光引擎包括:振荡器,其产生并输出飞秒脉冲束;展宽器-压缩器,其展宽种子脉冲的持续时间;以及放大器,其从所述展宽器-压缩器接收经展宽的种子脉冲,放大所选择的经展宽的种子脉冲的幅度,以产生经放大的展宽脉冲,并且输

出经放大的展宽脉冲的激光束 ;其中,所述展宽器 - 压缩器接收经放大的展宽脉冲的激光束,压缩经放大的展宽脉冲的持续时间,并且输出脉冲持续时间少于 1,000 飞秒的飞秒脉冲的激光束 ;其中,从在振荡器中产生种子脉冲的光子的点至激光引擎输出激光脉冲的端点的光路长度小于 500 米。

[0062] 在一些实施方式中,光路的长度小于 300 米。

[0063] 在一些实施方式中,重复率可变的激光引擎包括 :振荡器,其产生并输出飞秒种子脉冲的光束 ;展宽器 - 压缩器,其展宽所述种子脉冲的持续时间 ;以及啁啾脉冲放大器,其放大所选择的经展宽的种子脉冲的幅度,以产生经放大的展宽脉冲,其中,所述放大器包括切换时间少于 5ns 的可切换的偏振器,所述展宽器 - 压缩器将经放大的展宽脉冲的持续时间压缩至飞秒值 ;并且所述激光引擎占据小于 1m² 的面积。

[0064] 在一些实施方式中,激光引擎是外科激光系统的一部分,所述外科激光系统在所述外科激光系统的顶部平台上具有成像系统和激光引擎。

[0065] 在一些实施方式中,重复率可变的激光引擎包括 :振荡器,其产生并输出飞秒种子脉冲束 ;集成的展宽器 - 压缩器,其展宽所述种子脉冲的持续时间 ;以及 Q 切换腔倒空再生放大器,其放大所选择的经展宽的种子脉冲的幅度,以产生经放大的展宽脉冲 ;其中,所述展宽器 - 压缩器压缩经放大的展宽脉冲的持续时间,以输出飞秒激光脉冲,并且激光引擎的光学元件的数量少于 75。

[0066] 在一些实施方式中,激光引擎的光学元件的数量少于 50。

[0067] 在一些实施方式中,激光引擎的除振荡器外的部分中的光学元件的数量少于 50。

[0068] 在一些实施方式中,激光引擎的除振荡器外的部分中的光学元件的数量少于 35。

[0069] 在一些实施方式中,光学元件是下列元件之一 :反射镜、透镜、平行板、偏振器、隔离器、任何可切换的光学元件、折射元件、透射元件或反射元件。

[0070] 在一些实施方式中,光学元件使光进出空气。

[0071] 在一些实施方式中,集成的展宽器 - 压缩器包括啁啾体布拉格光栅。

[0072] 在一些实施方式中,放大器包括色散补偿器,所述色散补偿器补偿由放大器的光学元件引入的色散。

[0073] 在一些实施方式中,放大器包括限定共振腔的两个端面镜 ;以及折叠放大器内的共振光学通路的一个折叠式反射镜,其中,两个端面镜和两个折叠镜中的至少一个是啁啾反射镜。

[0074] 在一些实施方式中,激光引擎被配置为输出具有处于重复率范围内的第一重复率的激光束 ;并且随后用与激光引擎的所有光学元件基本相同的布置,输出具有处于该重复率范围内的第二重复率的激光束,其中,所述第一重复率和第二重复率在 10kHz-2MHz、50kHz-1MHz 或 100kHz-500kHz 中的一者的范围内。

[0075] 在一些实施方式中,激光引擎被配置为使得在少于 1 秒的变化时间内所述第一重复率可变为所述第二重复率。

[0076] 在一些实施方式中,放大器包括端面镜之间的可切换的偏振器,所述可切换的偏振器可以在少于 5ns、4ns 和 3ns 中的一者内在可切换的偏振器调节经放大的展宽脉冲的偏振的状态和可切换的偏振器基本不调节经放大的展宽脉冲的偏振的状态之间切换。

[0077] 在一些实施方式中,放大器包括至少一个聚焦镜 ;以及位于与所述聚焦镜的焦点

接近之处的激光晶体。

[0078] 在一些实施方式中,激光引擎包括:振荡器,其产生并输出飞秒种子脉冲束;展宽器-压缩器,其展宽所述种子脉冲的持续时间;以及放大器,其从所述展宽器-压缩器接收经展宽的种子脉冲,放大所选择的经展宽的种子脉冲的幅度,以产生经放大的展宽脉冲,并输出经放大的展宽脉冲;其中,所述展宽器-压缩器接收所述经放大的展宽脉冲,压缩所述经放大的展宽脉冲的持续时间,并输出脉冲持续时间少于 1,000 飞秒的飞秒脉冲的激光束;其中,所述激光引擎的除所述振荡器外的部分中的光学元件的数量少于 50。

[0079] 在一些实施方式中,激光引擎的光学元件的数量少于 75。

[0080] 在一些实施方式中,用激光系统扫描的方法包括以下步骤:用激光引擎产生具有可变重复率的激光脉冲;用扫描激光传递系统将激光脉冲聚焦于目标区域中的聚焦点;用扫描激光传递系统在目标区域中以一定扫描速度扫描聚焦点;改变扫描速度;并且用重复率控制器根据改变后的扫描速度调节重复率。

[0081] 在一些实施方式中,产生的步骤包括:通过振荡器产生飞秒种子脉冲;通过展宽器-压缩器展宽种子脉冲;通过放大器将所选择的经展宽的种子脉冲放大成经放大的展宽脉冲;以及通过展宽器-压缩器将经放大的展宽脉冲压缩成飞秒激光脉冲。

[0082] 在一些实施方式中,所述方法包括调节重复率,以大致将目标区域中的由激光产生的泡的密度维持在所选择的值左右。

[0083] 在一些实施方式中,泡的密度是线密度、面密度或体密度中的一者。

[0084] 在一些实施方式中,调节重复率的步骤包括与扫描速度成比例地调节重复率。

[0085] 在一些实施方式中,调节重复率的步骤包括在 $1\ \mu\text{s}$ - 1s 的时间范围内,将重复率从第一值调节为第二值。

[0086] 在一些实施方式中,扫描聚焦点的步骤包括沿着最小加速度路径扫描聚焦点。

[0087] 在一些实施方式中,所述方法包括沿着 Z 形转向路径 XY 扫描聚焦点;并且当接近路径的 Z 形转向部分时放慢重复率。

[0088] 在一些实施方式中,所述方法包括沿着螺旋形扫描激光束;并且当扫描接近螺旋形的中心时放慢重复率。

[0089] 在一些实施方式中,调节重复率包括由重复率控制器通过以下方式之一接收与改变后的扫描速度相关的信息:感测改变的扫描速度,以及从处理器或存储器获得与改变后的扫描速度相关的电子信息,并根据接收到的与改变后的扫描速度相关的信息调节重复率。

[0090] 在一些实施方式中,重复率可变的激光扫描系统包括:振荡器,其产生并输出飞秒种子脉冲束;展宽器-压缩器,其展宽所述种子脉冲持续的时间,从放大器接收经放大的展宽脉冲,压缩经放大的展宽脉冲的持续时间,并输出具有一重复率的飞秒脉冲的激光束;放大器,其从所述展宽器-压缩器接收经展宽的种子脉冲,放大所选择的经展宽的种子脉冲的幅度,以产生经放大的展宽脉冲,并向所述展宽器-压缩器输出经放大的展宽脉冲;以及扫描光学器件,其以可变的扫描速度扫描目标区域中的激光束的聚焦点,以产生光致破裂点;其中,所述激光扫描系统改变重复率,以产生具有预定密度分布的光致破裂点。

[0091] 在一些实施方式中,放大器包括色散补偿器,所述色散补偿器减少经放大的展宽脉冲的色散。

[0092] 在一些实施方式中,放大器包括可切换的偏振器,所述可切换的偏振器旋转放大器中经展宽的脉冲的偏振平面,其中,可切换的偏振器的上升时间少于 5ns、4ns 或 3ns 中的一者。

[0093] 在一些实施方式中,激光扫描系统包括控制电子元件,所述控制电子元件向可切换的偏振器施加控制信号,以致使可切换的偏振器以少于 5ns、4ns 和 3ns 中的一者的上升时间切换。

[0094] 在一些实施方式中,用激光引擎扫描的方法包括以下步骤:产生具有一重复率的飞秒激光脉冲;将激光脉冲聚焦到目标区域中的聚焦点,以产生光致破裂点;以一扫描速度扫描目标区域中的聚焦点;并且在扫描期间调节重复率,以产生具有一密度分布的光致破裂点。

[0095] 在一些实施方式中,调节步骤包括产生光致破裂点,其中线点密度、面点密度和体点密度中的一个在目标区域中保持基本相等。

[0096] 在一些实施方式中,调节步骤包括根据扫描速度的变化调节重复率。

[0097] 在一些实施方式中,调节步骤包括与扫描速度成比例地调节重复率。

[0098] 在一些实施方式中,调节重量重复率的步骤包括在 $1\mu\text{s}$ -1s 的时间范围内,将重复率从第一值调节为第二值。

[0099] 在一些实施方式中,产生步骤包括:通过振荡器产生飞秒种子脉冲;通过展宽器-压缩器展宽所述种子脉冲;通过放大器将所选择的经展宽的种子脉冲放大成经放大的展宽脉冲;以及通过展宽器-压缩器将经放大的展宽脉冲压缩成飞秒激光脉冲。

[0100] 在一些实施方式中,扫描聚焦点的步骤包括沿着最小加速度路径扫描聚焦点。

[0101] 在一些实施方式中,所述方法包括沿着 Z 形转向路径扫描聚焦点;并且当接近路径的 Z 形转向部分时放慢重复率。

[0102] 在一些实施方式中,所述方法包括沿着螺旋形扫描激光束;并且根据接近螺旋形的中心的扫描放慢重复率。

[0103] 在一些实施方式中,所述方法包括沿线的端部或线的转角中的一者扫描激光束;并且根据接近线的端部和线的转角中的一者的扫描放慢重复率。

[0104] 在一些实施方式中,所述方法包括接收存储或感测到的与扫描速度相关的信息,并且根据接收到的与扫描速度相关的信息,调节重复率。

[0105] 在一些实施方式中,所述方法包括接收感测到的或已成像的与目标区域相关的信息,并且根据接收到的与目标区域相关的信息,调节重复率。

[0106] 在一些实施方式中,激光引擎可以包括:振荡器,其输出飞秒种子光学脉冲;以及放大器,其放大种子光学脉冲,以产生经放大的光学脉冲。这种放大器包括:光学腔,其被耦合用于接收并循环种子光学脉冲;以及光学开关器件,其耦合至光学腔,用于控制将接收到的种子光学脉冲的光耦合入光学腔中,并且控制将光学腔内的光耦合出去,作为放大器的输出光。光学开关器件被配置为控制并调节耦合入光学腔内的光的往返次数,以控制并调节放大器产生的经放大的光学脉冲的脉冲重复率。该放大器还包括:光学腔内的光学增益介质,其用于将种子光学脉冲放大成经放大的光学脉冲;以及光学腔内的色散补偿器,其用于补偿由放大器引起的经放大的光学脉冲的色散。激光引擎包括在放大器外部的一个或多个光学元件,以在将每个种子光学脉冲耦合入放大器中之前展宽所述种子光学脉冲的持续

时间,并且压缩放大器输出的经放大的光学脉冲的持续时间,以产生经放大的光学脉冲。激光引擎可以被配置为不用在放大器外部设置色散补偿装置来补偿由放大器引入的经放大的光学脉冲的色散。

[0107] 在其它实施方式中,操作激光引擎以产生飞秒光学脉冲的方法可以包括:展宽飞秒种子光学脉冲,以在每个脉冲中产生光功率降低的经展宽的种子光学脉冲;以及将经展宽的种子光学脉冲耦合入光学放大器的光学腔中,以放大每个经展宽的种子光学脉冲的光功率,从而产生经放大的展宽光学脉冲。在光学放大器的内部,光学补偿器用于为每个光学脉冲提供色散补偿,其中,所述光学补偿器被构造为引入与光在放大器的光学腔内往返一次由放大器引入的色散(由色散补偿器引起的色散除外)的符号相反并且幅度基本相等的色散。这种方法包括:操作耦合至光学腔的光学开关器件,以控制经展宽的种子光学脉冲的光耦合入光学腔内,并且控制经放大的展宽光学脉冲的光耦合出光学腔;压缩来自光学腔的经放大的展宽光学脉冲的脉冲持续时间,以产生经压缩的放大光学脉冲作为激光引擎的输出;以及操作光学开关器件,以控制并调节光在光学腔内往返的次数,以在不使用位于放大器外部的色散补偿装置的情况下,控制并调节经压缩的放大光学脉冲的脉冲重复率,从而补偿由放大器引起的色散。

附图说明

- [0108] 图 1A-B 示出高功率飞秒激光引擎 1 的两个实施例。
- [0109] 图 2 更详细地示出高功率飞秒激光引擎 1 的实施例。
- [0110] 图 3A 示出啁啾激光脉冲的概念。
- [0111] 图 3B 示出展宽器 200' 和压缩器 400 的示例。
- [0112] 图 3C 示出集成的展宽器-压缩器 200 的实施方式。
- [0113] 图 4 示出放大器 300 的实施例。
- [0114] 图 5A-B 示出激光腔的泵浦-增益-倒空循环。
- [0115] 图 6A-D 示出具有恒定重复率和可变重复率的扫描外科图案。
- [0116] 图 7A-B 示出与放大器 300 中激光晶体 310 在两种不同温度下的热聚集相关的设计难点。
- [0117] 图 7C-D 示出热聚焦减少的放大器 300 的两种实施方式。
- [0118] 图 8 示出光束光功率作为操作温度的函数的相关性。

具体实施方式

[0119] 在早期的飞秒激光器中,脉冲长度极短导致这些脉冲中的功率极高。然而,这种高功率恐怕会损坏激光器的增益介质。已经有了啁啾脉冲放大(CPA)形式的解决方案。在这种技术中,产生飞秒种子脉冲,接着通过将种子脉冲的长度展宽 10-1000 倍,到达皮秒范围,从而急剧降低脉冲内的功率。可以用增益介质安全地放大这些经展宽的脉冲而不造成损害。放大之后接着进行压缩,将经放大的脉冲长度压缩回到飞秒。当今已在众多应用中引入这种 CPA 方法。

[0120] 然而,CPA 激光器也有缺点。通常,这些激光器具有大量的光学元件并且相应地十分复杂。这些因素使得故障频率非常高,并且减少了能够可靠开启和关闭激光器的次数。另

外,因为这些 CPA 激光器通常是在外科手术套房或手术室中受限制的空间中使用,所以 CPA 激光器非常大的尺寸致使将它们整合到医疗设备中非常困难。此外,如果不同的手术要求改变脉冲的重复率,则这种改变需要对大量的光学元件执行耗时的重新调节。另外,热聚焦对大多数 CPA 激光器的光学性能影响很大,使得它们对激光器的操作功率十分敏感。这种敏感性是重复率改变的另一障碍。

[0121] 可以实现在本文献中描述的构造和操作飞秒脉冲激光器的激光器设计和技术,以同时解决其它飞秒激光器中的各种技术问题。

[0122] 图 1A 示出啁啾脉冲放大(CPA)或者腔倒空再生放大器(CDRA)激光引擎 1,其包括振荡器 100、展宽器-压缩器 200 和光学放大器 300。

[0123] 振荡器 100 可以产生并输出飞秒种子脉冲的光束。展宽器-压缩器 200 可以展宽这些种子脉冲的持续时间。放大器 300 可以从展宽器-压缩器 200 接收经展宽的种子脉冲,放大经展宽的脉冲的幅度,并且输出经放大的展宽脉冲的激光束。可以将这些经放大的展宽脉冲光学地耦合回展宽器-压缩器 200 中,展宽器-压缩器 200 可以压缩经放大的展宽脉冲的持续时间并输出飞秒脉冲的激光束。

[0124] 图 1B 示出另一个 CPA 激光引擎 1' 的示例,其中,处于光学振荡器 100' 和光学脉冲展宽器 200' 下游的光学放大器 300' 可以将经放大的展宽脉冲光学耦合至独立的压缩器 400,压缩器 400 可以压缩经放大的展宽脉冲并输出飞秒脉冲的激光束。

[0125] 对激光引擎 1 和 1' 的描述包含许多控制功能和方法步骤。可以用一个或多个控制器、处理器和其它计算机控制器控制这些功能和步骤。这些控制器、处理器和计算机控制器可以利用高级软件,从而彼此进行交互。为了清楚地表述,本专利文献的图中删掉了这些处理器、控制器及其对应软件,但在一些实施方式中它们应当是对激光器发动机 1 和 1' 的描述的一部分。

[0126] 虽然将就诸如白内障手术、晶状体囊切开术或角膜手术之类的眼科应用描述本专利申请中的几个示例,但是激光引擎 1 的实施方式可用于相当广泛的应用范围,包括诸如视网膜和角膜外科手术的各种各样的眼科手术以及皮肤病和牙科的应用、不同的外科手术应用和各种材料加工应用,所述材料加工应用采用激光光致破裂或一些其它激光辅助处理将材料片成型。

[0127] 如上面指出的,一些啁啾脉冲放大 CPA/CDRA 激光引擎有各种缺点。激光引擎 1 的实施例可以被配置为通过采用下面的设计原理及其它设计思想中的部分或全部来提供这些问题的解决方案:

[0128] (1) 许多激光器具有大量的光学元件(比如上百个或更多),使得它们的设计复杂并且造价昂贵。在这种背景下,激光引擎 1 的实施例可以具有少至共 50 个光学元件,并且在振荡器 100 外部不超过 35 个光学元件。

[0129] (2) 具有大量光学元件并且具有相应复杂性的激光器可以具有高故障频率。在一些 CPA/CDRA 激光器中,在激光器“循环”(即,开启和关闭 30-40 次)后,出现故障的可能性可以变得非常高。这类系统可能需要在开关循环 30-40 次后或更频繁地进行定期维护,以预先解决在激光器常规操作期间出现的实际故障。

[0130] 在这个背景下,因为大大减少了光学元件的数量并且提出新的色散控制解决方案,所以激光引擎 1 的实施例可以在常规操作的预期下循环 100 次、120 次或更多次,从而大

大降低了所需的维修频率并提高了总体可靠性。

[0131] (3) 如下面所描述的,一些 CPA/CDRA 激光器占用的物理空间大并且相应地往返持续时间长,这意味着充电的时间长,从而限制了其重复率以及它们用于空间受限的外科设备中的用途。

[0132] 在这个背景下,激光引擎 1 的实施例可以具有小型共振腔,在一些实施例中,所述共振腔可以具有小于 1 米的端面镜-端面镜的光学通路,并且在其它实施例中,它具有小于 2 米的端面镜-端面镜的光学通路。这种小型化也是引起激光引擎 1 具有高重复率的因素,所述重复率可能高达 300kHz、500kHz 或者甚至 1,000kHz。

[0133] 尽管这些激光器具有高重复率,但上述的小型化可以意味着从产生光子的点至退出点测量得到的并包括腔内所有往返的整个光学通路低至 150 米。

[0134] (4) 一些 CPA/CDRA 激光器可以被精细调谐,以在特定重复率下进行操作。这种调谐可以涉及用压缩器 200/400 以特定重复率补偿展宽器 200 和放大器 300 的色散。然而,如果应用需要改变重复率,则展宽器和放大器在这个新的重复率下引起不同的色散,从而打乱了 CPA/CDRA 激光器的经精细调谐的色散补偿。为了补偿这种改变的色散,通常,需要以费时的工序重新调节展宽器 200 和压缩器 200/400 的光学元件。这种重新调节使得在眼科外科手术的时间量程上改变这些 CPA/CDRA 激光器的重复率在技术上是棘手的。因此,大多数商用眼科 CPA 激光器不提供可变重复率的功能,并且不提供在外科手术期间可改变的重复率。

[0135] 在这个背景下,激光引擎 1 的实施例可以包括能够降低或者甚至最小化由放大器 300 引起的激光束的色散的色散控制器或色散补偿器。这种色散的最小化使得能够改变重复率,而对激光引擎 1 的光学元件不进行耗时的重新调节。因此,包括色散控制器使得可以在对时间敏感的外科手术期间改变重复率。一个示例是使用第一重复率完成白内障手术并且使用第二重复率完成晶状体囊切开术或角膜手术。如众所周知的,在这些手术中,时间因素是十分关键的。

[0136] (5) 在某些情况下,在外科手术内,当激光束具有固定的重复率时,使用切割图案放置密度不均匀的激光点。示例包括在光栅或扫描图案的拐点或者在变窄或变宽的螺旋形的周围减慢扫描速度。

[0137] 在这个背景下,激光引擎 1 的实施例可以被配置为具有基本连续可调节的重复率,并且与改变扫描速度接近同步地调节重复率以补偿扫描速度的变化,使得激光点的形成具有接近恒定的密度或具有预定的密度分布。

[0138] (6) 另外,热聚焦对一些 CPA/CDRA 激光器的光学性能产生负面影响,并且使得它们对激光束的功率和重复率的变化具有不期望的敏感性。在这个背景下,激光引擎 1 的实施例可利用热聚焦补偿技术,使得这些实施例对所应用的激光束的功率和重复率的变化相当不敏感。

[0139] 图 2 详细地示出激光引擎 1 的具体实施方式。振荡器 100 可以是各种各样的光源,这些光源可以产生并输出激光引擎 1 的种子脉冲。示例包括二极管泵浦光纤振荡器。振荡器可以包括单个二极管,例如,在 808nm 波长下操作的 GaAs 二极管,或大范围的各种其它二极管。

[0140] 光纤振荡器比基于自由空间光束传播的振荡器小得多。在外科手术应用中,操作

场所的拥挤度是急需解决的限制,因此减小激光引擎的空间尺度是值得高度珍视的设计特征。

[0141] 在一些示例中,振荡器输出高质量的种子脉冲。众多因素可能引起如接下来详细描述的高脉冲质量。

[0142] (i) 在一些实施例,二极管可以包括频率稳定杆,如,二极管内的体布拉格(Bragg)光栅。这种光栅可以提供具有低噪声和高脉冲-脉冲稳定性的脉冲。可以用掺 Nd 或 Yb 的玻璃形成光纤。

[0143] (ii) 振荡器 100 可以包括半导体可饱和吸收镜或 SESAM。利用一个或多个 SESAM 改善了所产生的脉冲内的模式的相干性,从而得到基本上模式锁定操作。

[0144] 具有上述设计原理的振荡器可以输出基本上变换受限的种子脉冲,例如,具有高斯形状的脉冲。在一些示例中,也可以产生平顶脉冲。脉冲的持续时间可以少于 1,000 飞秒(fs)。在一些实施方式中,脉冲持续时间可以在 50-1,000 飞秒的范围内,在一些其它实施例中,脉冲持续时间可以在 100-500 飞秒的范围内。种子脉冲的频率(或重复率)可以在 10-100MHz 的范围内,在其它实施例中,种子脉冲的频率(或重复率)可以在 20-50MHz 的范围内。但是,将种子脉冲频率降低到 10 或 20MHz 以下会带来一系列设计困难。因为这个原因,大多数振荡器以超过 20MHz 的频率操作。

[0145] 种子脉冲束的功率可以在 10-1000mW 的范围内,在其它实施例中,种子脉冲束的功率可以在 100-200mW 的范围内。

[0146] 从许多时序方面考虑,可以将振荡器 100 用作主时钟。

[0147] 展宽器-压缩器 200 可以通过对脉冲的不同的频率分量引入不同的延迟时间来展宽种子脉冲。总之,展宽器-压缩器可以引入色散或啁啾。

[0148] 图 3A 详细地示出这种啁啾。展宽器-压缩器 200 可以接收大部分脉冲持续时间内频率分量(或频谱)大致一致(或“白”)的短脉冲。换句话说,在脉冲开始时不同频率分量的幅度接近平均并且在脉冲持续期间保持这种状态。展宽器-压缩器 200 可以通过针对这种“白”脉冲的红、绿和蓝分量引入不同的延迟时间来展宽脉冲长度。因此,展宽器-压缩器 200 所输出的脉冲的频率分量或频谱可能变得与时间有关。根据通常的惯例,其中红光频率占优势的前沿部分而蓝光频率占优势的后沿部分的脉冲被称为具有正色散或啁啾。

[0149] 本描述是指时域上的啁啾,即,是指高频分量和低频分量的相对延迟。空间啁啾(即,光束内高频分量和低频分量在空间上的分离)引起各种额外设计困难,并且不在展宽器 200' 或展宽器-压缩器 200 的所期望的功能之中。

[0150] 展宽器-压缩器 200 或展宽器 200' 可以通过增强脉冲的前沿部分中的红光成分并且增强脉冲的后沿部分中的蓝光成分,将正啁啾引入初始为白的种子脉冲。类似地,也可以由展宽器-压缩器 200 或展宽器 200' 啁啾非白脉冲。

[0151] 展宽器-压缩器 200 可以将飞秒种子脉冲的持续时间从 50-1,000 飞秒的范围展宽至 1,000-200,000 飞秒,或 1-200 皮秒或者甚至高达 500ps 的经展宽的持续时间。展宽器-压缩器 200 可以将飞秒种子脉冲的持续时间展宽大于 10 的倍数。在一些情况下,展宽倍数可以大于 10^2 、 10^3 、 10^4 或 10^5 。这些展宽倍数中的每个引入放大器 300 的不同设计标准。

[0152] 图 3B 示出图 1B 所示类型的激光引擎 1' 可以利用展宽器 200' 和独立的压缩器 400。展宽器 200' 可以包括第一光栅 201、透镜 202、第二光栅 203 和反射镜 204。当短脉冲

211 进入展宽器 200' 时,第一光栅 201 可以将不同的频率分量折射到不同方向。在退出第一光栅 201 后,发散的光线可以传播至透镜 202,并且重新导向到第二光栅 203。一些实施例可以使用两个透镜替代透镜 202。因为第二光栅 203 使得与第一光栅 201 成一定的角度并且不同频率的光线在分散方向上传播,所以不同的频率分量行进不同的距离,从而需要不同的时间来完成。

[0153] 例如,在图 3B 的展宽器 200' 中,具有蓝光谱区域中的频率的分量比红光区域中的分量行进更长的距离,从而获得相对于入射短脉冲的红光分量的延迟。这里以及整个文献中,以示例性且相对的方式使用术语“蓝”和“红”。它们分别是指具有较短和较长的波长的脉冲频谱的分量。在具体实施方式中,激光平均波长可以为 1000-1100nm,并且脉冲的带宽可以在 2-50nm 的范围内,在一些情况下,脉冲的带宽可以在 5-20nm 的范围内。在这个示例中,脉冲的整个频谱在红外区域中。在这个示例中,术语“蓝”和“红”分别是指红外光谱的脉冲的带宽内具有较短和较长的波长的部分。

[0154] 第二光栅 203 的功能包括啁啾的部分控制,即,蓝光分量相对于红光分量的延迟以及将光束恢复至基本平行的光束,以使得其适于由反射镜 204 反射。反射镜 204 反射频率分离的平行光线,它们接着通过第二光栅 203、透镜 202 和第一光栅 201 折回其光路。到脉冲退出第一光栅 201 的时候,脉冲的蓝光分量经过长很多的距离,并且因此落后于红光分量。

[0155] 这种延迟对所输出的脉冲至少有三个方面的影响:(i) 脉冲长度变得长得多,(ii) 不同频率分量的幅度在时间上相对彼此偏移,将红光分量偏移至脉冲的前沿并且将蓝光分量偏移至后沿,或者反之亦然,(iii) 脉冲的总能量在更长的脉冲长度上分布,从而降低了所输出的脉冲的光功率。在一些情况下,可以将脉冲持续时间展宽 100、1000 甚至更多的倍数,相应地功率可以减少 100、1000 甚至更多的倍数。总之,展宽器-压缩器 200 或展宽器 200' 可以展宽脉冲,引入正啁啾,从而基本降低脉冲的功率。

[0156] 如之前所描述的,减少脉冲的峰值功率对 CPA/CDRA 激光器来说是有利的方面,因为随后的放大器 300 的腔光学元件没有暴露于过高功率的脉冲,并且因此避免受到光束的损害。

[0157] 图 3B 还示出压缩器 400 的示例,压缩器 400 可以包括第三光栅 205、第四光栅 207 和反射镜 208。一些示例在这些光栅之间没有透镜,而其它示例可以有一个或两个透镜。第三光栅 205 再次以与展宽器 200' 的第一光栅 201 类似的方式将脉冲频谱的不同分量导向不同方向。第四光栅 207 再次通过其取向部分地控制蓝光分量和红光分量的相对延迟,这与第二光栅 203 类似。然而,因为第四光栅 207 现在的取向与第二光栅 203 相反,所以蓝光分量的光学通路现在较短,引起负啁啾。这种负色散使得展宽脉冲的蓝光分量追上红光分量,从而将经放大的展宽脉冲的总体持续时间从数百皮秒缩短至数百飞秒。具有单独的展宽器 200' 和压缩器 400 的设计是图 1B 的激光引擎 1' 的实施例。

[0158] 图 3B 还示出具有单独的展宽器 200' 和压缩器 400 的图 1B 的设计的两个敏感方面。

[0159] (i) 首先,展宽器 200'、放大器 300 和压缩器 400 需要彼此精细调节,使得压缩器 400 可以高精度地取消由展宽器 200' 导致的展宽以及接着取消由放大器 300 导致的色散。因此,设置透镜 202 的位置和第一至第四光栅 201-207 的取向可能需要特别高的精度,以补

偿经放大的展宽脉冲的色散,并且将它们压缩回飞秒脉冲。当然,高精度的调节对扰动十分敏感;温度、往返次数和机械强度的小的变化可以破坏调节精度,需要维持并重新校准具有图 1B 的构造的激光引擎 1'。

[0160] (ii) 在一些复杂或多步骤的工序中,可能期望改变重复率。然而,这种重复率的改变通常伴随着往返次数的变化,以优化所输出的脉冲。反过来,往返次数的变化通常导致热聚焦的变化以及由放大器 300 引起的复合色散的变化。因此,重复率和往返次数的变化可能打乱对展宽、色散和压缩的平衡的仔细校准。

[0161] 为了对抗这些变化,如图 3B 的箭头所示,激光引擎 1'的一些实施方式可能通过改变透镜 202 的位置、改变光栅 201、203、205 和 207 中某些的位置或取向、改变反射镜 204 和 208 的位置或通过移动一个或多个反射镜改变光束接触透镜 202 的位置,进行重新校准。不用说,这些改变通常需要小心并且经常反复进行机械调节和精度校准,所有这些都是在耗时的干预。

[0162] 重新校准的缓慢可能在期望脉冲重复率及时变化的应用中引起问题。这在时间是关键因素的应用中尤其是要禁止的,例如,在眼科手术应用期间,在这种手术中,病人控制眼睛移动的能力低至 90 秒。因为所有这些原因,大多数激光引擎不提供可变重复率的功能。

[0163] 另外,因为在激光引擎 1'中,展宽器 200'与压缩器 400 是分离的,并且它们均包括多个光栅和透镜,所以图 1B 中的类型的激光引擎 1'的展宽器和压缩器的空间尺度通常在空间上过大。

[0164] 为了减少展宽器 200'和压缩器 400 的空间占地面积,并且为了减少校准时间,在激光引擎 1'的一些实施方式中,展宽器 200'和压缩器 400 可以共用一个或多个光学元件。在某些情况下,它们可以共用光栅,比如,第一光栅 201 和第三光栅 205 可以是相同的。

[0165] 在一些多重叠示例中,展宽器 200'的两个光栅可以是相同的物理光栅,透镜和反射镜将光束在不同的经过期间从不同的方向引导到同一光栅上。在一些多重叠示例中,展宽器 200 的两个光栅和压缩器 400 的两个光栅的所有功能都可以由单个共用光栅执行。

[0166] 图 3C 示出图 1A 的实施例的展宽器-压缩器 200 的示例,它提供了对这些困难的鲁棒的解决方案。图 3C 的展宽器-压缩器 200 整合展宽和压缩功能,因此可以将它应用于图 1A 的激光引擎 1 的实施例中。如在图 3C 的示例中实现的这个展宽器-压缩器 200 是啁啾体布拉格光栅(CVBG)。这个 CVBG 可以是多层的堆叠(例如,在光热折射(PTR)玻璃中),这些层具有合适的折射率以及随着这些层的位置而变化的光栅周期(grating period)。在这种设计中,对于脉冲的不同频谱分量,布拉格共振条件出现在不同的位置。因此,不同的频谱分量可在不同的位置被反射,从而在脉冲内获得不同的时间延迟。

[0167] 如图 3C 中的示例示出的,当短“白”脉冲 211 进入展宽器-压缩器 200 时,红光频率分量从具有较宽的层间间隔或光栅周期的近区发生折射,因为它们的波长较长并且在这些近区满足布拉格反射条件。相比之下,具有更短波长的蓝光频率分量从光栅的较远区域返回。因为蓝光分量经过更长的光路,所以它们获得相对于红光分量的延迟。因此,通过这个 CVBG 展宽器-压缩器 200 将输入的短白脉冲 211 展宽成更长的展宽脉冲 212。在特定示例中,因为蓝光分量相对于红光分量延迟,所以展宽脉冲 212 引起正啁啾。其它实施方式可以具有产生负啁啾的 CVBG,从而相对于蓝光频率分量延迟红光频谱分量。

[0168] 这个 CVBG 展宽器-压缩器 200 也可以高精度地压缩经放大的展宽脉冲 213 而不进行任何不便的精细调节,因为展宽脉冲在由放大器 300 放大后被从相对端或压缩器端口入射到同一 CVBG 展宽器-压缩器 200。当展宽脉冲从相对端进入 CVBG 展宽器-压缩器 200 时,它的红光分量延迟的程度与在展宽步骤期间蓝光分量被延迟的程度相同,从而恢复脉冲的原始短长度。因此,这个展宽器-压缩器 200 可以非常有效地补偿展宽期间引入的色散,并输出正确地压缩的放大脉冲 214。

[0169] 与具有独立的展宽器 200' 和压缩器 400 的激光引擎 1' 的特定方面比较,(i) 激光引擎 1 对移动光学元件的精确对准不是十分敏感,因为它没有独立的展宽器 200' 和压缩器 400,从而对机械扰动或操作温度的变化表现出显著的鲁棒性,以及 (ii) 因为如与等式 (1)-(2) 和图 5A-B 相关地进一步说明的,放大器 300 的新设计没有引入与往返次数相关的额外色散,所以当重复率改变时,激光引擎 1 不需要敏感地重新校准并重新对准其光学元件并进行布置。这些属性使得能够将激光引擎 1 应用在重复率快速或及时变化很重要的应用中。

[0170] 在其它与上述不同的设计中,放大器 300 可能引入额外色散。在这些设计中,可以为展宽器-压缩器 200 的集成构造可以附加重新调节功能,因为压缩器不仅必须压缩展宽器的色散,而且必须压缩放大器 300 的额外色散。这个增加的任务可能需要实现与压缩器功能相关的可调节块。

[0171] 返回图 2,激光引擎 1 还可以包括有效的偏振分束器 150。分束器 150 可以在振荡器 100 和展宽器-压缩器 200 之间包括偏振器和 $\lambda/4$ 板。在其它实施例中,分束器 150 可以是薄膜偏振器。这种组合 150 可以使得种子脉冲通过,从振荡器 100 到达展宽器-压缩器 200,但是将展宽脉冲从展宽器-压缩器 200 重新引导回到放大器 300,因为 $\lambda/4$ 板在两次经过后将脉冲光束的偏振平面旋转 90 度。偏振器在对种子脉冲的偏振方向具有透射性的同时,对于在第二次穿过 $\lambda/4$ 板后的展宽脉冲的旋转了 90 度的偏振平面具有反射性。

[0172] 在一些实施例中,激光引擎 1 可以在分束器 150 和放大器 300 之间的光学通路上包括法拉弟隔离器(Faraday isolator)500。法拉弟隔离器 500 的功能可以包括将振荡器 100 与经放大的光束隔离,以防止激光束的高功率损坏振荡器 100。这种法拉弟隔离器 500 可以从分束器 150 接收经展宽的种子脉冲,将经展宽的种子脉冲向着放大器 300 传输,从放大器 300 接收经放大的展宽脉冲的激光束,并且通过偏振器 550 和 560 向着展宽器-压缩器 200 输出经放大的展宽脉冲的激光束。

[0173] 法拉弟隔离器 500 可用于其中放大器 300 通过与其接收脉冲相同的光路来输出经放大的脉冲的实施例中,这是因为,由于经放大的脉冲通常具有比种子脉冲大数百倍或者甚至数千倍的功率或强度,因此简单的重定向光学器件对于隔离功能来说可能很不足够。即使简单的重定向光学器件只让这些经放大的脉冲的一部分通过,所透射的脉冲依然可以具有足以损坏振荡器 100 的强度。

[0174] 在一些实施例中,法拉弟隔离器 500 可以被配置为让少于来自于放大器 300 的激光束的 1/10,000 的部分通过,朝向振荡器 100。可以根据衰减获得相同的隔离功能:法拉弟隔离器可以将经放大的激光束衰减例如 40dB,或者在一些实施方式中,将其衰减 50dB。

[0175] 法拉弟隔离器或偏振相关的隔离器可以包括三个部分:垂直偏振的输入偏振器、法拉弟旋转器和以 45 度偏振的输出偏振器或检偏器(analyzer)。

[0176] 输入偏振器将在向前方向上行进的光变成例如垂直地偏振,前提是所述光还没有在该方向上偏振。(这里,偏振平面是指电场向量所处的平面。另外,“垂直”仅创建常规或参考平面。在各种实施例中,实际的偏振平面可以取向于其它特定方向。)法拉弟旋转器以大约 45 度旋转光束的偏振平面,从而将它与检偏器的偏振平面对准,接着检偏器在不另外旋转偏振平面的情况下透射光。

[0177] 在反向方向上行进的光(如,从放大器 300 返回的经放大的脉冲)在退出检偏器之后,变成相对于参考垂直平面以 45 度偏振。法拉弟旋转器再次将偏振旋转大约 45 度。因此,由法拉弟旋转器朝向输入偏振器输出的光被水平偏振。因为输入偏振器垂直偏振,所以水平偏振的光将被输入偏振器接近完美地反射,而不是将其透射至振荡器 100。因此,法拉弟隔离器 500 可以高效地保护振荡器 100,使其不受高能量的经放大的激光脉冲影响。

[0178] 法拉弟旋转器通常通过产生指向光轴方向的磁场实现其功能。一些法拉弟旋转器包括永磁体,以实现此功能。

[0179] 法拉弟旋转器中使用的光学材料通常具有高的维尔德(Verdet)常数、低吸收系数、低非线性折射率和高损坏阈值。另外,为了防止自聚焦和其它与热相关的效应,光通路通常短。700-1100 纳米范围内的两种最常用的材料是掺铋的硼硅酸盐玻璃的和铋镓石榴石晶体(TGG)。

[0180] 其中放大器 300 不借助与脉冲进入时相同的光学通路输出经放大的脉冲的激光引擎 1 或 1' 的实施例可以不需要采用法拉弟隔离器 500。

[0181] 图 2 和 4 示出从法拉弟隔离器 500 透射的光可以进入放大器 300。放大器 300 可以包括激光晶体或增益介质,以放大在端面镜 321 和 322 之间往返的经展宽的种子脉冲。一些放大器 300 可以包括折叠式光学通路(或“z 形腔”),用折叠式反射镜重新引导激光器光束,以减小共振腔的空间尺度。图 4 中的放大器 300 具有 4 个反射镜:限定共振腔的两个端面镜 321 和 322 以及两个折叠式反射镜 323 和 324。在一些示例中,光学通路可以甚至自身折叠起来,呈现十字形图案。虽然利用更多折叠式反射镜可以通过将光学通路折叠成更紧凑的空间来甚至进一步减小放大器 300 的尺寸,但是额外的反射镜增加了增加误对准和提高价格的可能性。

[0182] 除了激光晶体 310 和反射镜 321-324 外,放大器 300 可以包括可切换的偏振器 330 以及薄膜偏振器 340,所述可切换的偏振器 330 控制质量因子 Q,进而控制放大器 300 的放大功能,所述薄膜偏振器 340 用作腔内脉冲的输入/输出端口。薄膜偏振器 340 是选择性偏振装置的特定示例,其以第一预定偏振反射光,同时以与第一预定偏振正交的第二偏振透射光。可切换的偏振器 330 可以是在当它不旋转经过它的光的偏振时的第一操作状态和当它响应于向其施加的控制信号而旋转光的偏振的第二操作状态之间进行切换的偏振装置。薄膜偏振器 340 和可切换的偏振器 330 的组合可用于控制来自法拉弟旋转器 500 的脉冲何时耦合进放大器 300,以及在放大器 300 内放大的脉冲何时从放大器耦合出,如下面所解释的。

[0183] 图 4 中这种薄膜偏振器 340 和可切换的偏振器 330 的组合是用于放大器 300 的共振腔的光学开关的示例。也可以将其它设计用于这种光学开关。

[0184] 下面更详细地描述放大器 300 的操作和结构。具体地讲,将显示重复率的变化通常伴随着经放大的脉冲在端面镜 321 和 322 之间往返次数的变化。刚刚描述的光学开关的

功能是通过控制何时将脉冲耦合进或耦合出共振腔来控制这些往返的次数。

[0185] 放大器 300 中的光学元件可以在这些往返的每次往返期间引入一定量的色散。因此,通过与改变重复率相关地改变放大器 300 中往返的次数,改变了由放大器 300 输出的经放大的脉冲的累积色散。即使调节压缩器 400 来补偿特定往返次数的色散,随着往返次数的变化而引起的色散变化使得图 1B 的激光引擎 1' 的展宽器 200'、放大器 300 和压缩器 400 的展宽、色散放大和压缩的敏感性平衡被打乱,从而需要漫长的重新校准。当往返的次数变化时,甚至具有图 1A 中的集成的展宽器-压缩器 200 的激光引擎 1 的更创新构造也可能需要使用供调节的补偿元件。这个方面限制了这些激光引擎的用途。

[0186] 为了拓宽它们的用途,一些激光引擎可以包括色散控制器或补偿器作为放大器 300 的一部分。色散控制器的功能是在往返期间引入与放大器 300 的光学元件引入的色散相反并且大致相等的色散。作为这个色散补偿或控制的结果,在放大器 300 的共振腔中,在往返期间,脉冲获得极少的色散或没有色散。因此,通过改变往返的次数,将经放大的脉冲的色散改变至仅很小的程度或者根本没有。

[0187] 因此,可以在基本不调节、重新对准或校准压缩器 400 或展宽器-压缩器 200 的光学布置的情况下改变激光脉冲的重复率,因为在往返期间没有累积要补偿的色散。因此,可以在图 1B 的激光引擎 1' 中实现色散受控的放大器 300,使压缩器 400 不用在重复率改变后执行耗时的重新对准任务。此外,这个色散受控的放大器 300 使得能够在没有可调节补偿功能的情况下,在图 1A 的激光引擎 1 中使用集成的展宽器-压缩器 200。

[0188] 例如,如果激光晶体 310 在激光脉冲在共振腔内往返期间引入正色散,则色散控制器可以引入幅度与经放大的展宽脉冲的幅度相同的负色散,以抑制、最小化或消除激光脉冲的色散。

[0189] 将色散定量的可用手段是“群延迟色散”或 GDD,其通常被定义为:

$$[0190] \quad GDD = \frac{\lambda^3}{c^2} \frac{d^2 n(\lambda)}{d\lambda^2} L \quad (1)$$

[0191] 其中, λ 是光的波长, c 是光速, $n(\lambda)$ 是与波长相关的折射率并且 L 是腔中光学通路的长度。可以例如通过测量或根据设计进行推导,确定光学元件 310、330 和 340、反射镜 321-324 以及任何其它可能在放大器 300 中出现的光学元件的 GDD。利用 GDD 的相关知识,可以在腔中实现色散控制器,其 GDD 是与所确定的放大器 300 的光学元件的 GDD 大致相等且相反的值。如此设计的腔在脉冲的往返期间产生极少的色散或不产生色散,从而消除了所述问题并且拓宽了激光引擎 1 或 1' 的用途。

[0192] 在示例性示例中,在典型的 CPA 激光引擎 1' 中,可以通过展宽器 200' 将 500 飞秒的种子脉冲展宽 200 皮秒,达到 200.5 皮秒的展脉冲长度。可以调节并校准对应的压缩器 400,以将展宽脉冲向回压缩 200ps,从而得到理想的大约 500fs 的经压缩的脉冲长度。由于存在不完美的因素,在实际情况中,经压缩的脉冲长度可能落在 500-800fs 的范围内。

[0193] 然而,在经展宽的脉冲在放大器 300 的共振腔中往返期间,经展宽的脉冲的长度可能由于放大器 300 的各种光学元件的色散(用腔的 GDD 表示)得到增强。典型的 GDD 值可以在数百 fs^2 至数十万 fs^2 内变化。在一些情况下,GDD 可以在 $5,000\text{fs}^2$ - $20,000\text{fs}^2$ 的范围内。因为通常展宽器 200 和补偿器 400 消除了彼此对脉冲长度的影响,所以由激光引擎 1 输出的脉冲的长度 $\Delta t(\text{out})$ 与振荡器 100 产生的种子脉冲的长度 $\Delta t(\text{seed})$ 和 GDD 相关,

满足下面的关系：

[0194]

$$\Delta t(out) = \frac{\sqrt{\Delta t(seed)^4 + (4 \ln 2 N \times GDD)^2}}{\Delta t(seed)} = \Delta t(seed) \sqrt{1 + 7.69 N^2 \times \left(\frac{GDD}{\Delta t(seed)^2} \right)^2} \quad (2)$$

[0195] 其中，N 是在腔中往返的次数。

[0196] 因此，例如，通过 GDD 为 $7,000 \text{ fs}^2$ 的放大器的光学元件，在单个往返期间，种子脉冲的长度 $\Delta t(seed) = 200 \text{ fs}$ 可以增加少到 22 fs ，达到 $\Delta t(seed) = 222 \text{ fs}$ 。然而，这种看起来小的色散在重复的往返期间得到复合。在 $N=10$ 次往返之后，所输出脉冲的长度增加大约 790 fs ，达到 $\Delta t(out) = 900 \text{ fs}$ ，在 $N=30$ 次往返之后，所输出脉冲的长度增加大约 $2,700 \text{ fs} = 2.7 \text{ ps}$ ，达到 $\Delta t(out) = 2920 \text{ fs} = 2.9 \text{ ps}$ ，并且在 $N=100$ 次往返之后，所输出脉冲的长度增加大约 9.5 ps ，达到 $\Delta t(out) = 9.7 \text{ ps}$ 。可以看到，在没有色散受控的放大器 300 的情况下，这种脉冲长度高达大约 50 倍的显著劣化将激光从飞秒激光转换成皮秒激光。

[0197] 另外，即使校准压缩器 200 或 400 来补偿由特定次数的往返导致的额外色散（例如，对应于 $N=100$ 的往返的是 9.5 ps 的色散），当应用要求将往返的次数从 $N=100$ 变为例如 $N=110$ 时，也会由放大器 300 引入另外的 1 ps 的色散，这再次导致经压缩的脉冲长度为皮秒级，而非飞秒级。

[0198] 相比之下，激光引擎 1 或 1' 的实施例可以在放大器 300 内部具有色散控制器，用于补偿共振腔的光学元件所造成的 GDD。这种色散控制器可以补偿由放大器中的光学元件引起的每次往返几 fs 的色散。因此，放大器 300 可以大致与放大器操作所处的往返次数（假设次数为 50、100、200 或 500）独立地，接收具有 200 ps 脉冲长度的经展宽的脉冲并发射具有基本相同的 200 ps 脉冲长度的经放大的脉冲。因此，激光引擎 1 的展宽器 - 压缩器 200 或激光器发动机 1' 的压缩器 400 可以在很大范围的往返次数 N 内继而在很大范围的重复率内将脉冲长度压缩回飞秒范围，而不必耗时地重新调节和校准放大器 300 内没有本色散控制或补偿的其它激光系统。放大器 300 内的色散控制器位于放大器 300 的内部光路上，因此在不需重新调节光学放大器 300 外部的光学元件的情况下，自动地补偿 GDD/ 色散。通过正确地设计放大器 300 内的色散控制器，光学放大器外部可以不需要具有为改变脉冲的重复率而将被重新调节的可调节色散元件，如，图 3B 中的色散补偿光栅。

[0199] 从以上设计考虑能够知道，激光引擎 1 或 1' 可以用与激光引擎的除了振荡器 100 的光学元件之外的所有光学元件基本相同的布置，以 $10 \text{ kHz} - 2 \text{ MHz}$ 范围的重复率，产生脉冲持续时间少于 1000 飞秒的激光束。其它实施例可以以 $50 \text{ kHz} - 1 \text{ MHz}$ 范围内的重复率操作，然而其它实施例以 $100 \text{ kHz} - 500 \text{ kHz}$ 范围内的重复率操作。

[0200] 因此，在这些激光引擎中，在不改变激光引擎的除了振荡器 100 之外的光学元件的布置的情况下，重复率可以从第一值变化为第二值。

[0201] 可以存在其中重复率从其第一值变成第二值伴随着光学元件的布置的改变的激光引擎。然而，这些激光引擎中的一些可以根据它们放大器内的色散补偿或控制来改变，使得可以操作经改变的激光引擎，以便也用未改变的布置输出具有第二重复率的激光束。

[0202] 在激光引擎 1 的各种实施方式中，重复率可以从第一值变成第二值，其中，所述第二重复率与第一重复率相差至少 10% 、 50% 、 100% 或 200% 。

[0203] 在共振腔采用光纤的一些设计，在不重新调谐和调节后面的压缩器 400 的情况

下,调节重复率也是可能的。然而,这些光纤激光器(i)在脉冲能量方面有严格限制,以及(ii)通常没有色散控制器。它们通常只产生每脉冲能量低于10微焦耳(μJ)的脉冲,以避免损坏光纤腔的危险。如下面所述的,对于许多眼科和外科手术应用,这种每脉冲的能量可能是不足的,因为这些应用可能需要目标上的20或更多 μJ /脉冲,这意味着由于各种损耗要由激光器输出30或更多 μJ /脉冲。

[0204] 另一个不同之处在于,在光纤激光器中,当因为热负载变化引起激光的重复率变化时,光束的发散性不可避免地改变。

[0205] 相比之下,放大器300通常包含色散控制器或补偿器,并且光在自由空间传播,使得可以操作激光引擎1或1'的一些示例,以输出能量在1-100 μJ /脉冲的范围内的激光束,能量在10-50 μJ /脉冲的范围内的其它激光脉冲,能量在20-30 μJ /脉冲的范围内的其它激光脉冲。

[0206] 可以构造一些激光引擎1或1',使得重复率的变化伴随有激光引擎1的光学元件的调节。然而,因为存在色散控制器,所以即使在这些实施例,激光引擎1或1'也是可改变的,以当重复率改变时,利用基本相同的光学元件布置。

[0207] 可以用许多不同方式实现上述示例。在一些实施例中,光学放大器内的色散控制器或补偿器可以包括能够改变入射光的色散的一个或多个啁啾反射镜、啁啾光纤、各种啁啾光栅、啁啾透射性光学元件、棱镜和其它光学元件。

[0208] 通常,啁啾光学元件可以包含具有经调制的光学特性的多个层。在这些示例中,设计这些层的厚度及其折射率变化,以按不同方式控制具有不同波长的光。在一个示例中,已与展宽器-压缩器200相关地描述了啁啾体布拉格光栅(CVBG)。在其它示例中,比如啁啾反射镜可以包括介电材料层,其中,每个单个介电层或这些层的短堆叠可以反射特定波长的窄邻近范围。可以通过形成厚度适于反射处于第一波长附近的波长的光的5-10层介电层的第一堆叠,构造啁啾反射镜。然后,在第一堆叠的顶部,形成具有不同厚度和/或折射率的5-10层介电层的第二堆叠,以反射波长处于第二波长附近的光,等等。当在合适数量的堆叠中已形成足够数量的层时,啁啾反射镜可以反射具有选定波长带中的波长分量的光,同时透射具有其它波长的光。

[0209] 可以通过使得反射镜321-324中一个或多个被啁啾,执行放大器中的色散控制功能。在图4中,所有四个反射镜都被啁啾。其它设计可以只使得反射镜中的一个或两个被啁啾。而其它设计可以采用一个或多个啁啾光学元件。作为色散控制器可能的实施方式,这些一个或多个啁啾反射镜可以控制、补偿、最小化或者甚至消除在经放大的展宽激光脉冲在放大器300的共振腔内往返期间由光学元件310、330和340以及反射镜321-324引起的色散。

[0210] 激光晶体310可以是Nd或Yb类的。这些示例包括Nd:YAG和Yb:YAG晶体。其它实施方式可以使用掺Nd或Yb的玻璃。而其它实施方式可以使用Yb: $X(\text{WO}_4)_2$ 形式的Yb:钨酸盐或Yb: $X_2\text{O}_3$ 形式的Yb:三氧化物。在这些情况下,X可以是Y、Lu、Gd或其它合适的元素。Nd或Yd的掺杂水平可以在0.1%-100%的范围内。

[0211] 可以选择激光晶体的空间掺杂分布,以确保发射高质量的单模激光脉冲。一些掺杂分布可以与泵浦光源相容,泵浦光源具有有限的聚焦能力,这是通过大于泵浦光的常规 M^2 倍数来表示的。泵浦光源可以是侧泵浦或端泵浦布置。泵浦光源可以包含多个光纤耦合

的二极管,如,2-10 个二极管,每个二极管发射 1-10W 的功率。泵浦二极管可以在基本连续波(CW)操作模式下操作,或者在类似高频脉冲模式下操作。它们可以布置成不同的空间阵列、条状或其它形式。可以通过共用光栅引导来自二极管的光,所述共用光栅可以向二极管返回非常小比例的光,从而将它们的光锁相。

[0212] 图 5A-B 结合图 4 示出腔倒空的再生放大器 CDRA 300 的操作。操作原理通常被称为“Q 切换”,是指共振腔的质量因子 Q 的切换。

[0213] 在“再充电”或“泵浦”阶段中,薄膜偏振器 340 通过可切换的偏振器 330 反射入射光。可切换的偏振器 330 可以是遮光器、调制盘、旋转棱镜或反射镜、声-光装置、诸如普克尔斯盒(Pockels cell)或克尔盒(Kerr cell)的电-光装置或可切换的 $\lambda/4$ 波片。在非偏置或低电压状态下,当脉冲进出端面镜 322 经过两次时,可切换的偏振器 330 可以将偏振平面旋转 90 度。

[0214] 在重新充电或泵浦的时间段期间,法拉弟隔离器 500 向薄膜偏振器 340 上发送脉冲,所述薄膜偏振器 340 重新定向它们使其通过可切换的偏振器 330。从端面镜 322 返回之后,脉冲第二次穿过可切换的偏振器 330。然后,它们在腔内执行一次往返,在其进出端面镜 322 的通路上再穿过可切换的偏振器 330 两次。在一次往返之后,通过这四次穿过可切换的偏振器 330,将脉冲的偏振平面旋转 180 度。因此,它们在基本没有放大的情况下被薄膜偏振器 340 反射出腔。

[0215] 在这个相同的充电或泵浦时间段内,放大器 30 抑制由腔内的泵浦二极管产生的光的光激励行为,因为由可切换的偏振器 330 将偏振平面进行 90 度双透射旋转,使得共振腔的质量因子 Q 低,从而使得腔不适于光激励的行为。

[0216] 图 5A 示出在这个重新充电 / 泵浦阶段中,激光晶体 310 从上述泵浦二极管或者侧泵浦或端泵浦布置的泵浦激光二极管吸收光。泵浦的步骤增加了光激励的原子或复合物的受激发能级的粒子数,以产生粒子数反转,本质上是吸收并存储泵浦能量或“增益”。

[0217] 图 5B 示出在这个重新充电 / 泵浦阶段中,放大器 300 未产生和发射经放大的激光脉冲。当然,放大器 300 发射阻断的未经放大的脉冲。

[0218] 图 5A-B 示出泵浦 / 重新充电阶段可以根据预定时序操作而结束或通过追踪激光晶体 310 中能量存储的感测电子元件促使而结束。在任一种情况下,在时间 t(重新充电)后,控制和驱动电子元件可以向可切换的偏振器 330 施加高电压,以停止将偏振平面旋转 90 度。可以采用不同方式切换其它类型的可切换的偏振器 330。这个变化将腔的质量因子 Q 切换至足够高的值,以使得腔适于光激励的行为。

[0219] 当单脉冲正执行其在腔内往返的同时,放大器 300 的单脉冲实施例可以切换可切换的偏振器 300。当在单脉冲往返结束时单脉冲返回已切换的可切换的偏振器 300 时,脉冲的偏振平面不再发生旋转,因此薄膜偏振器 340 不从腔中反射出脉冲。作为在泵浦阶段期间受到阻断的替代方式,在增益长度时间段 t(增益)内,脉冲可以在众多往返过程中被捕获在腔内。为了清晰起见,在图 5B 中, t(增益)的时间标度已被放大。

[0220] 图 5A-B 示出在增益时间段内,借助被称为感应发射的过程,在腔中泵浦并存储的能量(或增益)被从激光晶体 310 转换成脉冲,形成往返,从而开始光激励行为。因此,如图 5A 中所示,腔中的能量减少,而如图 5B 中所示,在增益过程中激光脉冲中的能量加强。在图 5B 中, t(增益)区间中的峰值表示激光脉冲在其经过腔中特定点时的能量,而实线上升曲

线是表示对滑动往返时间段求平均的能量增益的包络线。

[0221] 注意的是,将单个输入脉冲捕获在腔中的实施方式可以正好在其往返期间将大约所有存储在激光晶体 310 中的能量转换成单个激光脉冲。相比之下,一些实施方式可以使得多个脉冲能够进入腔。然而,在这些示例中,所得的激光束可以具有较低的每脉冲能量,因而将每脉冲能量减少到对相关类型的光致破裂来说是惯例且有益的能级之下。

[0222] 在足够的往返次数期间,将泵浦至腔中的能量高效转换成激光脉冲后,控制器-驱动器电子元件可以停止向可切换的偏振器 330 施加高电压,从而致使其再继续旋转激光脉冲的偏振平面。因为重新开始旋转偏振,所以接着在标注为 t (倒空) 的时刻,在下次往返结束时,由薄膜偏振器 340 从腔中反射出经放大的激光脉冲。

[0223] 可以采用不同方式控制经放大的激光脉冲的倒空。在一些情况下,可以依靠设计计算和计算机方法,设置在执行倒空之后的往返次数。在其它情况下,可以使用预先校准来设置往返次数。在其它情况下,各种各样的传感器可以耦合到共振腔的光路中。这个传感器或多个传感器可以感测经放大的激光脉冲的能量何时达到预定值并且向控制器发送控制信号,以相应地倒空腔。

[0224] 通过从腔中反射经放大的激光脉冲并向压缩器 400 发送所述激光脉冲,完成泵浦-增益-倒空循环。一旦完成脉冲倒空,腔返回至其低 Q 状态,从而重新开始新的泵浦-增益-倒空循环。在一些设计中,脉冲注入端口和脉冲倒空端口可以不同。在图 4 中,这些端口均在薄膜偏振器 340 中实现。

[0225] 在一些实施方式中,激光脉冲在腔中执行 50-500 次往返,在其它示例中,执行 100-200 次往返,以使得能够将能量从激光晶体 310 的泵浦状态转换成激光脉冲。如之前所讨论的,振荡器 100 可以产生频率在 10-200MHz 的范围内的种子脉冲序列,在一些情况下,产生频率在 20-50MHz 的范围内的种子脉冲序列。在一些实施方式中,激光引擎 1 或 1' 输出重复率在 10kHz-2MHz 或 50kHz-1MHz 或 100kHz-500kHz 的范围内的激光脉冲序列。因此,可切换的偏振器 330 通过只捕获每第 5 至第 20,000 个种子脉冲进行放大,使输入的种子脉冲序列骤减。可以通过使用振荡器 100 作为主时钟,控制这些捕获序列的时序。

[0226] 重复率是激光引擎的重要特征。如果 (1) 重复率可以在频率范围内变化并且 (2) 范围的顶部高,则可以实现大量的各种功能。例如,白内障手术可以以第一重复率最佳地执行,而第二重复率可能对角膜手术更好。如果可以调节激光引擎使其以第一和第二重复率操作,则单激光引擎可用于这些功能。因此,接下来将回顾各种设计考虑,这些设计考虑可以使激光引擎 1 和 1' 中的重复率可变以及使范围的上限高。

[0227] 如与图 3B-C 和图 4 相关地描述的,通过使用放大器 300 中的色散控制器(如,反射镜 321-324 中任一个的啁啾反射镜),可以补偿在腔中往返期间放大器的光学元件所造成的激光脉冲的色散。这个设计特征使得在不改变展宽器 200 和压缩器 200/400 的光学元件(如,光栅 201、203、205 和 207、透镜 202 以及反射镜 204 和 208)的校准、对准或布置的情况下,改变激光引擎 1 或 1' 的重复率。

[0228] 作为改变光学布置的替代方式,可以通过施加用于改变激光引擎 1 的时序和操作的电控制信号,实现重复率的变化。例如,可以通过施加控制信号以减小重复时间 $t(\text{重复}) = t(\text{重新充电 / 泵浦}) + t(\text{增益})$ 来增加重复率。

[0229] 通常,通过减少 $t(\text{泵浦})$ 和 $t(\text{增益})$ 这两者来减少 $t(\text{重复})$ 。可以例如通过增

加泵浦二极管 / 激光器的泵浦强度来缩短泵浦时间 t (泵浦)。可以例如通过减少激光脉冲的往返次数来缩短增益时间 t (增益)。

[0230] 尽管(例如)通过增加每次往返的能量增益使往返次数更少,但是可以保持激光引擎的能量。图 5B 示出当激光脉冲在逐次往返时经过腔中的选定参考点时,增益时间段期间激光脉冲的能量的增加。在随后的经过中的能量比率通常用(“小信号”)增益因子 g 来表征。增益因子 g 易受激光晶体 310 的受激发或泵浦能级中存储的总能量影响。存储的能量越多, g 因子越高。因此,通过施加控制信号来增加增益介质 310 的泵浦能级中存储的能量,可以使激光脉冲通过较少次数的往返达到相同的能量,从而增加重复率。

[0231] 也可以采用各种方式增加重复率范围的上限。在具有较大增益因子 g 的实施例中,实现相同放大所需的往返次数较少。因此,一些实施方式通过采用具有更高增益因子 g 的激光晶体 310 来实现重复率的高上限。

[0232] 另外,因为增益因子 g 易受存储在激光晶体 310 的受激发或泵浦能级中存储的总能量影响,所以使用更多能量泵浦受激发能级是实现更短的 t (增益),进而实现更高重复率的另一种方法。

[0233] 控制重复率的另一个因素是一次往返需要的时间。激光脉冲以时间间隔 $2L/c$ 经过参考点,其中, L 是腔中光学通路的长度并且 c 是光速。因此,在一些实施方式中,可以减少光学通路的长度 L ,以减少往返时间。在这些实施方式中,相同的往返次数进而转换等量的能量花费更短的时间 t (增益),从而用另一种方式增加了重复率。

[0234] 通过实现一个或多个以上讨论的设计原理,激光引擎 1 或 1' 的实施例可以以高达 500kHz、1MHz 或在一些情况下 2MHz 的重复率操作。

[0235] 另外,在这些实施方式中,通过减少 t (增益),使得总重复时间 t (重复) 中的较大部分用于支持更有利的泵浦和倒空循环的占空比。

[0236] 占空比的通用定义是低 Q 时间段的长度除以总时间段的长度。使用这个定义,在具有例如 400kHz 的重复率的实施方式中,通过将 t (增益) 从 1 微秒减少至 0.5 微秒,将占空比从 0.6 增加至 0.75,相当大的 25% 增幅。

[0237] 返回到缩短光学通路长度 L 的设计原理,注意到,除了其它方式之外,通过可切换的偏振器 330 快速地切换以将脉冲捕获在腔中可以快到什么程度来控制 L 。在 1 米的光学通路腔中,往返时间是 $2L/c=6.6\text{ns}$ 。同样作为脉冲的有限空间尺度成因的是,单脉冲实施方式因此具有切换时间少于 5ns,其它少于 4ns 或者甚至少于 3ns 的可切换的偏振器 330。

[0238] 在一些放大器中,可切换的偏振器 330 可以是普克尔斯盒。普克尔斯盒通常施加强电场,以旋转入射光束的偏振。偏振的旋转与电场的第一功率成比例,并且因此可以非常强。普克尔斯效应出现在缺乏反对称性的晶体(如,铌酸盐或镓砷化物)以及其它非中心对称的材料中。

[0239] 通过有时施加数千伏的电压,普克尔斯盒可以以非常短的上升时间被从偏振旋转状态转换成偏振非旋转状态。上升时间的一个度量是“5-95 时间”,即,旋转偏振平面以从最大 / 饱和值的 5% 上升至最大 / 饱和值的 95% 所花费的时间。在一些实施方式中,上升时间可以少于 5ns,在其它实施方式中,上升时间可以少于 4ns,在其它实施方式中,上升时间可以少于 3ns。实际上,在一些实施方式中,上升时间不受普克尔斯盒本身的动态性限制,而是受开关电子元件的动态性限制。一些实施方式可以使用创新的控制和驱动电路,以能够

进行这个快速的功率切换处理。

[0240] 如上所述,缩短普克尔斯盒的切换时间是缩短 t (增益) 以使得重复率更快的有效方式。此外,这些更快的普克尔斯盒也能够减小光学通路的长度,进而减小腔的大小。

[0241] 此外,可以使激光引擎 1 的实施方式比一些现有激光器具有更少的光学元件。这部分是由于应用了色散控制器和补偿器,从而避免在压缩器中需要可调节的光学元件,并且是由于使用了集成的展宽器-压缩器结构 200。

[0242] 尽管一些激光器可以包含上百个或更多的光学元件,但是在一些激光引擎 1 的实施方式中,光学元件的数量可以少于 75。在其它实施方式中,光学元件的数量可以少于 50。

[0243] 在一些实施方式中,除振荡器之外的那些部分中的光学元件的数量可以少于 50。在其它实施方式中,数量少于 35。

[0244] 这里,术语“光学元件”是指任何影响光束的光学属性的元件。这些示例包括:反射镜、透镜、平行板、偏振器、隔离器、任何可切换的光学元件、折射元件、透射元件和反射元件。

[0245] 光学元件由光从空气进入和退出而进入空气的表面限定。因此,如果诸如物镜的功能块包含数个透镜,则即使当物镜正移动时透镜刚性地一起移动,它也不是一个“光学元件”。之所以这样,是因为在物镜的透镜之间,光在空气中传播,而无论间隔有多短。即使两个透镜彼此接触而在其中心没有气隙,在离心光束进入另一个透镜之前,该光束也仍然从一个透镜退出,进入空气中,并且因此也要将它们算成两个光学元件。注意的是,对激光器的示意性描述通常表示比激光器实际作用时所需更少的光学元件。通常,当示出的是单个透镜时,其功能不可以由实际单个透镜执行,而只能通过仔细设计的透镜组件完成。因此,这种示意性描述通常意味着只是示例性的,并且如果按字面描述实现将是不实用的。

[0246] 具有快速普克尔斯盒、快速切换电子元件和少量光学元件的激光引擎 1 的实施方式可以使腔内具有少于 2 米的光学通路,其它实现中具有少于 1 米的光学通路。因此,由于振荡器 100 中产生光子并且包括放大器 300 的腔内的所有往返导致的激光引擎的总光学通路可以少于 500 米或 300 米或者甚至 150 米。

[0247] 现有的飞秒激光器具有 500 米或更长的总光学通路以及 3-4 米或更长的腔端面镜-端面镜的距离,因为不用这里描述的创新解决方法而将光学通路缩短到这些值以下非常难。

[0248] 可以为减小激光引擎 1 尺寸做出贡献的创新子系统和特征的列表包括:(i) 基于光纤的振荡器 100,用于替代自由空间的振荡器;(ii) 可能基于单个啁啾体布拉格光栅的集成的展宽器-压缩器 200,它不具有当改变重复率时要被调节的光学元件;(iii) 补偿色散的放大器 300,用于消除对当改变重复率时展宽器-压缩器 200 中可调节的光学元件的需要;(iv) 独特的快速切换的普克尔斯盒;(v) 独特的快速控制电子元件,它可以在包括千伏范围的普克尔斯盒的高电压下,在快速上升时间操作;以及(vi) 少量的光学元件,因而需要更小的容纳空间。

[0249] 实现这些特征的组合或所有这些特征的激光引擎可以支持少于 500 米的总体自由空间光学通路,在一些实施方式中,少于 300 米,并且在一些实施方式中,少于 150 米。

[0250] 另外,具有以上相关特征中的部分或全部的放大器 300 可以具有少于 2 米的端面镜-端面镜的光学通路长度,在一些情况下,少于 1 米。

[0251] 在许多实施方式中,光学通路是经过多重折叠的,因此,共振腔的物理尺度可以比光学通路的长度短很多。短且折叠的光学通路可以意味着放大器 300 的小的总体尺度。在一些情况下,放大器 300 的边缘尺寸都没有超过 1 米,在其它情况下,都没有超过 0.5 米。

[0252] 因此,整个激光引擎 1 的占地面积(即,它覆盖激光系统平台的面积)可以小于 1m^2 ,在其它情况下小于 0.5m^2 ,在其它情况下小于 0.25m^2 ,并且可以小于 0.1m^2 。这些面积或占地面积中的每个都会导致不同的新优点。

[0253] 因为使用上述设计原理和组件中的一个或多个,放大器 300 和激光引擎 1 可以具有这种独特的小空间尺度。如此,空间尺度可以合理地将放大器 300 和激光引擎 1 与没有采用这些设计原理和组件的其它激光器区分开。

[0254] 另外值得一提的考虑是:激光系统顶部平台上的服务子系统非常简单,因此通过简单地去除盖子即可触及,而不用从激光系统的底盘移进和移出系统块。这样做,会危及客户环境(如,医院)中对系统块的敏感对准,在所述客户环境中,通常没有可用于恢复对准状态的精准设备。因此,当堆叠外科激光系统的各种组件时,在另一个的顶部似乎会是减少其占地面积的另一种方式,这样做将会引起对激光系统的服务的惊人挑战。

[0255] 因此,通过减小激光引擎 1 的大小,能够将其它子系统放置在激光系统的顶部平台,在维修时也需要触及这些子系统。这类额外的子系统可能引入在质量上新功能,因此大大改进了整个激光系统的用途。这类额外的子系统可以包括引导眼科手术的成像系统。

[0256] 总之,可以以单独或组合的方式实现上述特征,以构造物理上紧凑的激光系统。出于至少以下原因,这类小空间尺度可以是有价值的优点:(i) 眼科手术激光系统通常是在空间和触及的成本高的非常拥挤的手术场所进行部署的,从而利于具有小的占地面积的激光系统;(ii) 如果激光引擎的光学组件中的大多数或全部装配在激光系统的底盘的顶部平台上,则激光引擎的服务能力在质量上会更好,以及(iii) 小的激光引擎能够在顶部平台上部署额外的系统,给整个激光系统添加了重要的新功能,诸如引导眼科手术的成像系统。

[0257] 返回到追踪经放大的展宽激光脉冲的通路,图 2 示出一旦被放大器 300 发射,经放大的脉冲可以向前返回法拉弟隔离器 500。法拉弟隔离器 500 的功能之一可以是能够以接近 100% 的效率重新引导经放大的脉冲,使其背离振荡器,从而防止经放大的脉冲损坏振荡器 100。

[0258] 在一些情况下,经放大的脉冲经由偏振器 550 和 560 被引导至展宽器-压缩器 200 的压缩器端口。如上所述,展宽器-压缩器 200 可以重新压缩经放大的脉冲,并且以飞秒脉冲发射脉动的激光束。

[0259] 利用上述各种解决方案的激光引擎 1 的实施方式可以输出激光束,这些激光脉冲具有 1-1000 飞秒(fs)范围内的脉冲持续时间,在一些情况下,具有 50-500 飞秒(fs)范围内的脉冲持续时间,在其它情况下,具有 100-300 飞秒(fs)范围内的脉冲持续时间。这些飞秒脉冲可以达到独特的高能量,例如 $1-100\mu$ 焦耳/脉冲的范围内的能量,在其它情况下 $10-50\mu$ 焦耳/脉冲的范围内的能量,在其它情况下 $20-30\mu$ 焦耳/脉冲的范围内的能量。

[0260] 这些脉冲能量可以进行脉冲能量小于 1、10 或 20μ 焦耳/脉冲的激光不能得到的可用应用,因为眼睛中有数个不同的表现出阈值行为的激光组织交互。存在低于 1μ 焦耳/脉冲能量的激光脉冲不能造成外科所需的组织改变的外科手术。在其它的外科手术中,这

个阈值可以是 10 或 20 μ 焦耳 / 脉冲。

[0261] 例如,白内障手术需要将激光导入目标组织的深处,例如导入 10mm 的深度。这种要求限制了数值孔径,因此要求每脉冲具有更高的能量值,以产生光致破裂。在一些情况下,10-15 μ 焦耳 / 脉冲能量可能足够了。为了避免以最大能量值操作,具有 20 μ 焦耳 / 脉冲的装置可能是期望的。因为这些数值不是目标上能量,所以为了解决沿着光路的损失,激光系统可以包括输出 25-20 μ 焦耳 / 脉冲的激光器。

[0262] 例如,在白内障外科手术应用中,割除硬度为 1、2、3 或 4 的白内障可能需要对应阈值之上的激光脉冲能量。例如,在某些情形下,脉冲能量高于 10-15 μ 焦耳 / 脉冲的激光器可以割除硬度为 1 的白内障,高于 10-20 μ 焦耳 / 脉冲的脉冲能量可以割除硬度为 2 的白内障,高于 20 μ 焦耳 / 脉冲的脉冲能量可以割除硬度为 3 的白内障并且高于 30-50 μ 焦耳 / 脉冲的脉冲能量可以割除硬度为 4 的白内障。这些阈值能量可能受到多个因素的影响,包括脉冲长度、重复率、整个目标区域内激光点的位置以及患者的年龄。

[0263] 激光脉冲的效果是类别广泛的目标组织中的其参数的高度非线性函数。因此,具有相同能量 / 脉冲但脉冲持续时间不同的激光可以在外科手术目标中达到不同的结果。例如,具有特定能量 / 脉冲值的皮秒脉冲可能在眼科组织中产生以无法控制的方式扩展的泡,而具有近似能量 / 脉冲的飞秒脉冲可以产生保持受控的泡。因此,可以由发射飞秒脉冲(即,长度小于皮秒的脉冲)的激光引擎产生上述能量 / 脉冲值。

[0264] 激光束的强度也可以依据其功率来定量。例如,具有 50kHz 重复率的 20 μ 焦耳 / 脉冲的激光携带 1W 的功率。通过依据功率来表示,上述阈值可以意味着对应重复率下的 0.1W、1W 和 10W 的阈值功率。因此,能够发射功率超出这些阈值的激光束的激光引擎提供不同的功能。

[0265] 例如,食品和药品管理局按照其功率对医疗激光器进行分类。因为激光器类别 3B 的效果已被广泛研究,所以通常将其用于眼科手术。输出功率小于 0.5W 的光束的激光器属于类别 3B。因此,功率小于 0.5W 的激光器提供与具有更高功率的激光器完全不同的应用。

[0266] 图 6A-D 示出激光引擎 1 利用其高速改变重复率的能力的功能。在各种应用中,外科激光束致使在焦点处光致破裂,其中所述断裂区域最终扩展成泡。当激光系统的扫描光学器件以扫描速度扫描焦点时,产生一串泡。这些成串的泡可以以可控方式形成线或面。大量的泡减少了沿着这些线或面的目标组织的机械完整性,从而可以容易地沿着线或面分离目标组织。实际上,扫描的激光束沿着这些线或面“切割”目标组织。

[0267] 在某些具有代表性的情况下,泡的直径可以为几微米(μ),这些泡以约 10-50 μ 或者更大的距离间隔。外科激光系统通常每个重复时间创建一次泡,重复时间是重复率的倒数。因此,只要激光系统的扫描速度是恒定的,这些泡就基本相等地隔开。

[0268] 激光脉冲产生泡之后,泡扩大。在各种情形下,这种扩大可能变得不受控制。这种不受控制的泡扩大可能在目标区域中很强地散射后面的激光脉冲,从而严重地损害了眼科手术的精度和控制性。形成彼此太近的泡是触发这种不受控制的扩大的原因之一,因为它可能导致泡合并。与泡扩大相关的其它可能的处理可以干扰后续形成的泡的形成,造成它们之间串扰,再一次导致泡不受控制地扩大。因此,对于眼科激光系统,在扫描期间维持预定泡间隔可以高度优先于保持对泡扩大的控制。

[0269] 然而,对焦点的扫描通常涉及移动诸如反射镜和电流计的部件。在给定极短的重

复时间的情况下,甚至这些移动部件的最小惯性和机械延迟也可以影响泡密度。例如,当沿着一些外科手术图形扫描时,在转向点和角处,扫描速度会慢下来,这可能导致激光点和泡的密度增加。在其它情况下,即使线性泡密度保持恒定,仅仅外科图形的几何形状也导致泡的面密度增大。

[0270] 图 6A 示出当固定重复率的激光扫描通过 Z 形转向的外科扫描图形以在目标组织中产生分离片时的示例。然而,在接近折回或转向点时,在重复率保持恒定的同时,扫描器慢下来,因此产生增加的线泡密度进而面泡密度,如所示出的。这种增加的泡密度可以导致严重的控制问题,如上所述。

[0271] 在一些现有的激光系统中,通过以下方式解决了这个技术问题:包括在激光束接近这类转向点时中断激光束的额外元件(例如,光束阻断器),以防止形成高泡密度区域。然而,包括这类光束阻断器意味着,在激光系统中增加了额外元件,所述激光系统的操作将要受到控制并且与扫描本身同步。所有这些增加意味着进一步的挑战和增加的复杂性。

[0272] 即使当扫描只是到达扫描图形中线的末端时,也引起类似的问题,从而再次放慢扫描速度并且造成线泡密度增加。

[0273] 图 6B 示出可以通过以下的“加速度最小化”扫描图形来避免这种尖锐的转向点。加速度最小化图形的示例是没有尖锐的 Z 形转向的螺旋形。然而,即使是螺旋图形,也仅仅减小了加速度,但不会消除加速度。因此,在这些系统中,扫描速度仍然发生变化,因此不得不选择固定的重复率,使得即使在图形的最低速度部分,泡的密度也不会增加至阈值之上。然而,这种设计原理意味着,对于图形中的大部分来说,扫描速度低于系统能够支持的速度,以获得实现切割或分离功能所需的泡密度。对等地,如果利用较高的扫描速度,则泡的间隔会变得更小,从而导致形成的泡之间产生干扰或串扰。所有这些效果都增加了不可控或非确定的泡扩大的风险。

[0274] 可以设计激光引擎 1 的实施方式,以提供这个背景下可用的功能。独特设计(总体上)和放大器 300 的色散控制器(具体地)使得可以与改变扫描速度基本同步地改变重复率。在一些激光引擎中,可以在 $10\ \mu\text{s}$ - 1s 范围的改变时间内改变重复率,在一些特别的情况下,其范围为 $1\ \mu\text{s}$ - 1s 。因此,一些实施方式可以包括控制电子元件,用于根据通过设计或测量得到的沿着外科图形的扫描速度放慢激光引擎 1 的重复率,以在目标区域内保持近乎恒定的泡密度。例如,可以通过与扫描速度的改变成比例地改变重复率,实现这种接近恒定的泡密度。通过这种功能,激光引擎 1 或 1' 可能能够形成具有接近相等的线或面泡密度或间隔的泡,从而阻止或抵消不受控制的泡扩大。

[0275] 图 6C 示出具有与图 6A 中相同的 Z 形转向的扫描外科图形,其中,当扫描移动到转向点周围时重复率减小,从而产生切口,使泡之间具有基本相等的线间隔。

[0276] 图 6D 示出螺旋外科图形,当螺旋汇聚到中心时,其重复率减小,其中,在重复率不减小的情况下,泡原本会彼此靠得太近。因此,这个实施例再次能够产生基本相等的面泡密度。

[0277] 当然,重复率的快速变化还允许产生不仅具有恒定密度而且也具有预定密度分布的泡。例如,眼核朝着其中心越来越硬。因此,在一些实施方式中,当扫描通过眼核的中心时,泡密度可以增大,之后,经过中心后,泡密度减小。大量不同的密度分布可能具有不同的医疗优点和益处。不是根据预定基础而是响应于对目标区域的成像或感测来调节密度分

布。

[0278] 图 7A-D 示出有助于激光引擎基本与扫描同步地或者至少在眼科手术时间量程内(例如,60-120 秒内)改变重复率的其它设计特征。

[0279] 图 7A-B 示出被称为热聚焦的现象及其对激光器设计的影响。当激光晶体 310 被泵浦二极管泵浦并且接着通过放大激光脉冲传递其能量时,其温度 T 升高。温度 T 通常不是均匀地升高:通常,温度在泵浦的中心区域中最高,可能在光轴处或光轴附近达到峰值,并且随着半径距离增加而降低。

[0280] 这种不均匀的温度升高至少有两个效果:(i) 因为折射率 n 随着温度而增加: $n=n(T)$,所以它在激光晶体 310 的中心区域中表现出最大值,以及(ii) 温度升高使得激光晶体 310 的中心区域比其周围区域更大范围地扩大并因此膨胀,而由较冷的外部区域保持。这两个影响往往会使得入射的平行光线聚焦。这种现象被称为热聚焦。通过将激光晶体标识为透镜 310' 来表示这种热聚焦。热聚焦可以呈现数个屈光度的折射,因此它可以显著地改变激光引擎的性能。

[0281] 图 7A 示出激光引擎的设计通常涉及:确定由操作重复率和光束功率确定的、在操作温度 $T=Top$ 下激光晶体的热聚焦的折射效果,以及通过激光引擎的其它光学元件引入热聚焦的折射补偿。示例引入了额外的透镜 312,在平行光束被热聚焦 310' 聚焦后,透镜 312 能够将会聚光束恢复成平行光束。

[0282] 图 7B 示出这种折射补偿对于具体的操作温度 $T=Top$ 是合适的,因此只是对特定重复率和光束功率是合适的。实际上,如果应用要求改变重复率或功率,则改变后的重复率和/或改变后的功率将激光晶体 310 的温度 T 从 $T=Top$ 变为 $T=Top'$ 。这种温度变化使得热透镜的聚焦随之变化(从虚线表示的会聚光束到实线表示的光束),将在 $T=Top$ 下平行的光束转换成 $T=Top'$ 下发散的光,因此具有较差的会聚特性。

[0283] 图 7B 还示出可以通过调节折射补偿恢复会聚特性。改变折射补偿通常需要调节激光引擎的一个或多个光学元件,比如,移动透镜,旋转光栅或相对于光轴移动光束。图 7B 示出沿着光轴调节补偿透镜 312,如箭头所指示的。与之前的色散补偿类似,借助机械调节进行的这种折射补偿的速度也慢,并且需要精细调节和校准。因此,大多数激光器完全回避了这个挑战,并且不允许改变重复率。甚至在那些提供可变重复率的激光器中,因为调节补偿光学元件的速度慢,所以也不能与激光引擎的扫描近乎同步地改变重复率,甚至是在进行眼科手术的期间内。

[0284] 图 7C-D 示出采用各种设计原理使热聚焦效果最小的激光引擎 1 的实施方式。如果大多数或全部光线传播通过或非常接近热聚焦 310' 的中心,则可以使热聚焦 310' 产生的折射减小相当大的程度,因为在中心处穿过透镜的光线没有以几何光学近似水平发生折射。根据波动光学水平并且当包括有限尺度的透镜时,这些中心光线确实发生折射,但只是最低程度的折射。

[0285] 图 7C 示出可以(例如)通过以下方式压缩光线,使其接触透镜中心:(i) 使用具有聚焦效果的端面镜 322 的实施例;(ii) 将热聚焦激光晶体 310/310' 放置在距聚焦端面镜 322 的焦点非常近的位置,使得大部分来自聚焦端面镜 322 的光线接触热聚焦激光晶体 310/310' 的中心,以及(iii) 将其它端面镜 321 也放置在距聚焦端面镜 322 进而距热聚焦晶体 310 非常近的位置,以确保光束反射回其自身,而不是变得发散。在这类设计中,当改

变重复率或光束功率从而将激光晶体 310 的温度从 $T=Top$ 变为 $T=Top'$ 时,并没有迫切需要重新调节激光引擎 1 的任何机械或光学元件,因为激光晶体 310 的折射影响已被减至最小。因此,可以改变重复率或光束功率,而不用任何对应的对折射补偿器的调节。

[0286] 参照图 4,在各种实施例中,端面镜和折叠式反射镜 321-324 中的任何一个或多个可以具有所述聚焦效果。

[0287] 可以优化这个实施例的设计参数以进一步将已减少的热聚焦减至最少,这些参数包括端面镜 321 和激光晶体 310 之间的距离 d_1 、激光晶体 310 和聚焦端面镜 322 之间的距离 d_2 以及其它参数,如,孔径、激光晶体 310 的厚度以及聚焦端面镜 322 的半径。

[0288] 图 7D 示出相关设计。在这个实施例中,端面镜 321 和 322 均为聚焦类型。这个示例还减少了热聚焦,因为能够以更高精度将激光晶体 310 放在两个端面镜的共用的焦点上。同样,可以对其它参数进行附加的设计优化。

[0289] 图 8 示出抑制激光引擎 1 中的热聚焦的定量特征。水平轴示出晶体中心操作温度 $T_{operating}=Top$ 与环境温度 $T_{环境}$ 之比。垂直轴示出由激光引擎 1 发射的激光束的光功率。曲线图示出,即使光激励操作使激光引擎升温至比环境温度高 10%-50%,光功率的变化也仅为几个百分点,当 $T_{operating}/T_{ambient}=150\%$ 时达到约 10%。激光晶体 310 的光功率在这样宽范围的操作温度内变化得如此小是因为,通过图 7C 和图 7D 的设计,有效地减小了激光晶体 310 的热聚焦的折射影响。

[0290] 上面的详细描述提供了设计原理以及一些示例,这些示例可用于实现改变重复率的功能而不需要调节振荡器 100 外部的光学元件,包括 (i) 使用放大器 300 内部的色散补偿;(ii) 使用集成的展宽器-压缩器,以及 (iii) 使用最小化热聚焦的腔构造,以及上述的其它设计考虑。使用一个或多个上述设计特征的激光引擎或类似物能够使得在变化时间内重复率在重复率范围内变化,从而只造成有限的激光束改变。

[0291] 这里的重复率范围可以是 10kHz-2MHz,或者 50kHz-1MHz,或者 100kHz-500kHz,这些范围每个都提供特定功能。

[0292] 根据手术的类型,变化时间可以是多步骤眼科手术的时间量程,比如,在 1-120 秒或 10-60 秒或 20-50 秒的范围内。具有处于这些范围内的变化时间的激光引擎可以支持重复率的变化,以将重复率从第一外科手术所需的重复率切换到第二外科手术所需的重复率。

[0293] 在其它情况下,比如,在与图 6A-D 相关地描述的实施例中,变化时间可以由激光系统的扫描速度设置的时间量程,例如,重复时间的倍数,其中所述倍数的范围可以是 1-10,000 或 100-1,000。因为重复时间在 10kHz 时约为 100 微秒 ($100\mu s$) 并且在 1MHz 时约为 $1\mu s$,所以这些“扫描变化时间”或者“扫描同步变化时间”可以在 $1\mu s$ -1s 的范围内。

[0294] 在一些实施方式中,通过响应于扫描速度的变化改变重复率使得扫描速度和重复率之比基本保持恒定,保持泡的线密度。

[0295] 由于重复率改变,激光束可能发生有限程度的改变。可以用各种方式进行这种改变,包括:(i) 光束直径变化少于 10% 或 20%;或者 (ii) 光束的中心移动少于光束直径的 20% 或 40%。这里,可以用不同方式定义光束的直径,比如,光束的强度降低至光束中心强度的 50% 时的直径。也可以使用其它定义方式。

[0296] 示例是可以发射重复率为 100kHz 并且焦点处的光束直径为 3 微米的激光引擎 1,

其中,可以在 15 秒的变化时间内,仅通过调节振荡器 100 将激光束的重复率变为 150kHz,并且尽管出现这种相当大的变化,但是光束只发生有限程度的改变:焦点处直径的改变仅为 15%,达到 3.45 微米,并且其中心仅相对于光轴移动光束直径的 30%,即,移动 0.9 微米。这种激光引擎可用于以 100kHz 的重复率执行白内障手术,在 15 秒内其重复率变为 150kHz,并且再次用于以 150kHz 的重复率执行接下来的角膜手术,在保持很好的光束质量的同时,整个过程不超过 100 或 120 秒。

[0297] 在另一个示例中,激光引擎 1 可以发射重复率为 100kHz 并且光束直径为 4 微米的激光束。当扫描接近其中扫描速度减慢至常规扫描速度一半的外科图形的尖锐的 Z 形转向点时,重复率可以相应地逐渐减小至其值的一半,例如,从 100kHz 减小至 50kHz,以保持所产生的泡或点的线密度接近恒定。如果例如在重复率为 100kHz 时在 10 次重复时间中执行这种减慢,则改变重复率的总时间约为 100 μ s。

[0298] 可以在多个步骤中或逐渐地改变重复率,最后结果是,重复率与激光束的扫描时间量程的改变近乎同步地改变,在约 100 μ s 内从 100kHz 变为 50kHz。激光引擎 1 的这种设计使得可以在保持激光束高质量的同时,以这种相当快的时间改变重复率。在示例中,激光束的直径在 100kHz 时可以为 4 微米,当重复率降至 50kHz 时,激光束的直径仅变化 10%,达到 3.6 微米,并且激光束的中心离开光轴的距离仅为光束直径的 20%,即,移动 0.8 微米。

[0299] 表示激光引擎 1 如何能够在改变重复率的同时保持光束高质量的另一种方式是依据熟知的 g1-g2 稳定平面(stability plane)。激光引擎 1 的实施方式可以在宽范围的重复率中,例如,在 10kHz-2MHz 或 10kHz-200kHz 或 50kHz-200kHz 的范围中,将光束参数 g1 和 g2 保持在双曲线稳定区域内。

[0300] 从另一个优势来说,少量的光学元件可以是激光引擎 1 的实施方式的重要且显著的特性。通用的飞秒激光器是切割边缘装置,其对于环境影响、与操作指南不符的使用以及甚至直接配戴(如,自加热效应)非常敏感并且容易由于这些因素而出现误对准。因此,飞秒激光器的光学元件可能需要精细调节、重新调节并且以规则的短时间间隔进行维修。典型的飞秒激光器可以包含上百个或者更多个光学元件,并且这些光学元件中任一个的故障都会导致整个激光器发生故障。

[0301] 一些典型的激光器可以每当 30-60 个“循环”(即,开启和关闭激光引擎的电源)之后发生故障。为了预防在手术过程中发生故障,一些激光系统的操作人员必须计划进行定期的昂贵维护,这全都伴随着成本和停机时间,并且操作人员仍可能承担着现场出现导致破坏性结果的故障的高风险。

[0302] 相比之下,激光引擎 1 的实施例可以在不需要重新调节激光引擎 1 的任何光学元件的情况下,通过开启或关闭电源,循环超过 120 次。对于一些实施例,循环的次数可以超过 180 次,或者甚至 240 次。

[0303] 在外科手术中,为了使与激光晶体 310 变热和变冷相关的问题最少,通常,早上开启激光器一次并且仅在晚上关闭激光器,即,外科激光器通常一天循环一次。简单估计,如果激光器一个星期使用 5 次进而每个月使用接近 20 次,则 30 次循环可以意味着一个半月之后出现故障的机会高,并且 60 次循环意味着 3 个月之后出现故障的机会高。

[0304] 相比之下,激光引擎 1 的一些实施方式可以循环超过 120 次,意味着 6 个月内出现故障的可能性低。其它实施方式可以循环 180 次或 240 次,意味着 9 个月内或整年出现故

障的可能性低。因此,可以通过预防性维护安排来操作激光引擎 1 的实施例,这些维护安排给使用者和服务供应商等带来的负担显著更低。另外,这种低频率的维护安排使得可以使用不同类型的维护,比如,置换激光系统的整个部分。在一些情况下,可以使用新近维护的激光引擎现场简单地置换整个激光引擎 1,并且对激光引擎 1 的维护可以在服务供应商本部的高技术环境中进行,而不是在外科手术人员的较低的技术环境中进行。

[0305] 虽然本文献包含许多特性,但不应该将这些理解为对可能要求保护的发明范围的限制,而应该理解为对本发明的具体实施例的特定特征的描述。也可以在单个实施例中,以组合形式实现在本文献中以各个单独实施例为背景描述的某些特征。相反地,也可以单独地或以任何合适的子组合形式,在多个实施例中实现以单个实施例为背景描述的各种特征。此外,尽管上面可能将特征描述为以某些组合形式作用并且甚至如此初始地要求保护,但是在一些情况下,可以从组合中删除源自要求保护的组合的一个或多个特征,并且要求保护的组合可能涉及子组合或子组合的变形。

[0306] 本文公开了由成像引导的激光外科技术、设备和系统的多个实施方式。然而,可以基于所描述的内容,进行所述实施方式的变化和增强以及其它实施方式。

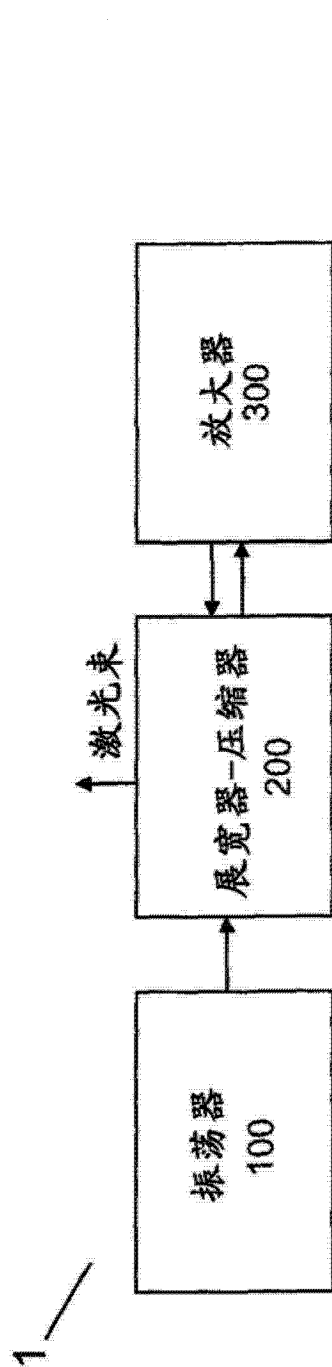


图 1A

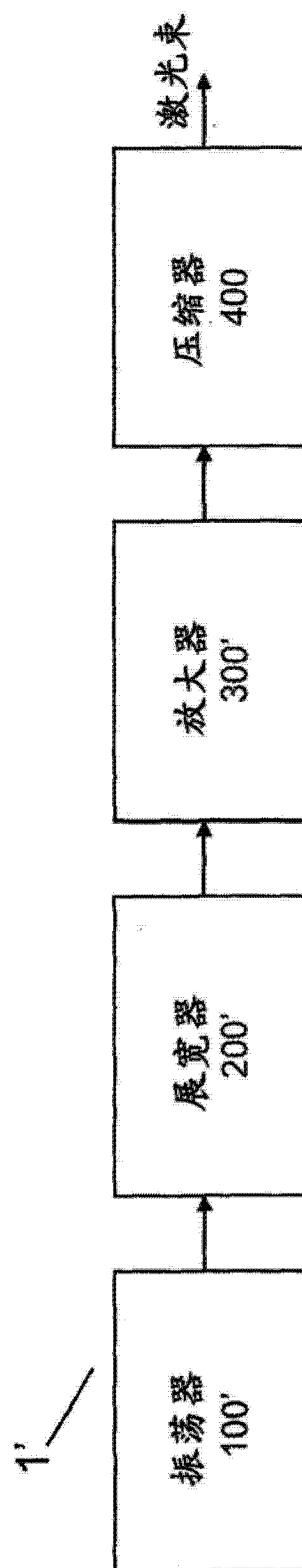


图 1B

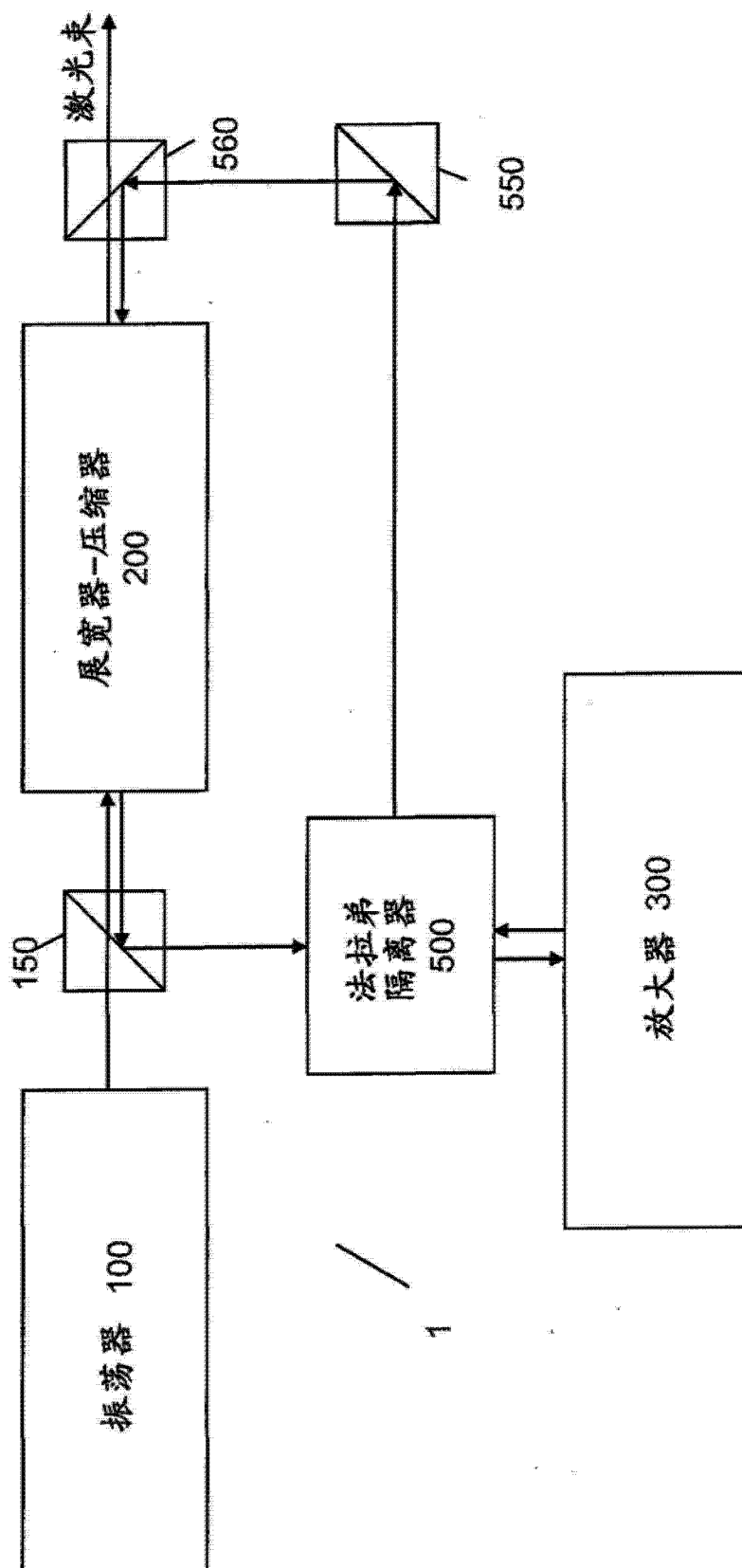


图 2

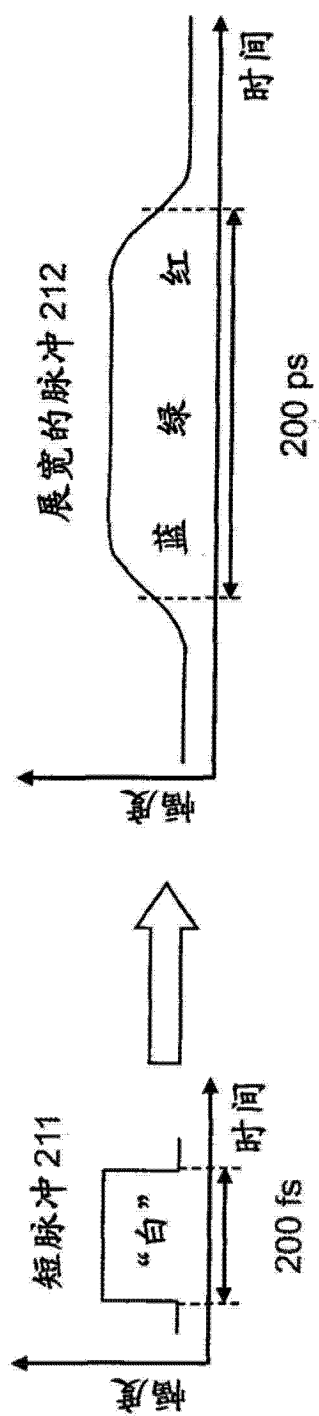


图 3A

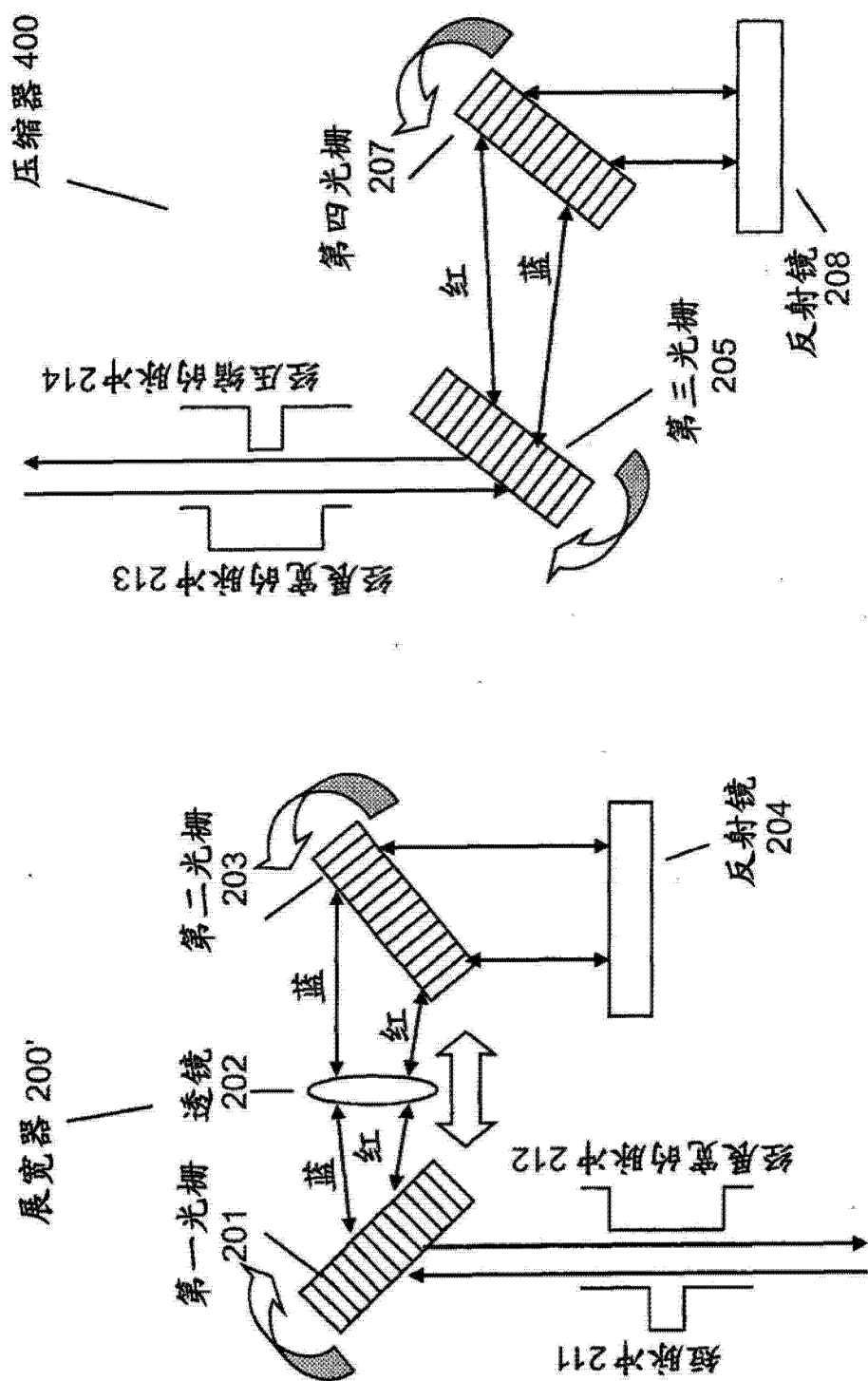


图 3B

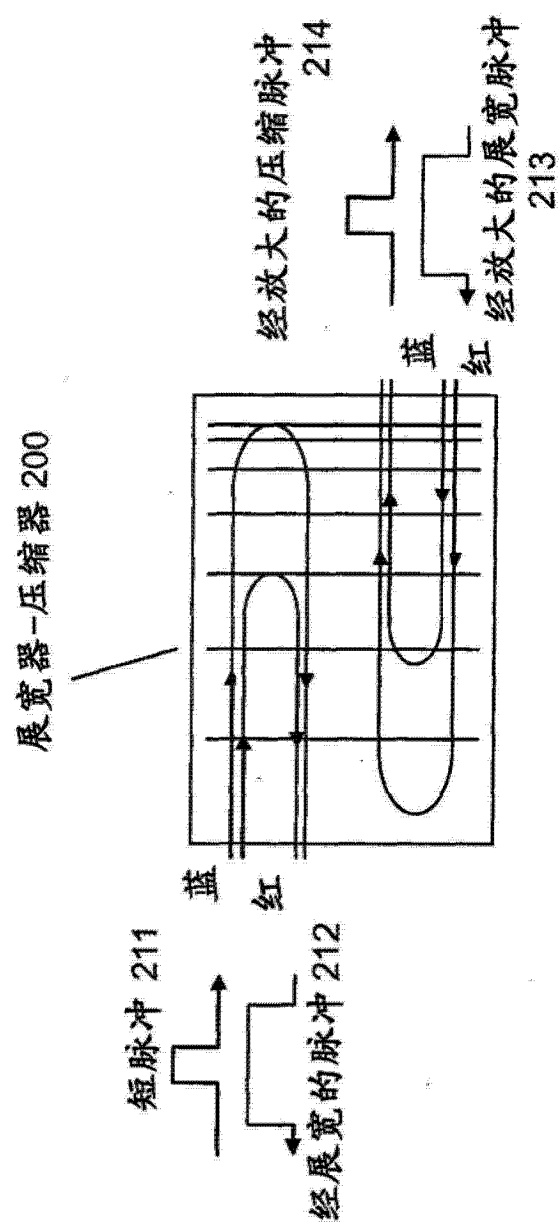


图 3C

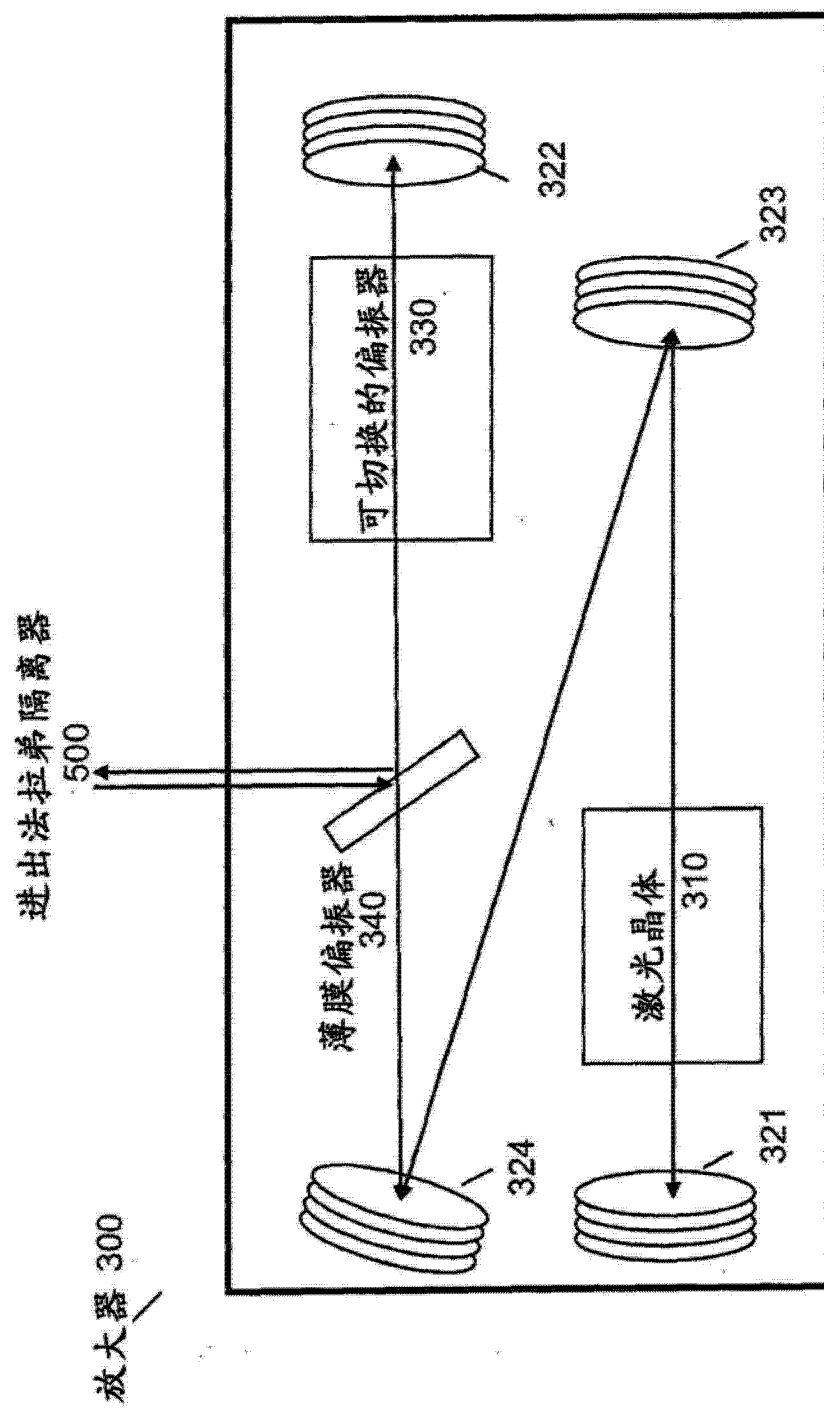
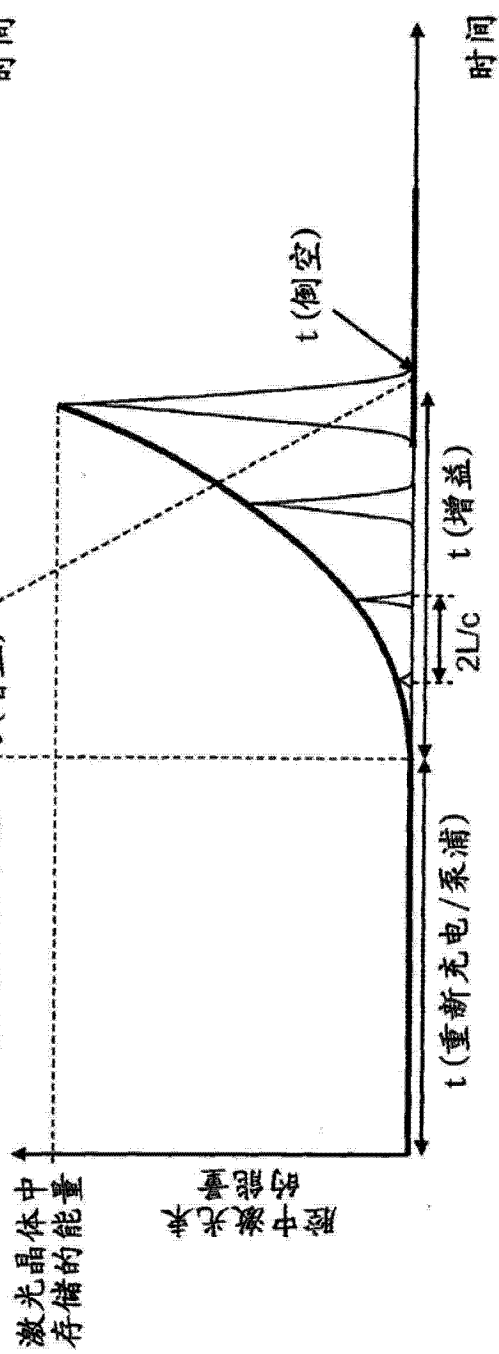
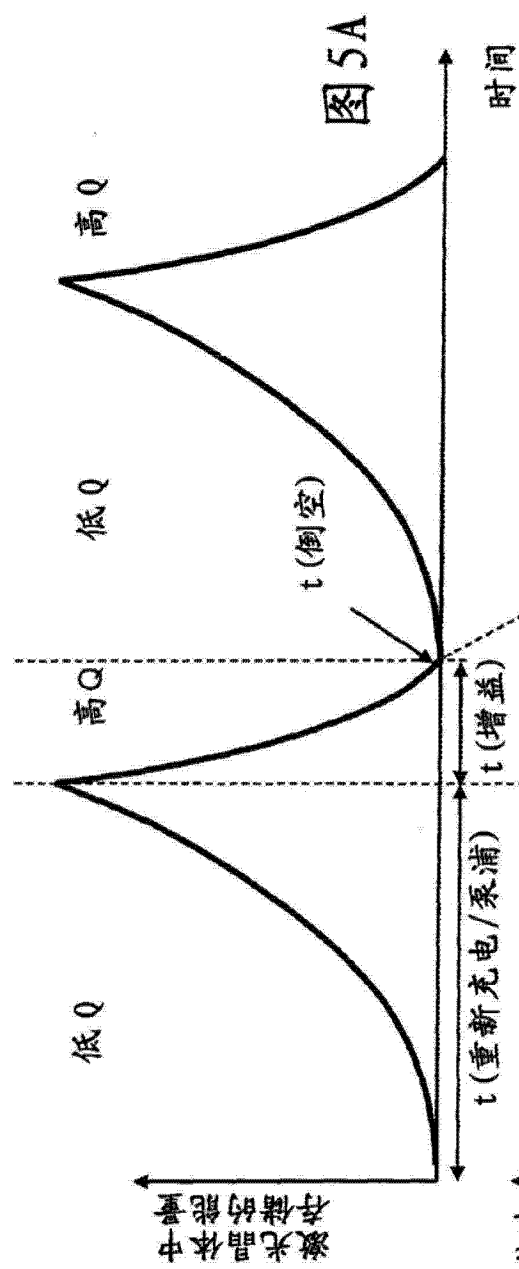


图 4



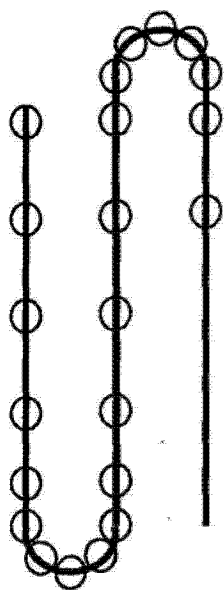


图 6A

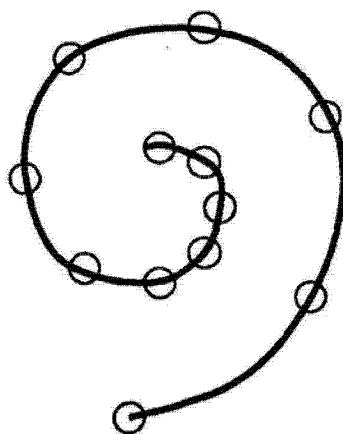


图 6B

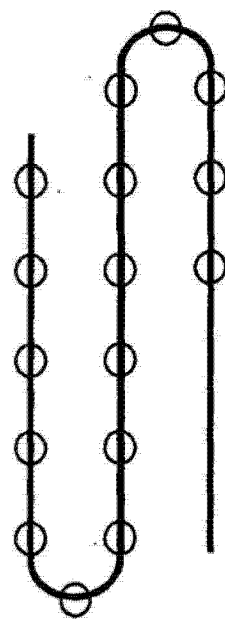


图 6C

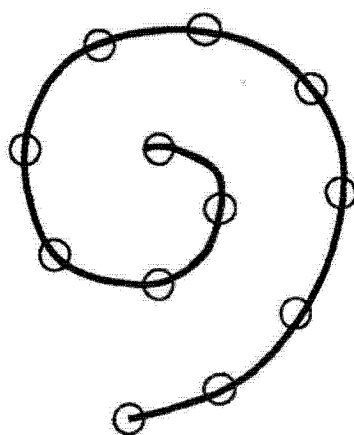


图 6D

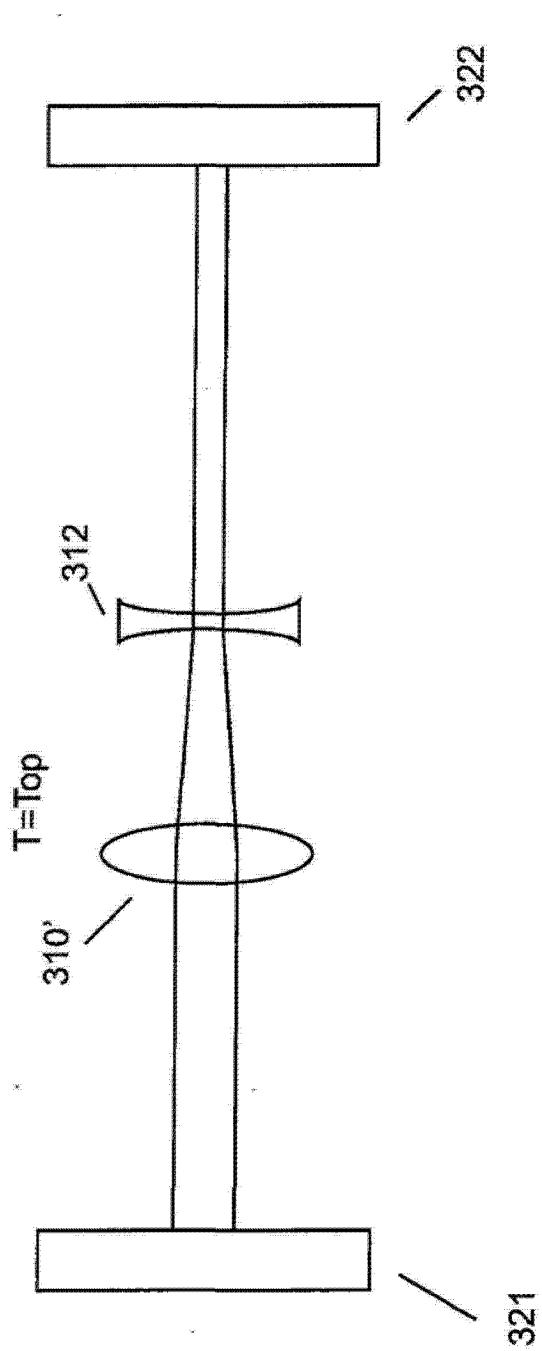


图 7A

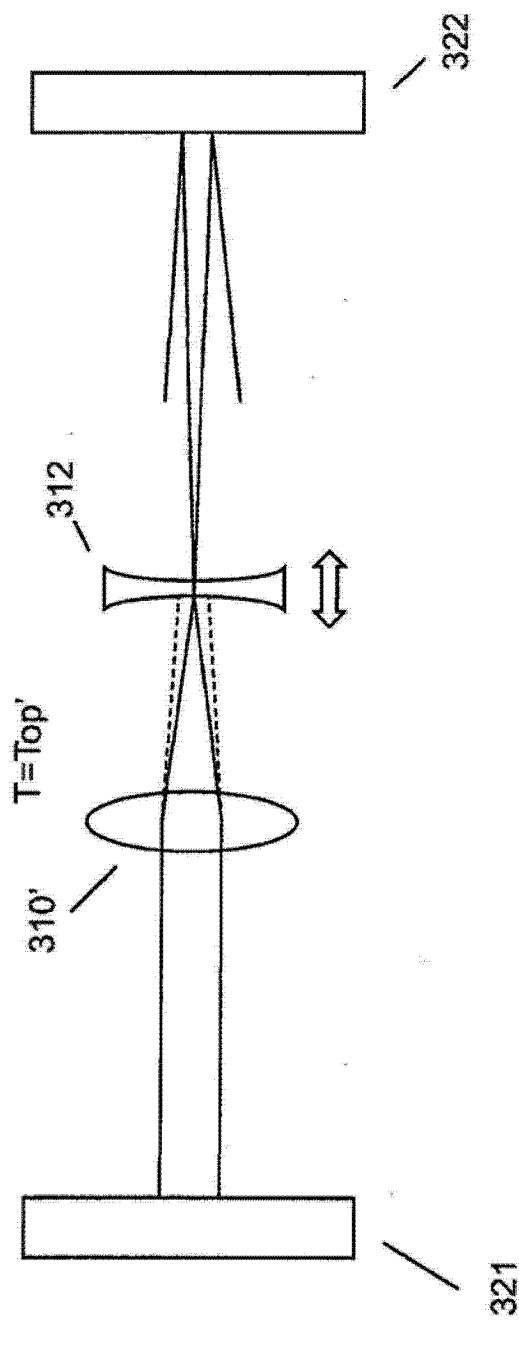


图 7B

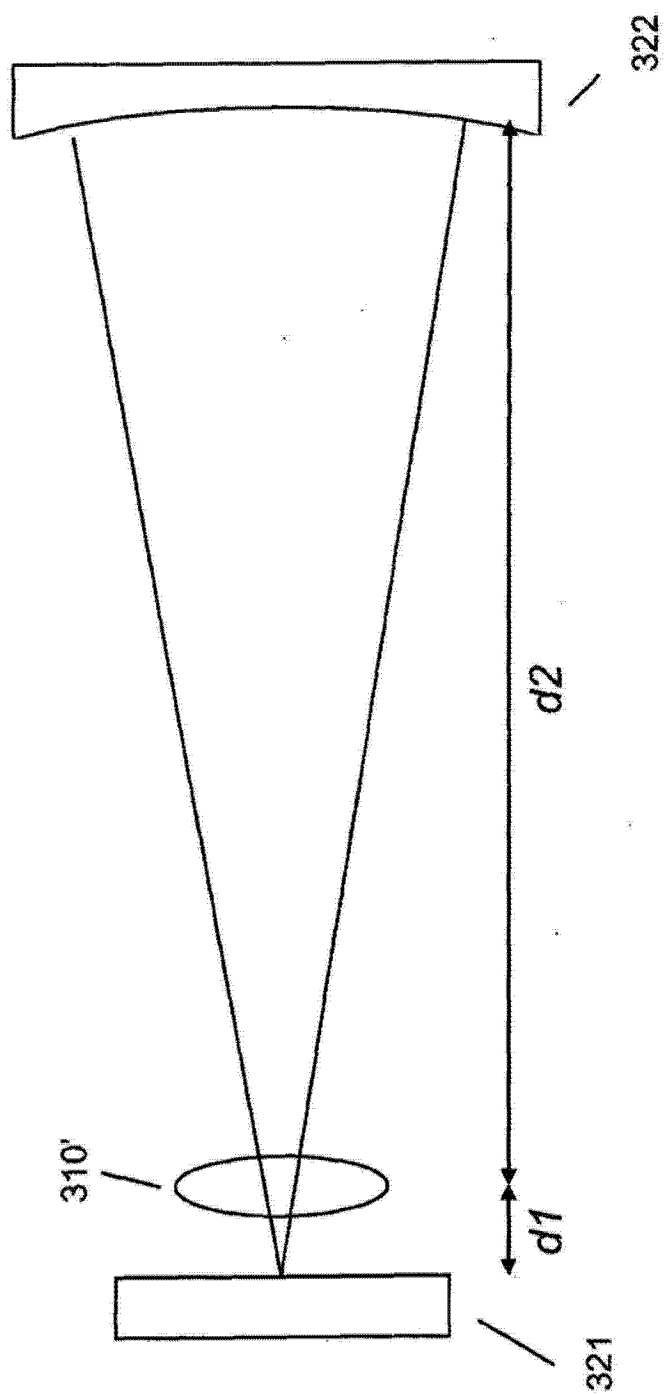


图 7C

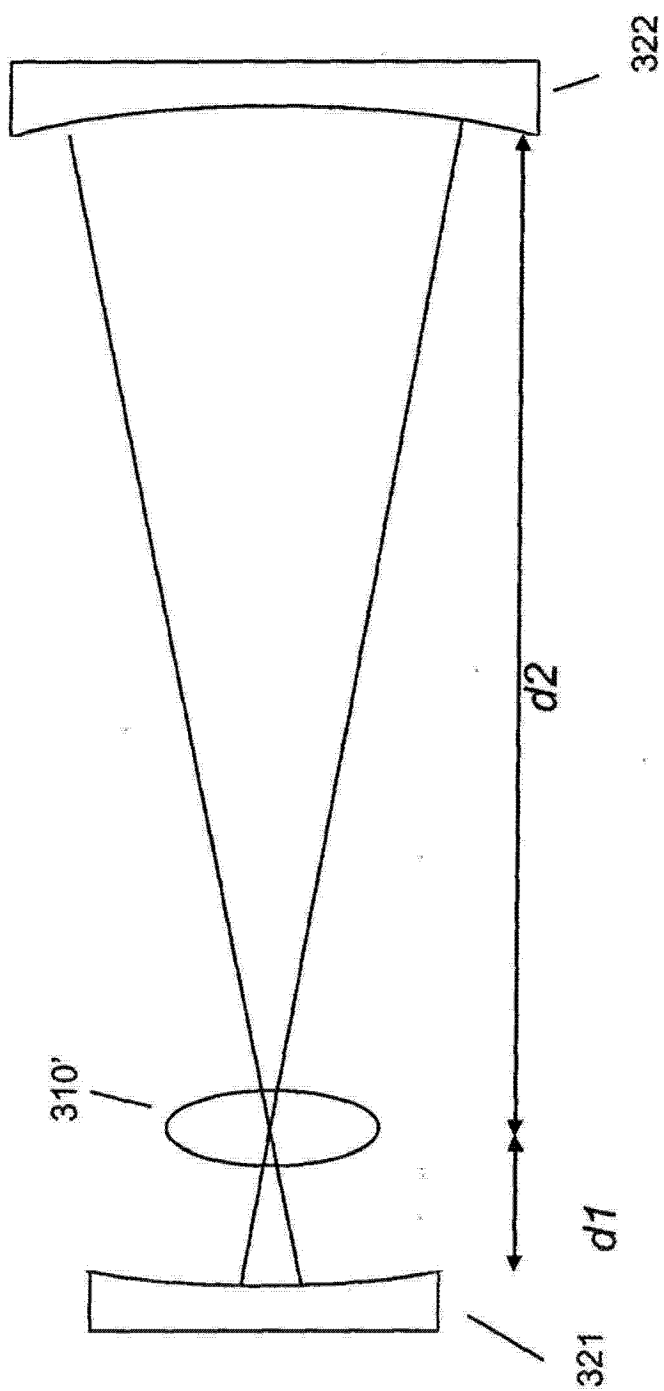


图 7D

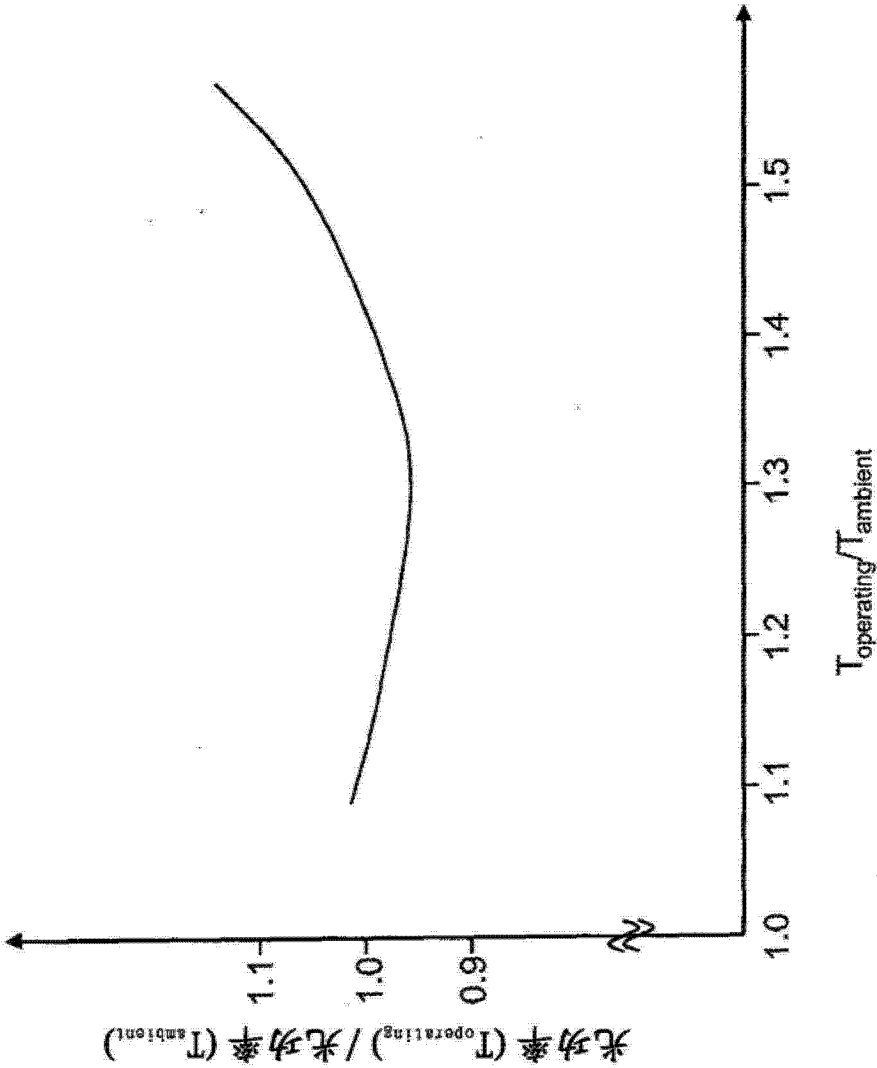


图 8