(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104882776 B
(45)授权公告日 2017.11.28

(21)申请号 201510359990.2

(22)申请日 2011.02.24

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104882776 A

(43)申请公布日 2015.09.02

(30)优先权数据
12/712,067 2010.02.24 US

(62)分案原申请数据
201180010855.7 2011.02.24

(73)专利权人 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 3/10(2006.01)
H01S 3/00(2006.01)
A61F 9/008(2006.01)

(56)对比文件
CN 101389280 A,2009.03.18,
US 2004/0243111 A1,2004.12.02,
US 2009/318906 A1,2009.12.24,
CN 101616647 A,2009.12.30,
JP 特表2007-527732 A,2007.10.04,
Tibor Juhasz 等.Corneal Refractive Surgery with Femtosecond Lasers.《IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS》.1999,第5卷(第4期),
Nathan W.Rimington 等.Femtosecond Ti:sapphire oscillator electro-optically cavity dumped at 50 kHz.《APPLIED OPTICS》.2001,第40卷(第27期),
Huan Huang 等.Human dermis separation via ultra-short pulsed laser plasma-mediated ablation.《JOURNAL OF PHYSICS D:APPLIED PHYSICS》.2009,第42卷

审查员 秦岳飞

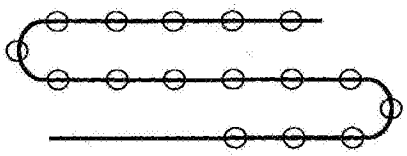
权利要求书1页 说明书28页 附图15页

(54)发明名称

重复率根据扫描速度可调的高功率飞秒激光器

(57)摘要

本公开涉及重复率根据扫描速度可调的高功率飞秒激光器。提供了用于构造和操作飞秒脉冲激光器的设计和技术。激光引擎的一个例子包括生成和输出飞秒种子脉冲光束的振荡器;展宽种子脉冲的持续时间的展宽器-压缩器;以及接收展宽种子脉冲、放大所选的展宽种子脉冲的幅度以创建放大的展宽脉冲、并且输出放大的展宽脉冲激光束以返回至展宽器-压缩器的放大器,展宽器-压缩器压缩返回的激光束的持续时间并输出飞秒脉冲激光束。放大器包括色散控制器,其补偿放大的展宽脉冲的色散,使得激光器的重复率在手术程序之间或者根据扫描速度可调。激光引擎可以是紧凑的,其总光路小于500米,并且具有小数量的光学元件,例如少于50个。



CN 104882776 B

1.一种用激光系统进行扫描的方法，该方法包括以下步骤：

由振荡器生成飞秒种子脉冲；

由展宽器展宽种子脉冲的持续时间；

由放大器将所展宽的种子脉冲放大成激光脉冲；

用放大器的端镜之间的色散补偿器补偿在5000-20000fs^2的范围内的激光脉冲的群延迟色散；

由可切换偏振器以第一重复率从放大器输出激光脉冲；

由压缩器将激光脉冲的持续时间压缩到1-1000fs的范围；

用扫描激光传递系统将激光脉冲聚焦至第一靶区域中的焦斑；

用扫描激光传递系统在第一靶区域中以第一重复率扫描焦斑；

用重复率控制器将第一重复率改变为第二重复率；以及

用扫描激光传递系统在第二靶区域中以第二重复率扫描焦斑。

2.如权利要求1所述的方法，包括：

以第一扫描速度在所述第一靶区域中扫描焦斑；

由扫描激光传递系统的处理器将第一扫描速度改变为第二扫描速度；以及

以第二扫描速度在所述第二靶区域中扫描焦斑。

3.如权利要求1所述的方法，其中：

所述第一重复率和所述第二重复率落入10kHz-2MHz、50kHz-1MHz或100kHz-500kHz的范围之一内。

4.如权利要求3所述的方法，其中：

所述第一重复率为100kHz；以及

所述第二重复率为150kHZ。

5.如权利要求1所述的方法，其中：

所述压缩器和展宽器被集成到展宽器-压缩器中。

6.如权利要求1所述的方法，其中：

所述可切换偏振器包括电光器件，其被配置为旋转放大器中的展宽的脉冲的偏振面，

所述可切换偏振器具有小于5ns的上升时间。

7.如权利要求6所述的方法，所述扫描激光传递系统包括：

控制电子器件，其被配置为向可切换偏振器施加控制信号以使得可切换偏振器以小于5ns的上升时间进行切换。

8.如权利要求1所述的方法，将第一重复率改变为第二重复率包括：

改变在由电光调制器从放大器输出激光脉冲之前的激光脉冲的往返次数。

9.如权利要求1所述的方法，将第一重复率改变为第二重复率包括：

在1μ秒-1秒的范围的时间中将第一重复率改变为第二重复率。

重复率根据扫描速度可调的高功率飞秒激光器

[0001] 本申请是国际申请日为2011年2月24日、国家申请号为201180010855.7的国际申请进入国家阶段的发明申请的分案申请。

技术领域

[0002] 本专利文献涉及飞秒激光器，包括可调节重复率高功率飞秒激光器。

背景技术

[0003] 在许多当今不断更具挑战性的激光应用中，持续存在对更短脉冲且每个脉冲具有高能的需要。这些特征允许激光应用的更好控制以及更大的工作速度。该领域发展中的重要阶段是输出飞秒激光脉冲的激光系统的出现和成熟。这些飞秒激光器能被用于各种各样的应用，包括许多不同类型的眼科手术，其中这些超短脉冲可以提供具有良好控制的组织修饰。

发明内容

[0004] 在本文中提供了构造和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例子和实现，其中一些具有少量的光学元件，一些具有低故障频率，其他一些具有适当小的物理延伸区(extent)，另一些则能够允许重复率的改变但无需系统进行大的重新调节，而一些对于热透镜效应具有降低的敏感度。

[0005] 例如，激光引擎的一些例子包括生成和输出飞秒种子脉冲束的振荡器，展宽种子脉冲持续时间的展宽器-压缩器，以及从展宽器-压缩器接收展宽的种子脉冲、放大所选的展宽的种子脉冲的幅度以创建放大的展宽脉冲并且输出放大的展宽脉冲的激光束的放大器，其中展宽器-压缩器接收放大的展宽脉冲的激光束，压缩放大的展宽脉冲的持续时间，并且输出脉冲持续时间小于1000飞秒的飞秒脉冲激光束，并且放大器包括降低放大的展宽脉冲的色散的色散补偿器。

[0006] 在一些例子中，振荡器是二极管泵浦光纤振荡器，并且输出变换限制(transform-limited)的种子脉冲。

[0007] 在一些例子中，振荡器生成种子脉冲持续时间小于1000飞秒的光束。

[0008] 在一些实现中，振荡器输出种子脉冲重复率在10-100MHz或20-50MHz范围内的光束。

[0009] 在一些实现中，展宽器-压缩器包括啁啾体布拉格光栅。

[0010] 在一些实现中，展宽器-压缩器包括光热折射玻璃。

[0011] 在一些实现中，展宽器-压缩器展宽飞秒种子脉冲的持续时间达10倍以上。

[0012] 在一些实现中，展宽器-压缩器将飞秒种子脉冲的持续时间展宽至1000-200000飞秒的展宽持续时间。

[0013] 在一些实现中，激光引擎不包含可调整的展宽器-压缩器。

[0014] 在一些实现中，激光引擎包括位于振荡器和展宽器-压缩器之间的偏振器和λ/4

片，其使展宽的种子脉冲束重定向为朝向放大器。

[0015] 在一些实现中，激光引擎包括法拉第隔离器，其接收来自展宽器-压缩器的展宽种子脉冲束，朝向放大器输出该展宽种子脉冲束，接收来自放大器的放大的展宽脉冲激光束，朝向展宽器-压缩器的压缩器端口输出放大的展宽脉冲激光束，并将振荡器与放大的展宽脉冲激光束相隔离。

[0016] 在一些实现中，放大器包括光学元件，而色散补偿器引入与放大器的光学元件引入的色散的符号相反的色散。

[0017] 在一些实现中，由色散补偿器引入的色散与由放大器中除色散补偿器以外的光学元件在一次往返内引入的色散基本上幅度相等且符号相反。

[0018] 在一些实现中，色散补偿器包括啁啾反射镜、啁啾光纤、啁啾光栅、棱镜、或者啁啾透射光学元件中的至少一种。

[0019] 在一些实现中，放大器包括放大所选的展宽种子脉冲的幅度的增益材料，定义谐振腔的两个端镜，以及使谐振光路在放大器内折叠的两个折叠反射镜，其中两个端镜和两个折叠反射镜中的至少一个是啁啾反射镜。

[0020] 在一些实现中，啁啾反射镜将负色散引入到放大的展宽脉冲中。

[0021] 在一些实现中，激光引擎被配置为输出具有第一重复率的激光束，并随后利用激光引擎的所有光学元件的基本上相同的设置输出具有不同的第二重复率的激光束。

[0022] 在一些实现中，第一重复率和第二重复率落入10kHz-2MHz、50kHz-1MHz或100kHz-500kHz的范围内。

[0023] 在一些实现中，当未经修改的激光引擎对于第一和第二重复率采用不同的光学元件设置时，激光引擎能够被修改以利用与第一重复率的情况基本上相同的所有光学元件的设置，来输出具有第二重复率的激光束。

[0024] 在一些实现中，放大器被配置为在重复率改变时改变放大器中放大的展宽脉冲的往返次数，同时保持放大器的光学设置不变。

[0025] 在一些实现中，放大器具有小于一米的端镜至端镜折叠光路。

[0026] 在一些实现中，放大器是腔倒空再生放大器、啁啾脉冲放大器或Q开关放大器。

[0027] 在一些实现中，放大器在端镜之间的光路中具有可切换的偏振器，其能够通过在偏振调节状态和偏振非调节状态之间切换而选择展宽的脉冲，其中在偏振调节状态中，可切换偏振器调节放大的展宽脉冲的偏振，而在偏振非调节状态中，可切换偏振器基本上不调节放大的展宽脉冲的偏振。

[0028] 在一些实现中，激光引擎可以包括高压功率开关，其控制可切换偏振器以从偏振非调节状态切换至偏振调节状态，其上升时间小于5纳秒、4纳秒或3纳秒。

[0029] 在一些实现中，激光引擎在1-120秒、10-60秒或20-50秒内将飞秒脉冲激光束的第一重复率改变为第二重复率。

[0030] 在一些实现中，激光引擎在1μs-1s范围的改变时间内将飞秒脉冲激光束的第一重复率改变至第二重复率。

[0031] 在一些实现中，放大器包括至少一个聚焦反射镜和紧靠聚焦反射镜的焦点设置的激光晶体。

[0032] 在一些实现中，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至第二

值且两值均位于10kHz-2MHz的范围中时，输出的激光束直径改变小于10％或20％，或者输出的激光束中心移动小于光束直径的20％或40％。

[0033] 在一些实现中，激光束的飞秒脉冲具有在1-100μJ/脉冲、10-50μJ/脉冲、或20-30μJ/脉冲范围内的能量。

[0034] 在一些实现中，激光引擎输出功率大于0.1W、1W或10W的激光束。

[0035] 在一些实现中，激光引擎是眼科手术系统的一部分。

[0036] 在一些实现中，一种使用激光引擎生成激光束的方法包括如下步骤：使用振荡器生成持续时间小于1000飞秒的种子脉冲的光束；使用脉冲展宽器展宽种子脉冲的持续时间；使用放大器放大所选的展宽的种子脉冲的幅度以生成放大的展宽脉冲；使用脉冲压缩器将放大的展宽脉冲的持续时间压缩至小于1000飞秒；输出第一重复率处于10kHz-2MHz范围内且脉冲持续时间小于1000飞秒的飞秒脉冲激光束；将重复率从第一重复率改变至处于10kHz-2MHz范围内的第二重复率，而基本上不改变激光引擎的光学设置；以及输出具有第二重复率以及小于1000飞秒的脉冲持续时间的飞秒脉冲激光束。

[0037] 在一些实现中，放大步骤包括利用放大器中的色散补偿器来降低由放大器的光学部件引起的放大的展宽脉冲的色散。

[0038] 在一些实现中，降低色散的步骤包括由放大器中的至少一个啁啾反射镜引入补偿色散，其中，对于每次往返，补偿色散与放大器中除色散补偿器之外的所有光学元件所引起的色散基本上幅度相等且符号相反。

[0039] 在一些实现中，改变重复率的步骤包括改变在放大器中的往返次数，同时保持放大器的光学设置基本上不变。

[0040] 在一些实现中，展宽步骤和压缩步骤由同一展宽器-压缩器执行。

[0041] 在一些实现中，在已经完成输出具有第一重复率的激光束之后，在1-120秒、10-60秒或20-50秒内输出具有第二重复率的激光束。

[0042] 在一些实现中，在1μs-1s范围内的改变时间内将重复率从第一重复率改变至第二重复率。

[0043] 在一些实现中，一种激光引擎包括：生成脉冲持续时间小于1000飞秒的脉冲光束的振荡器；展宽光束脉冲的持续时间的展宽器-压缩器；以及放大经展宽的光脉冲的幅度以生成放大的展宽脉冲的放大器，其中展宽器-压缩器压缩放大的展宽脉冲的持续时间，并输出激光脉冲束；并且激光引擎可操作以输出第一重复率在10kHz-2MHz范围内的激光脉冲束，并且随后利用激光引擎的所有光学部件的基本上相同的设置输出第二重复率在10kHz-2MHz范围内的激光脉冲束，其中对于第一和第二重复率，激光脉冲的持续时间小于1000飞秒。

[0044] 在一些实施例中，放大器包括色散补偿器，其至少部分地补偿由放大器的光学元件引入的色散。

[0045] 在一些实现中，放大器包括在放大器的端镜之间的可切换偏振器，其在可切换偏振器调节放大的展宽脉冲的偏振的状态和可切换偏振器不调节放大的展宽脉冲的偏振的状态之间切换，其上升时间小于5纳秒、4纳秒或3纳秒。

[0046] 在一些实现中，放大器包括至少一个聚焦反射镜以及位于聚焦反射镜的焦点附近的增益晶体。

[0047] 在一些实现中，激光引擎在小于60秒、1秒或10μs的时间内在第一重复率和第二重复率之间进行切换。

[0048] 在一些实现中，激光引擎包括：输出飞秒种子脉冲的振荡器；展宽种子脉冲持续时间的展宽器；将展宽的种子脉冲放大成放大的展宽脉冲的放大器，放大器包括色散补偿器以补偿由放大器的光学元件引起的放大的展宽脉冲的色散；以及压缩器，该压缩器接收放大的展宽脉冲，压缩放大的展宽脉冲的持续时间，并输出飞秒脉冲激光束。

[0049] 在一些实现中，可变重复率激光引擎包括Q开关腔倒空再生放大器；该放大器包括两个端镜，其中激光引擎输出飞秒激光脉冲；而端镜之间的光路长度小于2米。

[0050] 在一些实现中，端镜之间的光路的长度小于1米。

[0051] 在一些实现中，激光引擎包括生成种子脉冲以传送至放大器的振荡器，其中从振荡器中生成种子脉冲光子之处到激光引擎输出激光脉冲之处的总自由空间光路长度小于500米、300米或150米。

[0052] 在一些实现中，放大器的腔的所有边缘尺寸小于1米或0.5米，其中放大器的腔容纳放大器的所有光学元件。

[0053] 在一些实现中，放大器的占地面积小于$1m^2$或$0.5m^2$。

[0054] 在一些实现中，激光引擎包括展宽器-压缩器，该展宽器-压缩器包括啁啾体布拉格光栅。

[0055] 在一些实施例中，放大器包括色散补偿器，其补偿由放大器的光学元件引入的色散。

[0056] 在一些实现中，放大器包括：放大激光脉冲的幅度的激光晶体；以及在放大器内折叠谐振光路的两个折叠反射镜，其中两个端镜和两个折叠反射镜中的至少一个是啁啾反射镜。

[0057] 在一些实现中，激光引擎被配置为以激光引擎的所有光学元件的基本上相同的设置输出具有处于重复率范围内的第一重复率的激光束，并在随后输出具有处于该重复率范围内的第二重复率的激光束。

[0058] 在一些实现中，第一重复率和第二重复率在10kHz-2MHz、50kHz-1MHz或100kHz-500kHz的范围中。

[0059] 在一些实现中，激光引擎被配置为使得可在小于60秒、1秒或10μs的时间内将第一重复率改变至第二重复率。

[0060] 在一些实现中，放大器包括位于端镜之间的可切换偏振器，其在小于5ns、4ns或3ns的时间内在可切换偏振器调节放大脉冲的偏振的状态与可切换偏振器基本上不调节放大脉冲的偏振的状态之间进行切换。

[0061] 在一些实现中，放大器包括至少一个聚焦端镜和紧靠聚焦端镜的焦点设置的激光晶体。

[0062] 在一些实现中，激光引擎包括：生成并输出飞秒种子脉冲光束的振荡器；展宽种子脉冲的持续时间的展宽器-压缩器；以及从展宽器-压缩器接收展宽的种子脉冲、放大所选的展宽种子脉冲的幅度以创建放大的展宽脉冲并且输出放大的展宽脉冲的激光束的放大器；其中展宽器-压缩器接收放大的展宽脉冲的激光束，压缩放大的展宽脉冲的持续时间，并且输出脉冲持续时间小于1000飞秒的飞秒脉冲激光束；其中从振荡器中生成种子脉冲光

子之处到激光引擎输出激光脉冲之处的光路长度小于500米。

[0063] 在一些实现中，光路长度小于300米。

[0064] 在一些实现中，可变重复率激光引擎包括：生成和输出飞秒种子脉冲光束的振荡器；展宽种子脉冲持续时间的展宽器-压缩器；以及放大所选的展宽的种子脉冲的幅度以创建放大的展宽脉冲的啁啾脉冲放大器；其中该放大器包括切换时间小于5ns的可切换偏振器；展宽器-压缩器压缩放大的展宽脉冲的持续时间至飞秒值；并且激光引擎占据小于$1m^2$的面积。

[0065] 在一些实现中，激光引擎是手术激光系统的一部分，手术激光系统具有激光引擎以及位于手术激光系统的顶板上的成像系统。

[0066] 在一些实现中，可变重复率激光引擎包括：生成和输出飞秒种子脉冲光束的振荡器，展宽种子脉冲的持续时间的集成的展宽器-压缩器，以及放大所选的展宽的种子脉冲的幅度以创建放大的展宽脉冲的Q开关腔倒空再生放大器；其中展宽器-压缩器压缩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数量小于75。

[0067] 在一些实现中，激光引擎的光学元件数量小于50。

[0068] 在一些实现中，激光引擎除振荡器之外的部分中的光学元件数量小于50。

[0069] 在一些实现中，激光引擎除振荡器之外的部分中的光学元件数量小于35。

[0070] 在一些实现中，光学元件是下列之一：反射镜、透镜、平行板、偏振器、隔离器、任何可切换光学元件、折射元件、透射元件、或反射元件。

[0071] 在一些实现中，光学元件使光从空气中进入并且出射至空气中。

[0072] 在一些实现中，集成的展宽器-压缩器包括啁啾体布拉格光栅。

[0073] 在一些实施例中，放大器包括色散补偿器，其补偿由放大器的光学元件引入的色散。

[0074] 在一些实现中，放大器包括限定谐振腔的两个端镜，以及在放大器中折叠谐振光路的两个折叠反射镜，其中两个端镜和两个折叠反射镜中的至少一个是啁啾反射镜。

[0075] 在一些实现中，激光引擎被配置为以激光引擎的所有光学元件的基本上相同的设置输出第一重复率在重复率范围内的激光束且随后输出第二重复率在该重复率范围内的激光束，其中第一和第二重复率在10kHZ-2MHz、50kHz-1MHz或100kHz-500kHz的范围内。

[0076] 在一些实现中，激光引擎被配置为使得第一重复率可在小于1秒的时间内改变至第二重复率。

[0077] 在一些实现中，放大器包括位于端镜之间的可切换偏振器，其可在小于5ns、4ns或3ns的时间内在可切换偏振器调节放大的展宽脉冲的偏振的状态与可切换偏振器基本上不调节放大的展宽脉冲的偏振的状态之间进行切换。

[0078] 在一些实现中，放大器包括至少一个聚焦反射镜和紧靠聚焦反射镜的焦点设置的激光晶体。

[0079] 在一些实现中，激光引擎包括：生成和输出飞秒种子脉冲光束的振荡器；展宽种子脉冲的持续时间的展宽器-压缩器；以及从展宽器-压缩器接收展宽的种子脉冲、放大所选的展宽的种子脉冲的幅度以创建放大的展宽脉冲并且输出放大的展宽脉冲的放大器；其中展宽器-压缩器接收放大的展宽脉冲，压缩放大的展宽脉冲的持续时间，并且输出脉冲持续时间小于1000飞秒的飞秒脉冲激光束，其中激光引擎中除振荡器之外的部分中的光学元件

的数量小于50。

[0080] 在一些实现中，激光引擎的光学元件数量小于75。

[0081] 在一些实现中，一种使用激光系统进行扫描的方法包括如下步骤：使用激光引擎生成具有可变重复率的激光脉冲；使用扫描激光传递系统将激光脉冲聚焦至靶区域中的焦斑；使用扫描激光传递系统在靶区域中以扫描速度扫描焦斑；改变扫描速度；以及使用重复率控制器根据改变的扫描速度调节重复率。

[0082] 在一些实现中，生成步骤包括：由振荡器生成飞秒种子脉冲；由展宽器-压缩器展宽种子脉冲；由放大器将所选的展宽的种子脉冲放大成放大的展宽脉冲；以及由展宽器-压缩器将放大的展宽脉冲压缩成飞秒激光脉冲。

[0083] 在一些实现中，该方法包括调节重复率以将靶区域中由激光生成的泡的密度近似维持在选定值附近。

[0084] 在一些实现中，泡的密度是线密度、面积密度或体积密度。

[0085] 在一些实现中，调节重复率的步骤包括与扫描速度成比例地调节重复率。

[0086] 在一些实现中，调节重复率的步骤包括在1微秒-1秒的时间范围内将重复率从第一值调节为第二值。

[0087] 在一些实现中，扫描焦斑的步骤包括沿着最小加速路径扫描焦斑。

[0088] 在一些实现中，该方法包括沿着之字形路径对焦斑进行XY扫描，以及当靠近路径的折回部分时减慢重复率。

[0089] 在一些实现中，该方法包括沿着螺旋形扫描激光束，并且当扫描靠近螺旋形的中心时减慢重复率。

[0090] 在一些实现中，调节重复率包括：通过如下二者之一而由重复率控制器接收关于改变的扫描速度的信息：感测正在改变的扫描速度，以及从处理器或存储器获得关于正在改变的扫描速度的电子信息；以及，根据接收到的关于已改变的扫描速度的信息调节重复率。

[0091] 在一些实现中，可变重复率激光扫描系统包括：生成和输出飞秒种子脉冲光束的振荡器；展宽种子脉冲的持续时间、从放大器接收放大的展宽脉冲、压缩放大的展宽脉冲的持续时间、以及输出具有重复率的飞秒脉冲激光束的展宽器-压缩器；从展宽器-压缩器接收展宽的种子脉冲、放大所选的展宽的种子脉冲的幅度以创建放大的展宽脉冲并且向展宽器-压缩器输出放大的展宽脉冲的放大器；以及以可变扫描速度在靶区域中扫描激光束的焦斑以生成光致破裂斑的扫描光学器件；其中激光扫描系统改变重复率以创建具有预定密度分布的光致破裂斑。

[0092] 在一些实现中，放大器包括降低放大的展宽脉冲的色散的色散补偿器。

[0093] 在一些实现中，放大器包括可切换偏振器，其旋转放大器中的展宽脉冲的偏振面，其中可切换偏振器的上升时间小于5ns、4ns或3ns。

[0094] 在一些实现中，激光扫描系统包括控制电子器件，其向可切换偏振器施加控制信号以使得可切换偏振器以小于5ns、4ns或3ns的上升时间进行切换。

[0095] 在一些实现中，一种使用激光引擎进行扫描的方法包括如下步骤：生成具有重复率的飞秒激光脉冲；将激光脉冲聚焦在靶区域中的焦斑以生成光致破裂斑；在靶区域中以扫描速度扫描焦斑，以及在扫描期间调节重复率以创建具有密度分布的光致破裂斑。

[0096] 在一些实现中，调节步骤包括创建具有在靶区域中基本上保持均匀的线斑密度、面积斑密度或体积斑密度的光致破裂斑。

[0097] 在一些实现中，调节步骤包括根据扫描速度的变化调节重复率。

[0098] 在一些实现中，调节步骤包括与扫描速度成比例地调节重复率。

[0099] 在一些实现中，调节重复率的步骤包括在1微秒-1秒的时间范围内将重复率从第一值调节为第二值。

[0100] 在一些实现中，生成步骤包括：由振荡器生成飞秒种子脉冲；由展宽器-压缩器展宽种子脉冲；由放大器将所选的展宽的种子脉冲放大成放大的展宽脉冲；以及由展宽器-压缩器将放大的展宽脉冲压缩成飞秒激光脉冲。

[0101] 在一些实现中，扫描焦斑的步骤包括沿着最小加速路径扫描焦斑。

[0102] 在一些实现中，该方法包括沿着之字形路径扫描焦斑，以及当靠近路径的折回部分时减慢重复率。

[0103] 在一些实现中，该方法包括沿着螺旋形扫描激光束，并且根据扫描靠近螺旋形的中心而减慢重复率。

[0104] 在一些实现中，该方法包括沿着线的端部或线的转角扫描激光束；以及根据扫描靠近该线的端部或该线的转角而减慢重复率。

[0105] 在一些实现中，该方法包括接收存储的或感测的关于扫描速度的信息，并且根据接收到的关于扫描速度的信息调节重复率。

[0106] 在一些实现中，该方法包括接收感测的或成像的关于靶区域的信息，并且根据接收到的关于靶区域的信息调节重复率。

[0107] 在一些实现中，激光引擎能够包括输出飞秒种子光脉冲的振荡器，以及放大种子光脉冲以产生放大的光脉冲的放大器。该放大器包括耦合以接收和循环种子光脉冲的光腔，以及耦合至光腔以控制接收到的种子光脉冲的光耦合到光腔中并且控制光腔内的光耦合出去以作为放大器的输出光的光学开关设备。光学开关设备被配置为控制并调节在光腔内耦合的光的往返次数，并且调节放大器产生的放大的光脉冲的脉冲重复率。放大器还包括光腔内的用于将种子光脉冲放大成放大的光脉冲的光学增益介质，以及光腔内的用于补偿由放大器引起的放大的光脉冲的色散的色散补偿器。激光引擎包括放大器外部的一个或多个光学元件，以在将每个种子光脉冲耦合进放大器之前展宽种子光脉冲的持续时间，并且压缩由放大器输出的放大的光脉冲的持续时间以产生放大的光脉冲。该激光引擎能被配置为没有位于放大器外部的用于补偿放大器引起的放大的光学脉冲的色散的色散补偿设备。

[0108] 在另一些实施例中，一种用于操作激光引擎以产生飞秒光脉冲的方法可包括：展宽飞秒种子光脉冲以产生展宽的种子光脉冲，其中每个脉冲具有减小的光功率；以及将展宽的种子光脉冲耦合进入光学放大器的光腔内以放大每个展宽的种子光脉冲的光功率，从而产生放大的展宽光脉冲。在光学放大器内，使用光学补偿器向每个光脉冲提供色散补偿，其中光学补偿器被构建为引入色散，该引入的色散与除了色散补偿器引起的色散之外的、在放大器的光腔内的一次光往返中由放大器引起的色散的符号相反且幅度基本相等。该方法包括操作耦合至光腔的光学开关设备以控制将展宽的种子光脉冲的光耦合到光腔内以及将放大的展宽光脉冲的光耦合出光腔；压缩离开光腔的放大的展宽光脉冲的脉冲持续时

间以产生压缩的放大光脉冲作为激光引擎的输出;并且操作光学开关设备以控制并调节光腔内的光往返次数,由此控制并调节压缩的放大光脉冲的脉冲重复率,而不使用位于放大器之外的色散补偿设备来补偿由放大器引起的色散。

附图说明

[0109] 图1A-B例示了高功率飞秒激光引擎1的两个实施例。

[0110] 图2更详细地例示了高功率飞秒激光引擎的一个实施例。

[0111] 图3A例示了对激光脉冲进行啁啾的概念。

[0112] 图3B例示了展宽器200'和压缩器400的例子。

[0113] 图3C例示了集成的展宽器-压缩器200的实现。

[0114] 图4例示了放大器300的实施例。

[0115] 图5A-B例示了激光腔的泵浦-增益-倒空循环。

[0116] 图6A-D例示了具有恒定和可变重复率的扫描手术图案。

[0117] 图7A-B例示了有关在放大器300中的激光晶体310的两个不同温度下的热透镜效应的设计挑战。

[0118] 图7C-D例示了具有降低的热透镜效应的放大器300的两个实现。

[0119] 图8例示了光束光功率作为工作温度的函数的关系曲线。

具体实施方式

[0120] 在早期的飞秒激光器中,极短的脉冲长度导致了这些脉冲的极高功率。然而,该高功率可能损伤激光器的增益介质。该问题通过啁啾脉冲放大(CPA)而得以解决。在该技术中,生成飞秒种子脉冲,并在随后将种子脉冲的长度展宽10-1000倍而至皮秒范围,因而大幅降低脉冲功率。这些展宽的脉冲能够使用增益介质被安全地放大,而不引起损害。放大之后进行压缩,将放大后的脉冲的长度压缩回飞秒。目前,已经将该CPA方法引入大量应用中。

[0121] 然而,CPA激光器也具有缺点。典型地,这些激光器具有大量光学元件,并且因此非常复杂。这些因素使得故障频率非常高,并且减少了激光器能被可靠地开关的次数。同样地,CPA激光器非常大的尺寸使得将它们集成在医学设备内变得非常具有挑战性,因为它们典型地被用于外科套房或手术室的有限空间内。而且,如果不同的手术程序需要改变脉冲的重复率,那么该改变需要执行耗时的大量光学元件的重新调节。此外,热透镜效应大大影响了大部分CPA激光器的光学性能,使得它们对于激光器的工作功率非常敏感。该敏感性是对重复率改变的又一障碍。

[0122] 本文所述的用于构造和操作飞秒脉冲激光器的激光器设计和技术还可以用于解决其他飞秒脉冲激光器中的各种技术问题。

[0123] 图1A例示了啁啾脉冲放大(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。

[0124] 振荡器100能够生成并输出飞秒种子脉冲的光束。展宽器-压缩器200能够展宽这些种子脉冲的持续时间。放大器300能够接收来自展宽器-压缩器200的展宽的种子脉冲,放大展宽的脉冲的幅度,并且输出放大的展宽脉冲的激光束。这些放大的展宽脉冲能够光学地耦合回到展宽器-压缩器200中,后者能够压缩放大的展宽脉冲的持续时间,并且输出飞

秒脉冲的激光束。

[0125] 图1B例示了另一CPA激光引擎1'的例子，其中光学振荡器100'和光脉冲展宽器200'下游的光学放大器300'能够将放大的展宽脉冲光学地耦合至单独的压缩器400，后者能够压缩放大的展宽脉冲并且输出飞秒脉冲的激光束。

[0126] 激光引擎1和1'的描述包括许多控制功能和方法步骤。这些功能和步骤可以受控于一个或多个控制器、处理器和其他计算机控制器。这些控制器、处理器和计算机控制器可以利用彼此交互的先进软件。为了清楚陈述，这些处理器、控制器及其相应软件未在本专利文件的附图中示出，但是在一些实现中旨在作为激光引擎1和1'的描述的一部分。

[0127] 虽然将根据眼科应用(诸如白内障手术、晶状体切开术或角膜手术程序)描述本申请中的若干例子，但能够在相当宽范围的应用中使用激光引擎1的各实现，所述应用包括各种各样的眼科手术程序，诸如视网膜和角膜手术，以及皮肤病和牙科应用、不同的外科应用、以及使用激光光致破裂或一些其他激光协助的处理而成形材料件的各种材料加工应用。

[0128] 如上所述，一些啁啾脉冲放大CPA/CDRA激光引擎具有各种缺点。激光引擎1的实施例能够被配置为通过采用一些或所有下列设计原理以及其他设计考虑而提供针对这些问题的解决方案：

[0129] (1)许多激光器具有大量光学元件，诸如一百个或更多，这使得它们的设计复杂和昂贵。在本文中，激光引擎1的实施例可以具有总共少至50个光学元件，并且在振荡器100外不多于35个光学元件。

[0130] (2)具有大量光学元件以及相应复杂性的激光器可能具有高故障频率。在一些CPA/CDRA激光器中，故障概率可能在激光器“循环”(即开关30-40次)之后变得相当高。这类系统在30-40次开关循环之后可能需要预防性维护，或者需要更为经常地进行该维护，以防止在激光器的常规工作期间发生实际故障。

[0131] 在本文中，由于大量减少的光学元件数量以及新颖的色散控制方法，对于预期的常规工作，激光引擎1的实施例可以循环100、120或更多次，因而大幅降低需要维修的频率并且增加了总体可靠性。

[0132] (3)一些CPA/CDRA的大物理延伸区和相应的长的往返持续时间将转换成长的充能(recharge)时间，如后面所述的，因而限制了其重复率，以及其用于空间受限的手术设备中的可用性。

[0133] 本文中，激光引擎1的实施例能够具有紧凑的谐振腔，其端镜至端镜光路在一些实施例中能够小于1米，在其他实施例中则能小于两米。紧凑性也是有助于激光引擎1的能够高达300、500或者甚至1000kHz的高重复率的一个因素。

[0134] 上述紧凑性能够转换成测得的从生成光子的点到出射点并且包括腔内所有往返的总光路，其可以不考虑这些激光器的高重复率而低至150米。

[0135] (4)一些CPA/CDRA激光器被精细调整而以特定重复率工作。该调整可以包括由压缩器200/400补偿展宽器200和放大器300在特定重复率下的色散。然而，如果一个应用要求改变重复率，展宽器和放大器在该新重复率下会引起不同的色散，从而扰乱CPA/CDRA激光器的精细调整的色散补偿。为了补偿该改变的色散，典型地，展宽器200和压缩器200/400的光学元件需要通过耗时的程序来重新调节。该重新调节使得技术上不便于在眼科手术程序

的时标上改变这些CPA/CDRA激光器的重复率。因而，大部分商业眼科CPA激光器不提供可变重复率的功能，并且在手术过程中都不提供可改变的重复率。

[0136] 本文中，激光引擎1的实施例可包括色散控制器或色散补偿器，其能够减少或甚至最小化放大器300所引起的激光束的色散。色散的这一最小化允许改变重复率，而无需耗时地重新调节激光引擎1的光学元件。因而，包含色散控制器使得可以在对时间敏感的手术过程中改变重复率。一个例子是对于白内障手术使用第一重复率，而对于晶状体切开术或角膜手术程序使用第二重复率。正如所周知的，在这些手术中，时间因素是非常关键的。

[0137] (5)在一些情况下，在手术程序中，当激光束具有固定的重复率时，切割图案可被用来以不均匀的密度布置激光斑。例子包括在扫描栅格或扫描图案的转折点周围减慢扫描速度，或者以缩窄或增宽的螺旋来减慢扫描速度或扫描图案。

[0138] 在本文中，激光引擎1的实施例可被配置为具有基本上连续可调节的重复率，并且与正在改变的扫描速度近似同步地调节重复率，以补偿扫描速度的变化，从而允许以近似恒定的密度或者以预定的密度分布形成激光斑。

[0139] (6)此外，热透镜效应负面地影响一些CPA/CDRA激光器的光学性能，并且使得它们对于激光束的功率和重复率的改变非期望地敏感。本文中，激光引擎1的实施例能够利用热透镜效应补偿技术，使得这些实施例对于所应用的激光束的功率和重复率的改变相当不敏感。

[0140] 图2详细地例示了激光引擎1的一种特定实现。振荡器100可以是各种各样的光源，其能为激光引擎1生成并输出种子脉冲。例子包括二极管泵浦的光纤振荡器。振荡器可以包括单个二极管，例如在808nm波长工作的GaAs二极管，或者各种各样的其他二极管。

[0141] 光纤振荡器显著小于基于自由空间光束传播的振荡器。在手术应用中，手术室的拥挤度是紧迫的约束，因此减小激光引擎的空间延伸区是很有价值的设计特征。

[0142] 在一些例子中，振荡器输出高质量种子脉冲。如下详细所述，若干因素能有助于实现高脉冲质量。

[0143] (i)在一些实施例中，二极管可包括频率稳定条，诸如二极管内的体布拉格光栅。这种光栅可以提供具有低噪声和高脉冲至脉冲稳定性的脉冲。光纤可以由掺杂有Nd或Yb的玻璃形成。

[0144] (ii)振荡器100可包括半导体可饱和吸收镜，或SESAM。利用一个或多个SESAM改进了所生成的脉冲的模式的相干性，由此得到基本上锁模的工作。

[0145] 具有上述设计原理的振荡器能够输出基本上变换限制的种子脉冲，例如，具有高斯形状。在一些例子中，还可以生成平顶脉冲。这些脉冲持续时间可以小于1000飞秒(fs)。在一些实现中，脉冲持续时间可处于50-1000飞秒范围内，在一些其他实施例中则处于100-500飞秒范围内。该种子脉冲频率或重复率可处于10-100MHz的范围内，在其他实施例中则处于20-50MHz的范围内。然而将种子脉冲频率降至10或20MHz以下会产生一系列设计挑战。出于该理由，大部分振荡器以高于20MHz的频率工作。

[0146] 该种子脉冲的光束功率可处于10-1000mW的范围内，在其他实施例中则处于100-200mW的范围内。

[0147] 出于许多定时考虑，振荡器100可用作主时钟。

[0148] 展宽器-压缩器200可通过对于脉冲的不同频率成分引入不同的延迟时间来展宽

种子脉冲。简言之，展宽器-压缩器能够引入色散或啁啾。

[0149] 图3A详细例示了这一啁啾。展宽器-压缩器200可以接收短脉冲，其频率组成或频谱在脉冲的大部分持续时间上近似均匀或“白色”。换句话说，在脉冲开始处，不同频率成分的幅度近似均匀，并且在脉冲的持续间隔内保持如此。展宽器-压缩器200可以通过对这种“白色”脉冲的红色、绿色和蓝色成分引入不同的延迟时间而展宽脉冲长度。因而，由展宽器-压缩器200输出的脉冲的频率组成或频谱可变为与时间相关。根据典型惯例，前沿部分以红色频率为主而后沿部分以蓝色频率为主的脉冲被称为具有正色散或啁啾。

[0150] 本说明书涉及时域中的啁啾，即，高和低频率成分的相对延迟。空间啁啾(即光束内高低频率成分的空间分离)则提出了各种附加的设计挑战，并且不在展宽器200’或展宽器-压缩器200的期望功能中。

[0151] 展宽器-压缩器200或展宽器200’可以通过增强脉冲前沿部分中的红色成分并增强脉冲后沿部分中的蓝色成分而将正啁啾引入初始白色种子脉冲中。类似地，也可以由展宽器-压缩器200或展宽器200’来对非白色脉冲进行啁啾。

[0152] 展宽器-压缩器200可以将飞秒种子脉冲的持续时间从50-1000飞秒的范围展宽至1000-200000飞秒或者1-200皮秒或者甚至高达500ps的展宽的持续时间。展宽器-压缩器200能够将飞秒种子脉冲的持续时间展宽10倍以上。在一些情况下，展宽因子可以大于10^2、10^3、10^4或10^5。这些展宽因子各自为放大器300引入不同的设计规则。

[0153] 图3B例示了图1B中所示类型的激光引擎1’能够利用展宽器200’和分开的压缩器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可以将不同频率成分折射到不同方向。在离开第一光栅201后，发散的光线可以传播至透镜202，并被重定向至第二光栅203。一些实施例可以使用两个透镜代替透镜202。由于第二光栅203与第一光栅201呈一定角度并且不同频率的光线在各发散方向上传播，因此不同的频率成分行进不同距离，并且需要不同的时间实现这一行进。

[0154] 例如，在图3B的展宽器200’中，频率在频谱蓝色区域中的成分的行进距离比红色区域中的成分更长，因此相对于入射短脉冲的红色成分具有延迟。此处和全文中，以说明性和相对方式使用术语“蓝色”和“红色”。它们分别指的是脉冲频谱中具有较短和较长波长的成分。在特定实现中，激光平均波长可以是1000-1100nm，并且脉冲的带宽能够处于2-50nm的范围中，在一些情况下则处于5-20nm的范围中。在该例子中，脉冲的整个频谱位于红外区域中。在该例子中，术语“蓝色”和“红色”指的是在脉冲带宽内分别具有较短和较长波长的红外光谱部分。

[0155] 第二光栅203的功能包括啁啾的局部控制，即蓝色成分相对于红色成分的延迟，以及将光束恢复成基本上平行的光束，以使其适于由反射镜204反射。反射镜204反射频率分开的平行光线，这些光线于是折回它们的光路通过第二光栅203、透镜202和第一光栅201。到脉冲离开第一光栅201时，脉冲的蓝色成分行进的距离显著较长，并且因而落后于红色成分。

[0156] 该延迟对于输出的脉冲具有至少三个效果：(i)脉冲长度变得显著更长，(ii)不同的频率成分的幅度在时间上相对于彼此移位，将红色成分移至脉冲的前沿，而蓝色成分则移至后沿，或者反之，(iii)脉冲的总能量在更长的脉冲长度上分布，降低了输出脉冲的光

功率。在一些情况下，脉冲持续时间可被展宽100、1000或更多倍，功率可相应地降低至百分之一、千分之一甚至更小。总而言之，展宽器-压缩器200或展宽器200'能够展宽脉冲、引入正啁啾并且由此大幅降低脉冲功率。

[0157] 如前述，降低脉冲的峰值功率是CPA/CDRA激光器的有利方面，因为随后的放大器300的腔光学元件不会暴露至过高功率的脉冲，并由此避免因光束而遭受损伤。

[0158] 图3B还例示了压缩器400的例子，其可包括第三光栅205、第四光栅207和反射镜208。一些例子在这些光栅之间不具有透镜，而其他例子则可具有一个或两个透镜。类似于展宽器200'的第一光栅201，第三光栅205再次将脉冲频谱的不同成分定向至不同方向。类似于第二光栅203，第四光栅207同样通过其朝向来局部控制蓝色和红色成分的相对延迟。然而，由于第四光栅207现在被定向为与第二光栅203相反，因此现在蓝色成分的光路更短，引起负啁啾。该负色散允许展宽的脉冲的蓝色成分赶上红色成分，将放大的展宽脉冲的总持续时间从数百皮秒缩短至数百飞秒。分开的展宽器200'和压缩器400的设计是图1B的激光引擎1'的实施例。

[0159] 图3B还例示了具有分开的展宽器200'和压缩器400的图1B的设计的两个敏感方面。

[0160] (i)首先，展宽器200'、放大器300和压缩器400需要相对于彼此精细地调整，使得压缩器400能够以高精确性撤销由展宽器200'引起的展宽以及随后由放大器300引起的色散。因而，设置透镜202的位置以及第一至第四光栅201-207的朝向可能需要尤其高的精确性，以补偿放大的展宽脉冲的色散，并且将其压缩回飞秒脉冲。而且当然地，高精确性调节对于干扰非常敏感：温度、往返次数和机械应力的小改变都能破坏该精确性调节，由此需要维护和重新校准具有图1B结构的激光引擎1'。

[0161] (ii)在一些复杂或多步骤程序中，可能期望改变重复率。然而，重复率的这种改变典型地伴随有往返次数的改变，以优化输出的脉冲。依次地，往返次数的改变往往导致热透镜效应以及放大器300引起的混合色散的改变。因而，重复率和往返次数的改变会扰乱展宽、色散和压缩的经仔细校准的平衡。

[0162] 为了抵消这些改变，如图3B的箭头所示，可以通过改变透镜202的位置、光栅201、203、205和207中的一些的位置或朝向、反射镜204和208的位置，或者通过移动一个或多个反射镜而改变光束入射到透镜202上的位置，而重新校准激光引擎1'的一些实现。无需言明，这些改变典型地需要谨慎并且往往反复的机械调节和精确性校准，所有这些都是耗时的介入。

[0163] 重新校准的缓慢可能向期望脉冲重复率及时改变的应用提出了问题。这在时间是关键性因素的应用中(例如，在患者控制眼睛移动的能力可能低至90秒的眼科手术应用期间)会特别成问题。鉴于所有这些理由，大部分激光引擎不提供可改变的重复率的功能。

[0164] 此外，由于在激光引擎1'中，展宽器200'与压缩器400分开，并且两者均包括多个光栅和透镜，因此图1B中类型的激光引擎1'的展宽器和压缩器的空间延伸区典型地非常占用空间。

[0165] 为了减少展宽器200'和压缩器400的空间占地面积并且减少校准次数，在激光引擎1'的一些实现中，展宽器200'和压缩器400能够共享一个或多个光学元件。在一些情况下，它们能够共享光栅，诸如第一光栅201和第三光栅205可以是同一个。

[0166] 在一些多次折叠的例子中，展宽器200’的两个光栅可以是同一个物理光栅，在不同的通过期间，透镜和反射镜引导同一光栅上的来自不同方向的波束。在一些多次折叠的例子中，展宽器200的两个光栅以及压缩器400的两个光栅的所有功能可以由单个共享的光栅执行。

[0167] 图3C例示了图1A实施例的展宽器-压缩器200的例子，其提供了对这些挑战的鲁棒的解决方法。图3C的展宽器-压缩器200集成了展宽和压缩功能，并且因而其可在图1A的激光引擎1的实施例中采用。如图3C中示例所实施的该展宽器-压缩器200是啁啾体布拉格光栅(CVBG)。该CVBG例如可以是在光热折射(PTR)玻璃中的叠层，各个层具有合适的折射率以及随着层位置改变的光栅周期。在这种设计中，对于脉冲的不同频谱成分，布拉格谐振条件出现在不同的位置。于是，不同的频谱成分在不同的位置处被反射，由此在脉冲中获得不同的时间延迟。

[0168] 如图3C中的例子所示，当短“白色”脉冲211进入展宽器-压缩器200时，红色频率成分从具有较宽的层间隔或光栅周期的近区域折射，因为其波长更长并且满足这些近区域中的布拉格反射条件。相反地，具有较短波长的蓝色频率成分从光栅的更远区域返回。由于蓝色成分经过更长的光路，因此它们相对于红色成分获得延迟。于是，输入的短白色脉冲211由该CVBG展宽器-压缩器200展宽成更长的展宽的脉冲212。在该特定示例中，由于蓝色成分相对于红色成分延迟，因此展宽的脉冲212演变出正啁啾。其他实施方式则可以具有产生负啁啾的CVBG，相对于蓝色光谱成分延迟红色光谱成分。

[0169] 该CVBG展宽器-压缩器200还能够以高精确性压缩放大的展宽脉冲213，而无需任何麻烦的精细调整，因为展宽的脉冲在由放大器300放大之后从相对端或压缩器端口注入同一CVBG展宽器-压缩器200中。当展宽的脉冲从相对端进入CVBG展宽器-压缩器200中时，其红色成分的延迟程度与蓝色成分在展宽步骤中的延迟程度相同，因此脉冲的原始短长度得以恢复。因而，该展宽器-压缩器200能够非常有效地补偿在展宽期间引入的色散，并且输出适当压缩的放大脉冲214。

[0170] 与具有分开的展宽器200’和压缩器400的激光引擎1’的特定方面相比，(i)激光引擎1对移动的光学元件的精确对齐并非高度敏感，因为其没有移动的光学元件，并因此表现出对机械扰动或工作温度改变的显著鲁棒性，以及(ii)由于放大器300的新颖设计不会引起与往返次数相关的附加色散，如参考公式(1)-(2)和图5A-B进一步所述，因此当重复率改变时，激光引擎1不需要其光学元件和设置的敏感的重新校准和重新对齐。这些属性允许在其中快速或及时改变重复率非常重要的应用中使用激光引擎1。

[0171] 在与上述不同的其他设计中，放大器300可能引入附加色散。在这些设计中，展宽器-压缩器200的集成结构可以补充有重新调节功能，因为压缩器需要不仅压缩展宽器的色散，还需压缩放大器300的附加色散。该附加的任务可能需要实施与压缩器功能相关的可调整模块。

[0172] 返回图2，激光引擎1还可包括有效的偏振分束器150。分束器150可以包括位于振荡器100和展宽器-压缩器200之间的偏振器和λ/4片。在其他实施例中，分束器150可以是薄膜偏振器。该组合150能使得种子脉冲从振荡器100通过以到达展宽器-压缩器200，而将从展宽器-压缩器200返回的展宽脉冲重定向到放大器300，因为在两次通过之后，λ/4片将脉冲光束的偏振面旋转了90度。偏振器在对于种子脉冲的偏振方向呈现透射性的同时，对于

第二次穿过λ/4片后的展宽脉冲的经90度旋转的偏振面呈现反射性。

[0173] 在一些实施例中，激光引擎1可包括位于分束器150和放大器300之间的光路中的法拉第隔离器500。法拉第隔离器500的功能可以包括将振荡器100与放大的光束相隔离，从而防止激光束的高功率对振荡器100的损害。这类法拉第隔离器500能够接收来自分束器150的展宽的种子脉冲，将展宽的种子脉冲朝向放大器300传送，接收来自放大器300的放大的展宽脉冲的激光束，并且通过偏振器550和560向展宽器-压缩器200输出放大的展宽脉冲的激光束。

[0174] 法拉第隔离器500在其中放大器300通过接收脉冲的同一光路输出放大的脉冲的实施例中会是有用的，因为简单的重定向光学器件可能会由于放大的脉冲常常具有数百或者甚至数千倍于种子脉冲的功率或强度而不适用于隔离功能。即使简单的重定向光学器件仅允许这些放大脉冲的一部分通过，这些透射的脉冲仍然强到足以损害振荡器100。

[0175] 在一些实施例中，法拉第隔离器500可被配置为允许来自放大器300的激光束的小于1/10000的部分通过而朝向振荡器100。在衰减方面也能得到相同的隔离功能：法拉第隔离器能够以例如40dB或者在一些实施方式中以50dB来衰减放大的激光束。

[0176] 法拉第隔离器或依赖于偏振的隔离器可以包括三个部分：垂直偏振的输入偏振器、法拉第旋转器、以及45度偏振的输出偏振器或分析器。

[0177] 前向行进的光如果不是已在例如垂直方向上偏振，则其被输入偏振器使得在垂直方向上偏振。(此处，偏振面指的是电场矢量所在的平面。而且，“垂直”仅建立了常规或参考平面。在各种实施例中，实际偏振面可被定向到其他特定方向。)法拉第旋转器将光束的偏振面旋转约45度，使其与分析器的偏振面对齐，所述分析器随后则使光透过而不施以附加的偏振面旋转。

[0178] 后向行进的光(诸如从放大器300返回的放大脉冲)在从分析器出射之后变得相对于参考垂直平面以45度偏振。法拉第旋转器再次将偏振旋转约45度。因而，法拉第旋转器输出的朝向输入偏振器的光为水平偏振。由于输入偏振器是垂直偏振的，因此水平偏振的光将由输入偏振器近乎完全地反射，而非将其透射至振荡器100。因而，法拉第隔离器500能够高效地保护振荡器100免于高能放大激光脉冲。

[0179] 法拉第旋转器典型地通过生成指向光轴方向的磁场而实现其功能。一些法拉第旋转器包括永磁体以实现该功能。

[0180] 法拉第旋转器中使用的光学材料典型地具有高维尔德常数、低吸收系数、低非线性折射率和高损伤阈值。同样地，为了防止自聚焦和其他热相关效应，光路典型地较短。700-1100纳米范围的两种最常用材料是掺铽的硼硅酸盐玻璃和铽镓石榴石晶体(TGG)。

[0181] 对于放大器300并不经由与脉冲进入相同的光路输出放大脉冲的激光引擎1或1’的实施例，可能不需要采用法拉第隔离器500。

[0182] 图2和4例示了从法拉第隔离器500透射的光可以进入放大器300。放大器300可以包括放大展宽的种子脉冲的激光晶体或者增益介质310，由此在端镜321和322之间形成往返。一些放大器300可以包括折叠光路(或者“z腔”)，其使用折叠反射镜重定向激光束，以缩短谐振腔的空间延伸区。图4中的放大器300具有四个反射镜：限定谐振腔的两个端镜321和322，以及两个折叠反射镜323和324。在一些例子中，光路甚至可以原路折叠，呈现为交叉图案。虽然更多折叠反射镜的使用能够通过将光路折叠在更紧凑的空间中而更进一步缩减放

大器300的尺寸，但是额外的反射镜增加了未对准的可能性和价格。

[0183] 除了激光晶体310和反射镜321-324之外，放大器300还可包括可切换偏振器330，其控制品质因数Q并由此控制放大器300的放大功能，以及控制用作脉冲在腔内的输入/输出端口的薄膜偏振器340。该薄膜偏振器340是偏振选择器件的一个具体实例，其反射具有第一预定偏振的光，同时透射具有正交于第一预定偏振的第二偏振的光。可切换偏振器330可以是偏振器件，其在当其不旋转通过其的光的偏振时的第一工作状态和当其响应于施加于其上的控制信号而旋转光的偏振时的第二工作状态之间切换。薄膜偏振器340和可切换偏振器330的组合能被用于在来自法拉第旋转器500的脉冲耦合入放大器300时以及当在放大器300内放大的脉冲从放大器耦合出来时进行控制，如下文所述。

[0184] 图4中的薄膜偏振器340和可切换偏振器330的该组合是用于放大器300的谐振腔的光学开关的一个例子。其他设计也可以用于该光学开关。

[0185] 下文将更详细地描述放大器300的操作和结构。更具体地，将示出通常通过改变放大脉冲在端镜321和322之间的往返次数而实现的重复率改变。刚刚所述的光学开关的功能是通过在脉冲耦合进入或离开谐振腔时进行控制而控制这些往返的次数。

[0186] 放大器300中的光学元件会在这些往返的每一次期间引入一定的色散量。因而，与重复率改变相关的放大器300中往返次数的改变会改变放大器300输出的放大脉冲的累积色散。即便调节压缩器400以针对特定次数的往返而补偿色散，由往返次数的改变引起的色散改变扰乱了图1B的激光引擎1'的展宽器200'、放大器300和压缩器400的展宽、色散性放大和压缩的敏感平衡，需要冗长的重新校准。即使对于具有图1A的集成展宽器-压缩器200的激光引擎1的更有创造性的结构，在往返次数改变时也可能需要使用要调节的补偿元件。该方面限制了这些激光引擎的实用性。

[0187] 为了拓宽它们的实用性，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引入与在往返期间放大器300的光学元件引入的色散符号相反且基本上幅度相等的色散。作为该色散补偿或控制的结果，在放大器300的谐振腔中的往返期间，脉冲几乎没有色散或完全没有色散。因而，往返次数的改变仅微量改变或完全不改变放大的脉冲的色散。

[0188] 因而，由于在往返期间没有累积要补偿的色散，使得能够在基本上不对压缩器400或展宽器-压缩器200的光学设置进行调节、重新对准或校准的情况下改变激光脉冲的重复率。因此，能在图1B的激光引擎1'中实施色散受控的放大器300，使得压缩器400免于在重复率改变之后进行耗时的重新对准的任务。而且，该色散受控的放大器300允许在图1A的激光引擎1中使用集成的展宽器-压缩器200，而无需可调节的补偿功能。

[0189] 例如，如果激光晶体310在激光脉冲在谐振腔内的往返期间引入正色散，色散控制器则能够向放大的展宽脉冲引入具有同样幅度的负色散，以抑制、最小化或消除激光脉冲的色散。

[0190] 一种量化色散的有用方法是“群延迟色散”，或GDD，通常定义为：

[0191] $$GDD=\frac{\lambda^3}{c^2}\frac{d^2n(\lambda)}{d\lambda^2}L \qquad (1)$$

[0192] 其中λ是光波长，c是光速，n(λ)是依赖于波长的折射率，而L是腔内光路长度。光学元件310、330和340、反射镜321-324以及放大器300中可能存在的任意其他光学元件的GDD

例如能够通过测量或者根据设计推断而确定。知道GDD后，色散控制器就能腔内实施与所确定的放大器300的光学元件的GDD近似相等但符号相反的GDD。如此设计的腔在脉冲的往返期间几乎不产生或完全不产生色散，由此消除了所述的问题并且拓宽了激光引擎1或1'的实用性。

[0193] 在示例中，在典型的CPA激光引擎1'中，500飞秒的种子脉冲可由展宽器200'展宽200皮秒，得到展宽的脉冲长度200.5ps。可以调节和校准相应的压缩器400以将展宽的脉冲压缩200ps，得到理想约为500fs的压缩脉冲长度。考虑到非理想性，在现实情况下，压缩脉冲长度可能在500-800fs的范围内。

[0194] 然而，在展宽脉冲在放大器300的谐振腔内往返期间，展宽脉冲的长度可能由于放大器300的各光学元件的色散(表示为腔的GDD)而提升。该GDD的典型值可以从数百fs^2变化至几十万fs^2。在一些情况下，该GDD可以在5000fs^2-20000fs^2的范围内。由于典型情况下展宽器200和补偿器400抵消彼此对脉冲长度的效果，所以由激光引擎1输出的脉冲长度Δt(out)经由下列关系式与由振荡器100生成的种子脉冲的长度Δt(seed)以及GDD相关：

[0195]

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

[0196] 其中N是腔内往返次数。

[0197] 因而，例如，在单次往返期间，GDD为7000fs^2的放大器的光学元件可将Δt(seed)＝200fs的种子脉冲的长度增加小小的22fs至Δt(out)＝222fs。然而，在反复的往返过程中，该看似小的色散以复利形式增加。在N＝10次往返之后，输出脉冲的长度增加约790fs至Δt(out)＝990fs，在N＝30次往返之后，增加约2700fs＝2.7ps至Δt(out)＝2920fs＝2.9ps，而在100次往返之后，增加约9.5ps至Δt(out)＝9.7ps。显然，对于不具有色散受控放大器300的情况，脉冲长度的高达约50倍的大幅恶化使得激光从飞秒激光转变成皮秒激光。

[0198] 而且，即使校准压缩器200或400以补偿由特定往返次数引起的附加色散，例如相应于N＝100次往返的9.5ps色散，但当应用要求将往返次数从N＝100改变至例如N＝110时，放大器300将引起另外的1ps色散，再次导致皮秒而非飞秒的压缩脉冲长度。

[0199] 相反地，激光引擎1或1'的实施例可以具有位于放大器300内的色散控制器，以补偿由谐振腔的光学元件引起的GDD。该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的少量fs色散。因而，放大器300可以接收200ps脉冲长度的展宽脉冲，并且近似独立于放大器工作的往返次数而发射基本上同为200ps脉冲长度的放大脉冲，无论往返次数为50、100、200还是500。因而，对于宽范围的往返次数N，并且因而对于宽范围的重复率，激光引擎1的展宽器-压缩器200或者激光引擎1'的压缩器400可以将脉冲长度压缩回飞秒范围，而无需像放大器300内缺乏本发明的色散控制或补偿的其他激光系统那样进行耗时的重新调节和校准。放大器300内的色散控制器位于放大器300的内部光路中，并且因而自动补偿GDD/色散，而无需重新调节光学放大器300外的光学元件。使用放大器300内的色散控制器的恰当设计，能够消除对光学放大器外部的可调节色散元件(诸如图3B中的色散补偿光栅)进行重新调节以改变脉冲重复率的需要。

[0200] 上述设计考虑所允许的是，激光引擎1或1’可以产生脉冲持续时间小于1000飞秒、重复率在10kHz-2MHz范围内的激光束，且激光引擎除振荡器100之外的所有光学元件具有基本上相同的设置。其他实施例可以按50kHz-1MHz范围内的重复率工作，另一些实施例则按100kHz-500kHz的范围工作。

[0201] 因而，在这些激光引擎中，重复率可以从第一值变化至第二值，而无需改变激光引擎除振荡器100之外的光学元件的设置。

[0202] 可能存在有这样的激光引擎，其中重复率从其第一值至第二值的改变伴随有光学元件设置的改变。然而，这些激光引擎中的一些可基于其放大器内部的色散补偿或控制而可修改，使得经修改的激光引擎也能操作以使用不经修改的设置输出具有第二重复率的激光束。

[0203] 在激光引擎1的各种实现中，重复率可以从第一值变化至第二值，其中第二重复率与第一重复率至少有10％、50％、100％或200％的不同。

[0204] 在其中谐振腔采用光纤的一些设计中，在不重新调整和调节随后的压缩器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)对脉冲能量具有严格限制，以及(ii)通常不具有色散控制器。它们典型地仅产生能量低于每脉冲10微焦(μJ)的脉冲，以避免损害光纤腔的危险。如下文所述，对于许多眼科和手术应用，这一每脉冲能量可能不足，因为这些应用可能需要在靶上为20μJ/脉冲或更大，考虑到各种损耗，转换成激光器输出为30μJ/脉冲或更大。

[0205] 另一个不同点是在光纤激光器中，当激光器的重复率改变时，光束的发散会由于热负荷的变化而不可避免地改变。

[0206] 相反地，放大器300典型地包含色散控制器或补偿器，并且光在自由空间中传播，从而激光引擎1或1’的一些示例可操作以输出能量在1-100μJ/脉冲的范围内的激光束，另一些实施例输出的能量在10-50μJ/脉冲的范围内，而又一些实施例输出的能量在20-30μJ/脉冲的范围内。

[0207] 一些激光引擎1或1’可以配置为使得重复率的改变伴随有激光引擎1的光学元件的调节。然而，由于存在色散控制器，甚至在这些实施例中，激光引擎1或1’可以是可修改的，以便在重复率改变时采用基本上相同的光学元件设置。

[0208] 上述各例能够以许多不同方式实施。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一个或多个啁啾反射镜、啁啾光纤、各种啁啾光栅、啁啾透射光学元件、棱镜、和能够改变入射光色散的其他光学元件。

[0209] 一般地，啁啾光学元件可具有光学性质已调制的多个层。在各例子中，层的厚度及其折射率的变化可被设计为对不同波长的光施以不同的控制。一个例子中，已经关于展宽器-压缩器200描述了啁啾体布拉格光栅(CVBG)。其他例子中，诸如啁啾反射镜可以包括电介质材料的多个层，其中每一单个电介质层或层的短堆叠能够反射特定波长的狭窄邻域。啁啾反射镜可通过形成厚度适于反射波长在第一波长附近的光的、具有5-10个电介质层的第一堆叠来构造。随后，可以在第一堆叠上形成具有5-10个电介质层的第二堆叠，其具有不同的厚度和/或折射率以反射波长在第二波长附近的光，依此类推。当在适当数量的堆叠中形成有足够数量的层时，啁啾反射镜能够反射波长成分在所选波长带内的光，同时透射具有其他波长的光。

[0210] 放大器中的色散控制功能可通过使得反射镜321-324中的一个或多个具有啁啾而被执行。在图4中，所有四个镜均具有啁啾。其他设计可以仅使得一个或两个反射镜具有啁啾。另一些可以采用一个或多个啁啾光学元件。作为色散控制器的可能实现方式，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由光学元件310、330和340以及反射镜321-324在放大的展宽激光脉冲在放大器300的谐振腔内的往返期间引起的色散。

[0211] 例子包括Nd:YAG和Yb:YAG晶体。其他实施方式可以使用Nd或Yb掺杂的玻璃。另一些是Yb:X$(WO_4)_2$形式的Yb:钨酸盐，或者是Yb:X_2O_3形式的Yb:倍半氧化物。在这些情况下，X可以是Y、Lu、Gd或其他合适的元素。Nd或Yb的掺杂水平可以在0.1-100％范围内。

[0212] 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。一些掺杂分布可与具有有限聚焦能力(由大于泵浦光的常规M^2因子来表示)的泵浦光源相兼容。泵浦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，诸如2-10个二极管，各自的发射功率为1-10W。泵浦二极管可以以基本上连续波(CW)工作模式或者以类似的高频脉冲模式而工作。它们可被布置为不同的空间阵列、条或其他形式。来自各二极管的光可通过共享的光栅被引导，该光栅可以将非常小百分比的光返回二极管，因而相位锁定它们的光。

[0213] 图5A-B与图4组合地例示了腔倒空再生放大器CDRA 300的操作。操作的原理通常称为“Q开关”，指的是谐振腔的品质因数Q的切换。

[0214] 在“充能(recharge)”或“泵浦”阶段，薄膜偏振器340反射入射光以通过可切换偏振器330。可切换偏振器330可以是快门、斩光盘、自旋棱镜或反射镜、声光器件、电光器件(诸如泡克尔斯盒或克尔盒)、或者可切换的λ/4波片。在无偏压或低压状态下，随着脉冲两次经过端镜322，可切换偏振器330可将偏振面旋转90度。

[0215] 在充能或泵浦阶段，法拉第隔离器500将脉冲透射至薄膜偏振器340上，后者将脉冲重定向通过可切换偏振器330。从端镜322返回后，脉冲第二次穿过可切换偏振器330。随后，脉冲在腔内进行一次往返，从而再在其路径上两次通过可切换偏振器330到达和离开端镜322。在一次往返之后，四次通过可切换偏振器330使得脉冲的偏振面旋转180度。因而，它们基本上无放大地由薄膜偏振器340反射离开腔。

[0216] 在该同一充能或泵浦阶段，放大器300也抑制腔内由泵浦二极管生成的光的激射(lasing)作用因为由可切换偏振器330对偏振面的90度的两次通过旋转使得谐振腔的品质因数Q很低，从而使得腔不适于激射作用。

[0217] 图5A例示了在该充能/泵浦阶段，激光晶体310吸收来自侧泵浦或端泵浦布置中的上述泵浦二极管或泵浦激光二极管的光。泵浦增加了激射原子或复合子的受激能级的粒子数以创建粒子数反转，实质上吸收并存储泵浦能量或“增益”。

[0218] 图5B例示了在该充能/泵浦阶段，放大器300中未生成和发射放大的激光脉冲。所丢弃的未放大脉冲当然由放大器300发射。

[0219] 图5A-B例示了泵浦/充能阶段可以根据预定定时操作而结束或者可以由跟踪激光晶体310中的能量存储的感测电子器件来引起。在任一情况下，在时间t(充能)之后，控制和驱动器电子器件可以向可切换偏振器330施加高电压，以停止90度的偏振面旋转。其他类型的可切换偏振器330可以由不同手段切换。该改变将腔的品质因数Q切换至足够高的值以使得腔适于激射作用。

[0220] 放大器300的单脉冲实施例可在单脉冲正执行其腔内往返的同时切换可切换偏振器330。当在可切换偏振器330已被切换之后，单脉冲在其往返结束时返回可切换偏振器300时，脉冲的偏振面不再旋转，并且因此脉冲不由薄膜偏振器340反射离开腔。与在泵浦阶段被丢弃不同，对于长度为t(增益)的增益阶段，脉冲能够被俘获在腔内以进行更多次的往返。在图5B中，为清楚起见，已经放大了t(增益)的时间刻度。

[0221] 图5A-B例示了在增益阶段，在腔内泵浦或存储的能量(或增益)经由被称为诱导发射的过程而从激光晶体310传递至进行往返的脉冲，以开始激射作用。因此，如图5A中所示，腔内能量降低，而激射脉冲中的能量在增益过程中增大，如图5B中所示。在图5B中，t(增益)间隔中的峰表示激射脉冲通过腔内特定点时的能量，而实线上升曲线是表示在滑动往返周期上平均的能量增益的包络。

[0222] 应当注意到，在腔内俘获单个输入脉冲的实施方式可在其往返期间将激光晶体310中存储的几乎所有能量传递给单个激射脉冲。相反地，一些实现可以允许多个脉冲进入腔内。然而，在这些例子中，得到的激光束可能具有较低的每脉冲能量，于是每脉冲能量降低到低于对于相关类型的光致破裂为惯常且有益的水平。

[0223] 在泵浦到腔内的能量于足够次数的往返期间高效传递给激射脉冲之后，控制器-驱动器电子器件可以停止将高压应用于可切换偏振器330，使其恢复旋转激射脉冲的偏振面。由于偏振旋转的重新启动，放大的激光脉冲于是在下一往返结束时(标注为t(倒空)的时刻)由薄膜偏振器340反射出腔外。

[0224] 放大的激光脉冲的倒空可以由不同的方式被控制。在一些情况下，可以根据设计计算和计算机方法来设置在多少次往返之后执行倒空。在其他情况下，在先校准可被用于设置往返次数。在另一些情况下，可以将各种各样的传感器耦合至谐振腔的光路中。该一个或多个传感器可以感测放大的激射脉冲的能量何时到达预定值，并由此向控制器发送控制信号以使腔倒空。

[0225] 使放大的激光脉冲反射离开腔并且将其向压缩器400发送，由此完成泵浦-增益-倒空循环。一旦完成了脉冲倒空，腔返回其低Q状态，重启新的泵浦-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，这两个端口都可在薄膜偏振器340中实现。

[0226] 在一些实现中，激射脉冲执行50-500次往返，在其他实例中，在腔内进行100-200次往返，以使得将能量从激光晶体310的泵浦状态传递给激射脉冲。如前所讨论的，振荡器100可以创建频率在10-200MHz范围内的种子脉冲串，在一些情况下，该频率在20-50MHz范围内。在一些实现中，激光引擎1或1’输出重复率在10kHz-2MHz或50kHz-1MHZ或100kHz-500kHz范围内的激光脉冲串。因而，可切换偏振器330通过仅仅俘获每第5个-每第20000个种子脉冲进行放大来对输入的种子脉冲串进行抽选。这些俘获序列的定时可以通过使用振荡器100作为主时钟而得以控制。

[0227] 重复率是激光引擎的主要特性。如果(1)重复率能在一频率范围内改变，并且(2)该范围的上限很高，则可以实现更多样的功能。例如，最佳地以第一重复率执行白内障手术程序，而第二重复率可能更适于角膜手术程序。如果激光引擎能被调节以在第一和第二重复率处均可工作，那么可以对于这两个功能使用单个激光引擎。因而，接下来将回顾各种设计考虑，其能够使得激光引擎1和1’中的重复率可变且范围上限很高。

[0228] 如参考图3B-C和图4所述，放大器300中的色散控制器(诸如对于反射镜321-324的任一个，啁啾反射镜)的使用可以补偿在腔内往返期间由放大器的光学元件引起的激射脉冲的色散。该设计特征允许改变激光引擎1或1'的重复率，而无需改变展宽器200和压缩器200/400的光学元件(诸如光栅201、203、205和207、透镜202以及反射镜204和208)的校准、对齐或设置。

[0229] 代替修改光学设置，重复率改变可以通过施加电控制信号以修改激光引擎1的定时和操作而实现。例如，重复率可以通过施加信号以缩短重复时间t(重复)＝t(充能/泵浦)+t(增益)而增加。

[0230] 通常，t(重复)的缩短通过减少t(泵浦)和t(增益)两者来实现。例如，通过增加泵浦二极管/激光器的泵浦强度，可以缩短泵浦时间t(泵浦)。例如通过减少激射脉冲的往返次数，可以缩短增益时间t(增益)。

[0231] 例如通过增加每次往返的能量增益，可以在尽管往返较少的情况下仍保持激光脉冲的能量。图5B例示了激射脉冲的能量在增益阶段期间随着脉冲逐次往返地通过腔内的所选参考点而增加。相继的通过的能量比值通常由(“小信号”)增益因子g表征。增益因子g对于存储在激光晶体310的受激或泵浦能级中的总能量是敏感的。存储的能量越多，g因子越大。因此，施加控制信号以增加存储在增益介质310的泵浦能级中的能量，可以使得激射脉冲以较少的往返达到相同的能量，因而增加重复率。

[0232] 重复率范围的上限也可以以多种方式增加。在具有较大增益因子g的实施例中，需要较少的往返来实现相同的放大。因而，一些实现通过采用具有较高增益因子g的激光晶体310而实现重复率的高上限。

[0233] 同样地，由于增益因子g对于存储在激光晶体310的受激或泵浦能级中的总能量敏感，因此使用更多能量来泵浦受激能级是实现较短t(增益)进而实现较高重复率的另一种方式。

[0234] 控制重复率的另一个因子是一次往返所需的时间。激射脉冲以时间间隔2L/c通过参考点，其中L是腔内的光路长度，而c是光速。因而，在一些实施例中，可减小光路的长度L以缩短往返时间。在这些实现中，相同次数的往返以及因而相同能量的传递所需的时间t(增益)更短，由此以另一方式增加了重复率。

[0235] 实施一个或多个上述设计原理，激光引擎1或1'的实施例能够以高达500kHz、1MHz或者在一些情况下2MHz的重复率工作。

[0236] 此外，在这些实现中，t(增益)的缩短允许使用总重复时间t(重复)中的更大一部分来支持泵浦和倒空循环的更有利的占空比。

[0237] 占空比的常用定义是低Q时段的长度除以总时段长度。使用该定义，在例如具有400kHz重复率的实现中，将t(增益)从1微秒减少至0.5微秒将使得占空比从0.6增至0.75，即25％的可观增加。

[0238] 返回至缩短光路长度L的设计原理，应当注意到，尤其可基于可切换偏振器330能够多快地切换以在腔内俘获脉冲来控制L。在1米光路的腔中，一次往返的时间是2L/c＝6.6ns。再计及脉冲的有限空间延伸区，单个脉冲的实施方式因而具有切换时间小于5ns，或小于4ns，或甚至小于3ns的可切换偏振器330。

[0239] 在一些放大器中，可切换偏振器330可以是泡克尔斯盒。泡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，并且因而可以非常强。泡克尔斯效应在缺乏反对称性的晶体中发生，诸如铌酸锂、砷化镓或其他非中心对称材料。

[0240] 通过有时施加数千伏电压，能够以极短的上升时间将泡克尔斯盒从偏振旋转状态切换至偏振非旋转状态。上升时间的一种衡量是“5-95时间”，即偏振面的旋转从最大/饱和值的5％上升至其95％所需的时间。在一些实现中，上升时间可以小于5ns，在其他实现中小于4ns，在另一些实现中小于3ns。事实上，在一些实现中，上升时间并非由泡克尔斯盒本身的动力学限制，而是由切换电子元件的动力学限制。一些实现可以使用创新的控制和驱动器电路以使能该快速的功率切换过程。

[0241] 如上所述，缩短泡克尔斯盒的切换时间是缩短t(增益)从而允许更快重复率的有效方法。而且，这些更快的泡克尔斯盒还允许减少光路的长度，进而减小腔的尺寸。

[0242] 此外，可以使得激光引擎1的实现具有比某些现有激光器更少的光学元件。这部分归因于色散控制器或补偿器的应用，避免了在压缩器中设置可调节光学元件的需要，并且还归因于集成的展宽器-压缩器结构200。

[0243] 虽然一些激光器可能包含上百或更多的光学元件，但在激光引擎1的一些实现中，光学元件的数量可以少于75。在另一些实施例中，小于50。

[0244] 在一些实现中，在除了振荡器之外的部分中的光学元件的数量可以小于50。在其他实施例中，小于35。

[0245] 本文中，术语“光学元件”指的是影响光束的光学性质的任何元件。实例包括：反射镜、透镜、平行板、偏振器、隔离器、任意可切换光学元件、折射元件、透射元件和反射元件。

[0246] 光学元件由光从空气中进入处或者光离开进入空气处的表面所限定。因而，如果诸如物镜的一个功能块包含数个透镜，即使当物镜移动时各个透镜一起刚性移动，该功能模块也并非一个“光学元件”。这是因为在物镜的各透镜之间，虽然间距较短但光确实有在空气中传播。即使两个透镜彼此接触且在其中心不具有气隙，偏心光束仍然在进入另一透镜之前从一个透镜出射进入空气，于是仍被计数为两个光学元件。应当注意到，激光器的示意性描述通常示出了比激光器的实际功能所需更少数量的光学元件。典型地，当示出单个透镜时，其功能无法由实际的单个透镜所执行，而只能由仔细设计的透镜组件执行。因而，这种示意性描述典型地仅旨在例示，而如果按字面意思实施将是不可实行的。

[0247] 具有快速泡克尔斯盒、快速切换电子元件和少量光学元件的激光引擎1的一些实施方式可以在腔内具有短于2米的光路，而在其他实施方式中光路可以短于1米。相应地，激光引擎从振荡器100中生成光子开始并且包括放大器300的腔内的所有往返的总光路可以小于500米或300米或甚至150米。

[0248] 现有的飞秒激光器具有500米或更长的总光路以及3-4米或更长的腔端镜至端镜距离，因为不采用本文所述的创新方法是很难将光路缩短到低于这些值的。

[0249] 有助于减小激光引擎1的尺寸的创新子系统和特征的列表包括：(i)基于光纤的振荡器100，代替自由空间振荡器；(ii)集成的展宽器-压缩器200，可能基于单个啁啾体布拉格光栅，其在重复率改变时不必调节光学元件；(iii)色散补偿放大器300，消除在改变重复率时对展宽器-压缩器200中的可调节光学元件的需要；(iv)非常快切换的泡克尔斯盒；(v)非常快的控制电子器件，其能够在包括千伏范围的泡克尔斯盒的高压下，以快速的上升时间操作；以及(vi)需要较少容纳空间的少量光学元件。

[0250] 实施这些特征的组合或全部的激光引擎可以支持小于500米、在一些实现中小于300米、而在一些实现中小于150米的总自由空间光路。

[0251] 同样地，具有一些或所有上述相关特征的放大器300可以具有小于2米、在一些情况下小于1米的端镜至端镜光路长度。

[0252] 在许多实现中，光路多次折叠，因而谐振腔的物理延伸区可能显著地短于光路长度。短且折叠的光路可以转换成放大器300的小的总延伸区。在一些情况下，放大器300的边缘尺寸均未超过1米，在其他情况下，不超过0.5米。

[0253] 相应地，整个激光引擎1的占地面积，即其覆盖激光系统台面的面积，可以小于$1m^2$，在其他实现中小于$0.5m^2$，在另一些实现中小于$0.25m^2$，并且可能小于$0.1m^2$。这些面积或占地面积各自能够导致显著的新优点。

[0254] 由于使用了一个或多个上述设计原理和部件，放大器300和激光引擎1可以具有非常小的空间延伸区。同样地，空间延伸区可以合理地将放大器300和激光引擎1与不采用这些设计原理和部件的其他激光器区分开。

[0255] 另一考虑也应当提及：对那些位于激光系统的顶板上并由此可通过简单地移除盖而无需将系统模块移入或移出激光系统的机架就可到达的子系统的维护，是关键性地更为简单的。这样做可能危及在精密性设备典型地不可用于恢复对齐的用户环境(诸如医院)中，系统模块的敏感的对齐。因而，虽然将手术激光系统的各种部件彼此上下堆叠可能看起来是减少其占地面积的另一种方法，但是这样做会对激光系统的维护引入了过高的挑战。

[0256] 因而，减小激光引擎1的尺寸允许将也需访问以进行维护的其他子系统设置在激光系统的顶板上。这种附加子系统可以在质量方面引入新功能，因而关键性地改善了整个激光系统的实用性。这种附加子系统可以包括成像系统以引导眼科手术。

[0257] 概言之，上述特征可以独立或组合实施以构造物理紧凑的激光系统。出于至少下列理由，这种小空间延伸区可以是有价值的优点：(i)眼科手术激光系统通常配置在其中空间和通路高度宝贵的非常拥挤的手术室中，因此偏好具有小占地面积的激光系统；(ii)如果大部分或所有其光学部件安装在激光系统机架的顶板上，那么激光引擎的可维护性从质量上而言更优；以及(iii)小激光引擎允许将附加系统配置在顶板上，向整个激光系统增加关键性的新功能，诸如引导眼科手术的成像系统。

[0258] 返回追踪放大的展宽激光脉冲的路径，图2例示了一旦由放大器300发射，放大的脉冲就可以向前返回法拉第隔离器500。法拉第隔离器500的功能之一可以是以近100％的效率重定向放大的脉冲远离振荡器，因而防止由放大的脉冲对振荡器100造成损伤。

[0259] 在一些情况下，经由偏振器550和560而将放大的脉冲引导至展宽器-压缩器200的压缩器端口。如上所述，展宽器-压缩器200可以重新压缩放大的脉冲，并且发射具有飞秒脉冲的脉冲激光束。

[0260] 利用上述各种解决方案的激光引擎1的实现可以输出脉冲持续时间在1-1000飞秒(fs)范围内，在一些情况下为50-500fs范围内，在另一些情况下为100-300fs范围内的激光束。这些飞秒脉冲可以到达极高能量，例如在1-100微焦/脉冲的范围内，在其他实现中，在10-50微焦/脉冲的范围内，在另一些实现中，在20-30微焦/脉冲的范围内。

[0261] 这些脉冲能量可以使得对于脉冲能量小于1、10或20微焦/脉冲的激光不可用的应用变得有用，因为在眼内存在有呈现出阈值性态的若干不同的激光-组织交互。存在有其中

低于1微焦/脉冲能量的激光脉冲无法引起手术期望的组织修改的手术程序。在其他手术程序中，该阈值可以是10或20微焦/脉冲。

[0262] 例如，白内障手术需要将激光引导至靶组织深处，诸如10mm的深度。该需求限制了数值孔径，因而需要更高的每脉冲能量值以形成光致破裂。在一些情况下，10-15微焦/脉冲的能量可能足够。为了避免在最大能量值下操作，可能期望具有20微焦/脉冲的设备。由于这些数值是靶上能量，为了计及沿着光路的损耗，激光系统可以包括输出25-30微焦/脉冲的激光器。

[0263] 例如，在白内障手术应用中，切割硬度为1、2、3或4的白内障可能需要高于相应阈值的激光脉冲能量。例如，在某些情况下，脉冲能量高于10-15微焦/脉冲的激光可以切割硬度1的白内障，脉冲能量高于10-20微焦/脉冲的激光可以切割硬度2的白内障，脉冲能量高于20微焦/脉冲的激光可以切割硬度3的白内障，脉冲能量高于30-50微焦/脉冲的激光可以切割硬度4的白内障。这些阈值能量可能受若干因素影响，包括脉冲长度、重复率、整个靶区域内的激光斑的位置、和患者年龄。

[0264] 激光脉冲的效应在各类靶组织内是其参数的高度非线性函数。因而，具有相同能量/脉冲但是脉冲持续时间不同的激光会在手术靶中得到不同的结果。例如，具有特定能量/脉冲值的皮秒脉冲可能在眼科组织中生成膨胀不受控制的泡，然而具有类似能量/脉冲的飞秒脉冲则可创建保持受控的泡。因此，上述能量/脉冲值能够由发射飞秒脉冲、即长度小于1皮秒的脉冲的激光引擎生成。

[0265] 激光束的强度也可以根据其功率而量化。例如，具有50kHz重复率的20微焦/脉冲激光具有1W功率。以功率表示，上述阈值可以转换成相应重复率下的0.1W、1W和10W的阈值功率。因而，能够发射功率超过这些阈值的激光束的激光引擎提供了不同的功能。

[0266] 例如，食品药品管理局以医用激光器的功率对其进行分类。3B类激光器由于其效应已被广泛研究而通常用于眼科程序中。输出功率小于0.5W功率的光束的激光器属于3B类。因而，功率小于0.5W的激光器提供了与具有较高功率的激光器大不相同的应用。

[0267] 图6A-D例示了利用其高速改变重复率的能力的激光引擎1的功能。在各种应用中，手术激光束引起焦点处的光致破裂，其中破裂区域最终膨胀成泡。随着激光系统的扫描光学器件以扫描速度扫描焦斑，生成一串泡。这串泡能够以可控方式形成线或表面。大量的泡降低了靶组织沿着这些线或表面的机械完整性，使得可以沿着这些线或表面而容易地分离靶组织。实际上，扫描的激光束沿着这些线和表面“切割”靶组织。

[0268] 在一些代表性情况下，泡的直径可以是数微米(μ)，间隔距离为10-50μ的量级或更大。手术激光系统典型地每重复时间(重复率的倒数)创建一个泡。因而，只要激光系统的扫描速度恒定，泡基本上等距离地间隔开。

[0269] 泡在由激光脉冲创建之后膨胀。在各种情况下，这一膨胀可能变得不受控制。这种不受控制的泡膨胀会强烈散射靶区域内的后续激光脉冲，严重破坏了眼科手术的精确性和控制。彼此过于靠近的泡的形成是这种不受控制的膨胀的一个诱因，因为这会使得泡接合。其他可能的处理包括泡的膨胀可能干扰后续形成的泡的形成，在它们之间形成串扰，再一次导致泡的不受控膨胀。因而，在扫描期间维持预定的泡间隔是高度优先考虑的，以维持眼科手术激光系统对泡膨胀的控制。

[0270] 然而，焦斑的扫描通常涉及移动部件，诸如反射镜和电流计。对于极短的重复时

间，甚至这些移动部件的最小惯性和机械延迟也可能影响泡密度。例如，当沿着一些手术图案扫描时，扫描速度可能在转折点或拐角处减慢，可能使得激光斑和泡的密度增加。在其他情况下，即使泡的线密度保持恒定，仅仅是手术图案的几何形状也会引起泡面积密度的增加。

[0271] 图6A示出了当固定重复率激光器正扫描通过之字形手术扫描图案以在靶组织中创建分离的片的示例。然而，随着靠近转向点或折回点，扫描仪在重复率维持恒定的同时减缓，由此引起增加的泡线密度进而增加的泡面积密度，如图所示。这种增加的泡密度可能导致严重的控制问题，如上所述。

[0272] 在一些现有激光系统中，该技术问题通过包括诸如光束阻挡器的附加元件来解决，所述元件在靠近这类转折点时中断激光束以防止形成高泡密度区域。然而，包括这种光束阻挡器意味着在激光系统中增加附加元件，其操作要被控制并且要与扫描本身同步。所有这些附加意味着进一步的挑战和增加的复杂性。

[0273] 类似的问题即使扫描仅仅是到达扫描图案中的线的一端的情况下也会出现，再次减缓了扫描速度并且引起泡的线密度的增加。

[0274] 图6B示出了可以通过沿着“加速-最小化”扫描图案来避免这种锐利转向点。加速-最小化图案的一个例子是螺旋形，其不具有锐利的折回。然而，即便螺旋形图案也只是减少加速，而不是消除加速。因而，扫描速度在这些系统中仍然变化，并且因而固定的重复率仍然需要被选择为使得泡密度即便在图案的最低速度部分处也不增加至超过阈值。然而，该设计原理意味着对于该图案的大部分，扫描速度低于系统为了获得实现切割或分离功能所需的泡密度而可支持的速度。同样，如果使用较高的扫描速度，那么泡间隔会变得较小，导致形成泡之间的干扰或串扰。所有这些影响增加了不可控或非确定性泡膨胀的危险。

[0275] 激光引擎1的实现能被设计以提供该上下文中的有用功能。一般而言独特的设计，具体而言放大器300的色散控制器，使得可以与改变扫描速度基本上同步地改变重复率。在一些激光引擎中，重复率能够以10μs-1s范围内、在一些特定情况下为1μs-1s的范围内的改变时间改变。因而，一些实现可以包括控制电子器件，其根据所设计或测得的扫描速度沿着手术图案的减缓而降低激光引擎1的重复率，以在靶区域中维持近似恒定的泡密度。这种近似恒定的泡密度例如可以通过与变化的扫描速度成比例地改变重复率来实现。使用该功能，激光引擎1或1’可以能够形成具有近似均匀的线或面积泡密度或间隔的泡，并且因而防止或抵消不受控的泡膨胀。

[0276] 图6C例示了具有与图6A中相同之字形的扫描手术图案，其中随着扫描移动至折回点周围，重复率降低，从而生成在泡之间具有基本均匀的线间隔的切口。

[0277] 图6D例示了螺旋形手术图案，其重复率随着螺旋形收敛至中心而降低，若无此降低则泡会变得彼此过于靠近。该实施例因而同样能够创建基本均匀的面积泡密度。

[0278] 当然，重复率的快速可变性还允许泡创建不仅具有恒定的密度，也可具有预定的密度分布。例如，眼睛的核心越靠中心越硬。因而，在一些实现中，泡密度可以随着扫描穿过眼核中心而增加，而在中心之后减小。大量不同的密度分布可以具有不同的医学优点和益处。密度分布也可以不基于预定的基础来调节，而是响应于靶区域的成像或感测而调节。

[0279] 图7A-D例示了另一设计特征，其有助于激光引擎与扫描基本上同步地改变重复率，或者至少在眼科手术的时标内(例如在60-120秒内)如此。

[0280] 图7A-B例示了被称为热透镜效应的现象以及其对激光器设计的影响。当由泵浦二极管泵浦激光晶体310并且通过放大激光脉冲而传递其能量时，激光晶体的温度T上升。温度T通常不均匀地上升：典型地温度在泵浦中心区域最高，可能在光轴处或周围达到峰值，并且随着径向距离的增加而减小。

[0281] 该不均匀温度上升具有至少两个效应：(i)由于折射率n随着温度增加：n＝n(T)，其在激光晶体310的中心区域呈现最大值；以及(ii)增加的温度使得激光晶体310的中心区域比其周围区域更广泛的热膨胀，因此凸起而由较冷的外部区域固定。这两个效应均趋向于聚焦入射的平行光线。该现象被称为热透镜效应。该热透镜效应通过使得用透镜310’来符号化激光晶体而表示。该热透镜可以通过若干屈光度而呈现折射，并且因而其能够大幅改变激光引擎的性能。

[0282] 图7A例示了激光引擎的设计典型地涉及确定激光晶体在由工作重复率和光束功率所确定的工作温度T＝Top处的热透镜效应的折射效应，以及经由激光引擎的其他光学元件引入对于该热透镜效应的折射补偿。一个例子是引入附加透镜312，其可以在光束热透镜310’将平行光束聚焦之后将会聚光束恢复成平行光束。

[0283] 图7B例示了这种折射补偿适于特定工作温度T＝Top，进而仅适于特定重复率和光束功率。的确，如果应用需要改变重复率或功率，则改变的重复率和/或改变的功率将激光晶体310的温度T从T＝Top改变至T＝Top’。温度的这一变化改变了该温度下的热透镜的聚焦(从虚线表示的会聚光束变成实线表示的会聚光束)，将在T＝Top处平行的光束转变成在T＝Top’处发散的光束，因而具有较差的会聚性质。

[0284] 图7B还例示了能够通过调节折射补偿来恢复会聚性质。改变折射补偿典型地需要调节激光引擎的一个或多个光学元件，诸如移动透镜、旋转光栅或者相对于光轴移动光束。图7B例示了沿着光轴调节补偿透镜312，如箭头所示。类似于前述色散补偿，该经由机械调节的折射补偿也是缓慢的并且需要精细的调整和校准。因而，大部分激光器完全回避该挑战，并且不允许改变重复率。甚至在那些提供可改变重复率的激光器中，由于调节补偿光学元件的缓慢，该重复率不能与激光引擎的扫描接近同步地改变，甚至在眼科手术时间内也不能。

[0285] 图7C-D例示了采用各种设计原理以最小化热透镜效应的激光引擎1的实现。如果大部分或所有光线传播通过或者非常靠近该热透镜310’的中心，则热透镜310’的折射能得到相当程度的降低，因为在中心穿过透镜的光线在几何光学近似的水平上不发生折射。在波动光学水平上并且当包括透镜的有限延伸区时，这些中心光线发生折射，但仅仅是很小的角度。

[0286] 图7C例示了光线能通过例如下列方式被压缩以入射到透镜中心：(i)使用具有聚焦效果的端镜322的实施例；(ii)将热透镜效应激光晶体310/310’非常靠近聚焦端镜322的焦点放置，从而来自聚焦端镜322的大部分光线入射到热透镜效应激光晶体310/310’的中心；以及(iii)将另一端镜321也非常靠近聚焦端镜322的焦点放置，并且因而非常靠近透镜效应晶体310，以确保光束反射回其自身，而非变得发散。在这些设计中，在重复率或光束功率改变，因而将激光晶体310的温度从T＝Top改变至T＝Top’时，不存在重新调节激光引擎1的任何机械或光学元件的迫切需要，因为激光晶体310的折射影响已被最小化。因而，可以改变折射率或光束功率，而无需折射补偿器的任何对应调节。

[0287] 参考图4，在各个实施例中，任何一个或多个端镜和折叠反射镜321-324可以具有所述的聚焦效果。

[0288] 该实施例的设计参数包括端镜312和透镜效应晶体310的距离d1、透镜效应晶体310和聚焦端镜322的距离d2、以及其他参数，诸如孔径、透镜效应晶体310的厚度以及聚焦端镜322的半径，这些设计参数能被优化以进一步最小化已减小的热透镜效应。

[0289] 图7D例示了相关设计。在该实施例中，端镜321和322均为聚焦类型。该实例进一步减小了热透镜效应，因为激光晶体310能够以较高的精确度被设置在两个端镜的共享焦点处。同样地，可以对其他参数执行附加设计优化。

[0290] 图8例示了抑制激光引擎1中的热透镜效应的量化表征。水平轴示出了晶体中心的工作温度$T_{工作}$＝Top与环境温度$T_{环境}$之比。垂直轴示出了由激光引擎1发射的激光束的光功率。该图示出了，即使激光操作将激光引擎加热得高于环境温度10-50％，光功率也仅改变百分之几，在$T_{工作}/T_{环境}$＝150％时到达约10％。因为由图7C和图7D的设计有效地最小化了激光晶体310的热透镜效应的折射影响，所以激光晶体310的光功率在如此宽范围的工作温度上改变如此之小。

[0291] 以上的详细描述提供了能被用于实现改变重复率而无需调节振荡器100以外的光学元件的设计原理和例子，包括(i)在放大器300内使用色散补偿；(ii)使用集成的展宽器-压缩器200；以及(iii)使用最小化热透镜效应的腔结构，以及上述的其他设计考虑。使用一个或多个上述或类似设计特征的激光引擎可以允许在改变时间内在重复率范围内改变重复率，仅引起有限的激光束修改。

[0292] 本文中，重复率范围可以是10kHz-2MHz或50kHz-1MHz或100kHz-500kHz，这些范围各自提供了特定的功能。

[0293] 改变时间可以是多步骤眼科手术的时标，取决于手术类型，诸如在1-120秒或10-60秒或20-50秒的范围内。具有这些范围内的改变时间的激光引擎可以支持重复率从第一手术程序所需的重复率至第二手术程序所需的重复率的改变。

[0294] 在其他情况下，诸如参考图6A-D所述的实施例中，改变时间可以是由激光系统的扫描速度设置的时标，例如是重复时间的倍数，其中倍数可以位于1-10000或100-1000的范围内。由于重复时间在10kHz为约100微秒(100μs)，而在1MHz约为1μs，因此这些“扫描改变时间”或“扫描同步改变时间”可以在1μs-1s的范围内。

[0295] 在一些实现中，通过响应于扫描速度的改变而改变重复率使得扫描速度与重复率之比基本上维持恒定，维持了泡的线密度。

[0296] 重复率的改变可能在有限程度上修改激光束。该修改能够以各种方式捕获，包括：(i)光束直径改变小于10％或20％；或者(ii)光束中心移动小于光束直径的20％或40％。此处可以以不同方式定义光束直径，诸如光束强度跌至光束中心强度50％的直径。也可以使用其他定义。

[0297] 一个例子是激光引擎1，其可以发射重复率为100kHz且焦斑处光束直径为3微米的激光束，其中通过在15秒的改变时间内仅调节振荡器100而可以将激光束的重复率改变至150kHz，并且尽管有此相当大的改变，光束仅被有限程度地修改：焦斑直径仅改变15％至3.45微米，而其中心相对于光轴仅移动光束直径的30％，即0.9微米。可以使用这种激光引擎以100kHz重复率执行白内障手术，其重复率在15秒内改变至150kHz，并且可以又以

150kHz的重复率执行随后的角膜手术程序，整个手术程序所花时间不超过100或120秒，同时维持非常好的光束质量。

[0298] 在另一例子中，激光引擎1可以发射重复率为100kHz且光束直径为4微米的激光束。当扫描靠近手术图案的锐利折回处(其中扫描速度减缓至常规扫描速度的一半)时，重复率可相应地逐渐减慢至其值的一半，即从100kHz至50kHz，以维持生成的泡或斑的接近恒定的线密度。如果该减缓例如在100kHz重复率下的10个重复周期内执行，那么改变重复率的总时间为约100μs。

[0299] 重复率能够以若干步骤改变或逐渐改变，最终结果是与激光束的扫描时标的改变接近同步地改变重复率，在约100μs内从100kHz至50kHz。激光引擎1的设计使得可以在这一相当快的时间内改变重复率，同时维持高激光束质量。在一例子中，激光束直径在100kHz可以是4微米，随着重复率降至50kHz，其可以仅改变10％至3.6微米，而激光束的中心向离开光轴的方向移动仅光束直径的20％，即0.8微米。

[0300] 表达激光引擎1如何能够维持高光束质量同时改变重复率的再一种方法是根据熟知的g1-g2稳定性平面。激光引擎1的实现可以在重复率的宽范围内(例如在10kHz-2MHz或10kHz-500kHz或50kHz-200kHz范围内)将光束参数g1和g2维持在双曲线稳定性区域内。

[0301] 从另一个优点而言，光学元件的小数量可能是激光引擎1的实现的关键且区别性特征。飞秒激光器一般是切割边缘器件，对于环境影响、与指令不同的使用、以及甚至简单的磨损(诸如自加热效应)非常敏感并且很容易对偏。因而，飞秒激光器的光学元件可能需要在规律的短时间间隔中进行精细调整、重新调节和维护。典型的飞秒激光器可以包括上百个或更多的光学元件，并且这些光学元件中任一元件的故障就会引起整个激光器的故障。

[0302] 一些典型的激光器可能在30-60个“循环”(即开关激光引擎)之后这样频繁地发生故障。为了防止在手术中发生故障，一些激光系统的操作者不得不计划带有所有附属成本以及停机时间的规律且昂贵的维护巡修，并且仍然存在发生具有破坏性后果的现场故障的高风险。

[0303] 相反地，激光引擎1的实施例可以开关循环多于120次，而无需重新调节激光引擎1的任何光学元件。对于一些实施例，循环次数可以多于180，或者甚至240。

[0304] 在手术操作中，为了最小化与加热和冷却激光晶体310相关的问题，通常在早上一次打开激光器且仅在晚上关闭，即手术激光器通常一天循环一次。在一个简单的估计中，如果每周使用激光器五次，于是每个月近似20次，那么在1.5个月之后的30次循环可能转化成高故障机率，三个月的60次循环更是如此。

[0305] 相反地，激光引擎1的一些实现可以循环多于120次，转化成6个月的低故障概率。其他实现可以循环180或240次，转化为9个月或全年的低故障概率。因而，激光引擎1的实施例可由预防性维护计划操作，后者向用户和服务提供者施加低得多的负担。同样地，如此低频率的维护计划允许可能的不同类型的维护，诸如替换激光系统的整个部分。在一些情况下，整个激光引擎1可以在现场用新近维护过的激光引擎来简单替换，并且激光引擎1的维护可以在服务提供者基地的高技术环境中进行，而非在手术操作者的较低技术环境中进行。

[0306] 虽然本文包含各种特例，但是这些例子不应被解释为对本发明的范围或其声明范

围的限制，而只是对本发明具体实施例的特定特征的描述。在本文中多个实施例的上下文中描述的某些特征也可以在单个实施例中组合实现。相反地，在单个实施例的上下文中描述的各个特征可以在多个单独的实施例中或在任何合适的子组合中实现。此外，虽然各特征在上文被描述为以特定组合起作用，并且最初是这么声明的，但是所声明组合中的一个或多个特征在某些情况下可从该组合中去除，并且所声明的组合可以得到子组合或子组合的变体。

[0307] 公开了成像引导的激光手术技术、设备和系统的多个实现。然而，基于所述内容，可以对所述实现以及其他实现进行变化和改善。

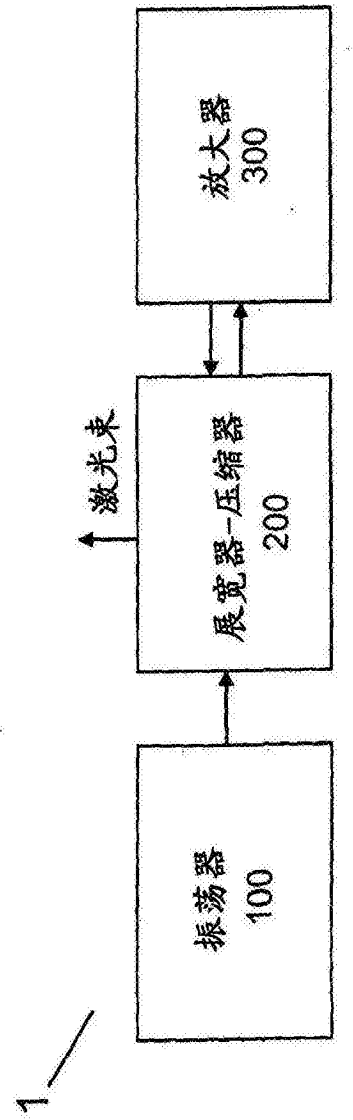


图1A

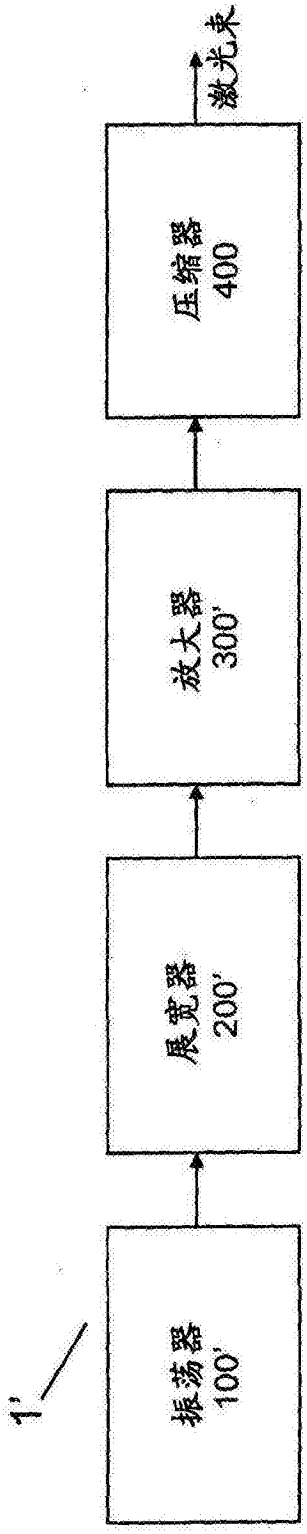


图1B

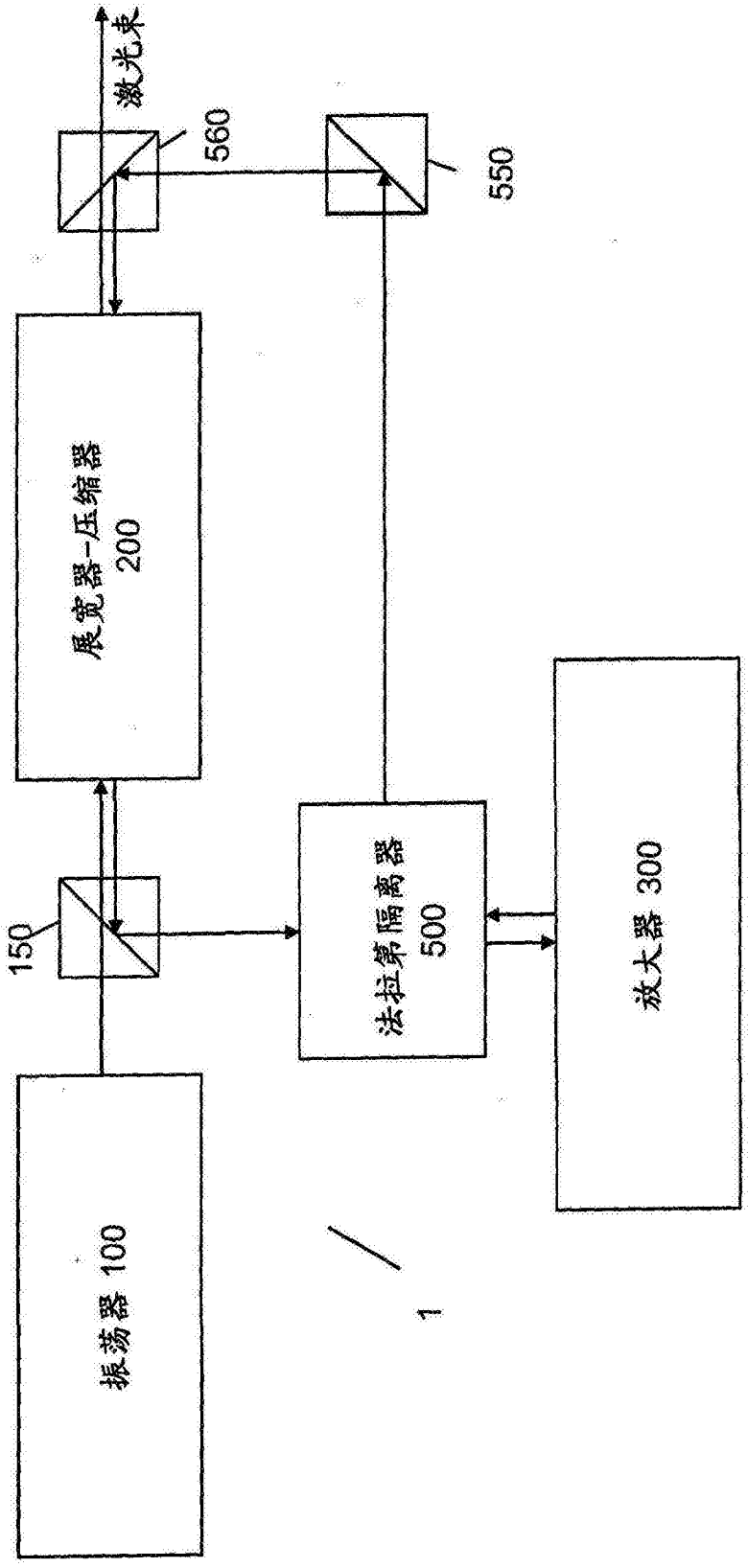


图2

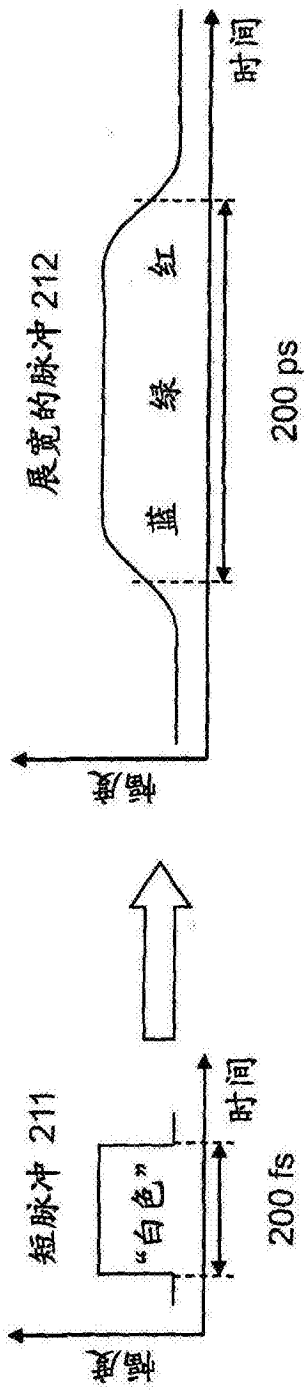


图3A

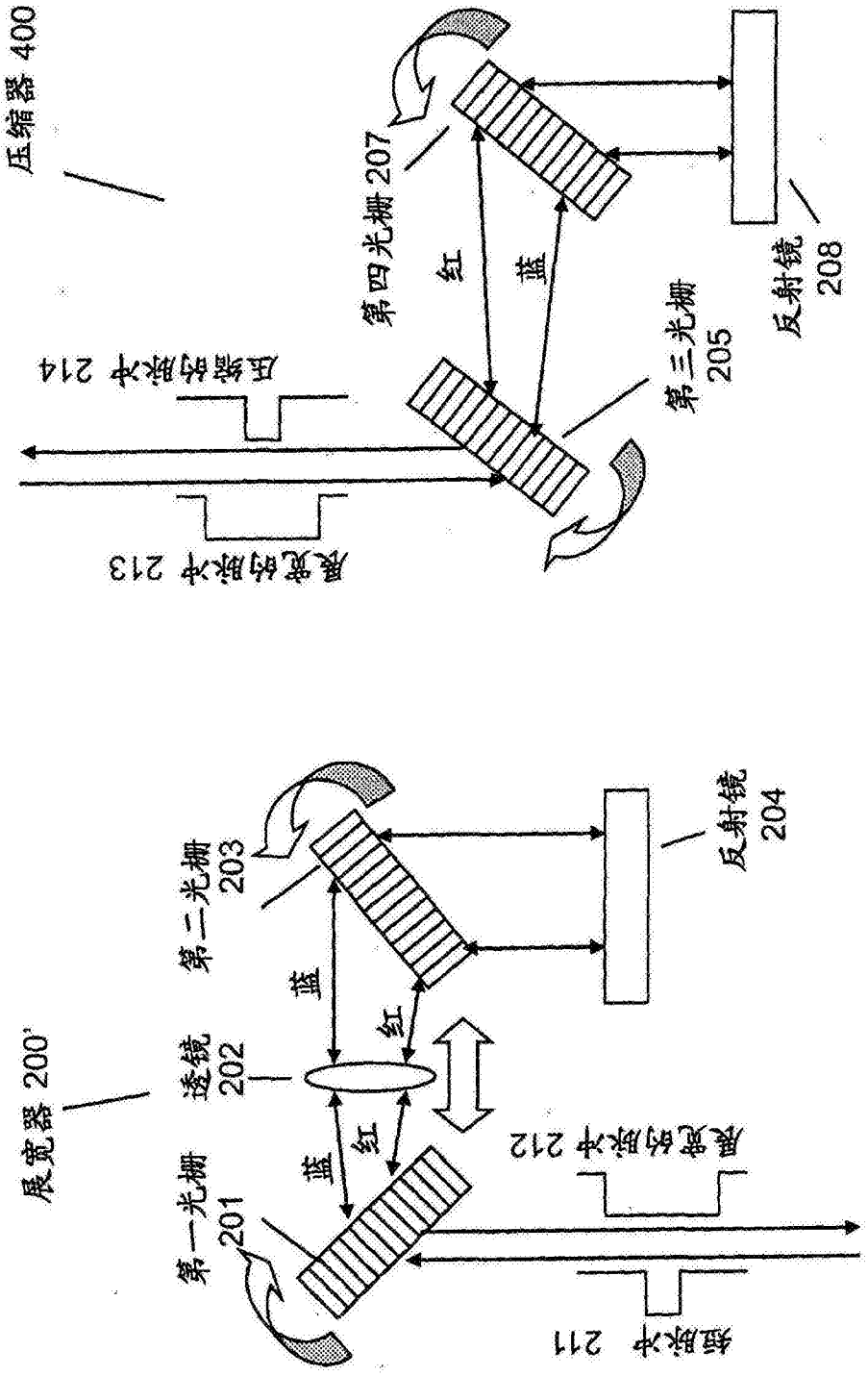

压缩器 400
第四光栅 207
红
蓝
反射镜 208
第三光栅 205
压缩的脉冲 214
展宽的脉冲 213
展宽器 200'
第二光栅 203
反射镜 204
蓝
红
透镜 202
展宽的脉冲 212
蓝
红
第一光栅 201
短脉冲 211

图3B

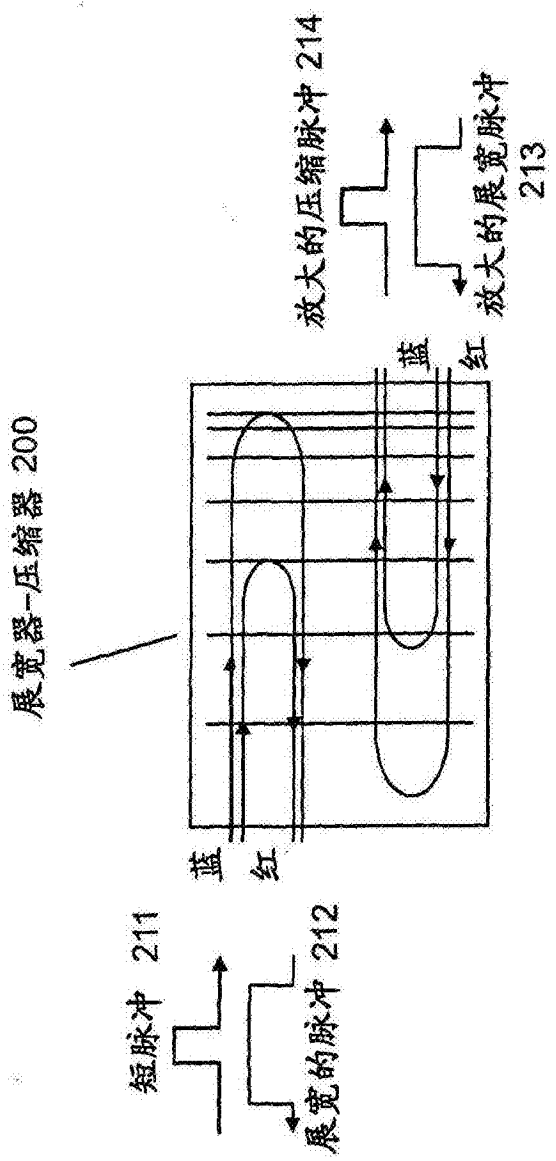


图3C

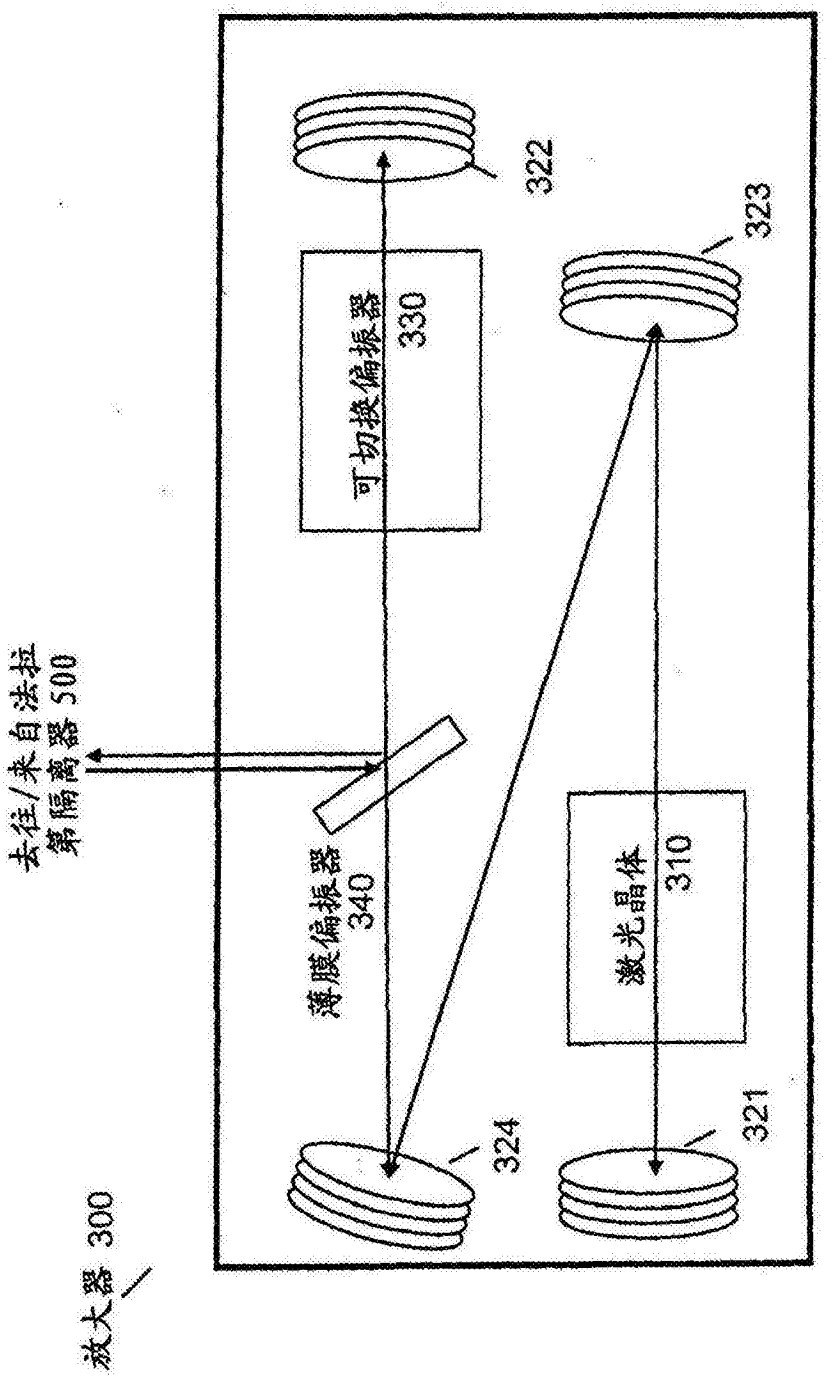

放大器 300
去往/来自法拉第隔离器 500
薄膜偏振器 340
可切换偏振器 330
激光晶体 310
322
323
324
321

图4

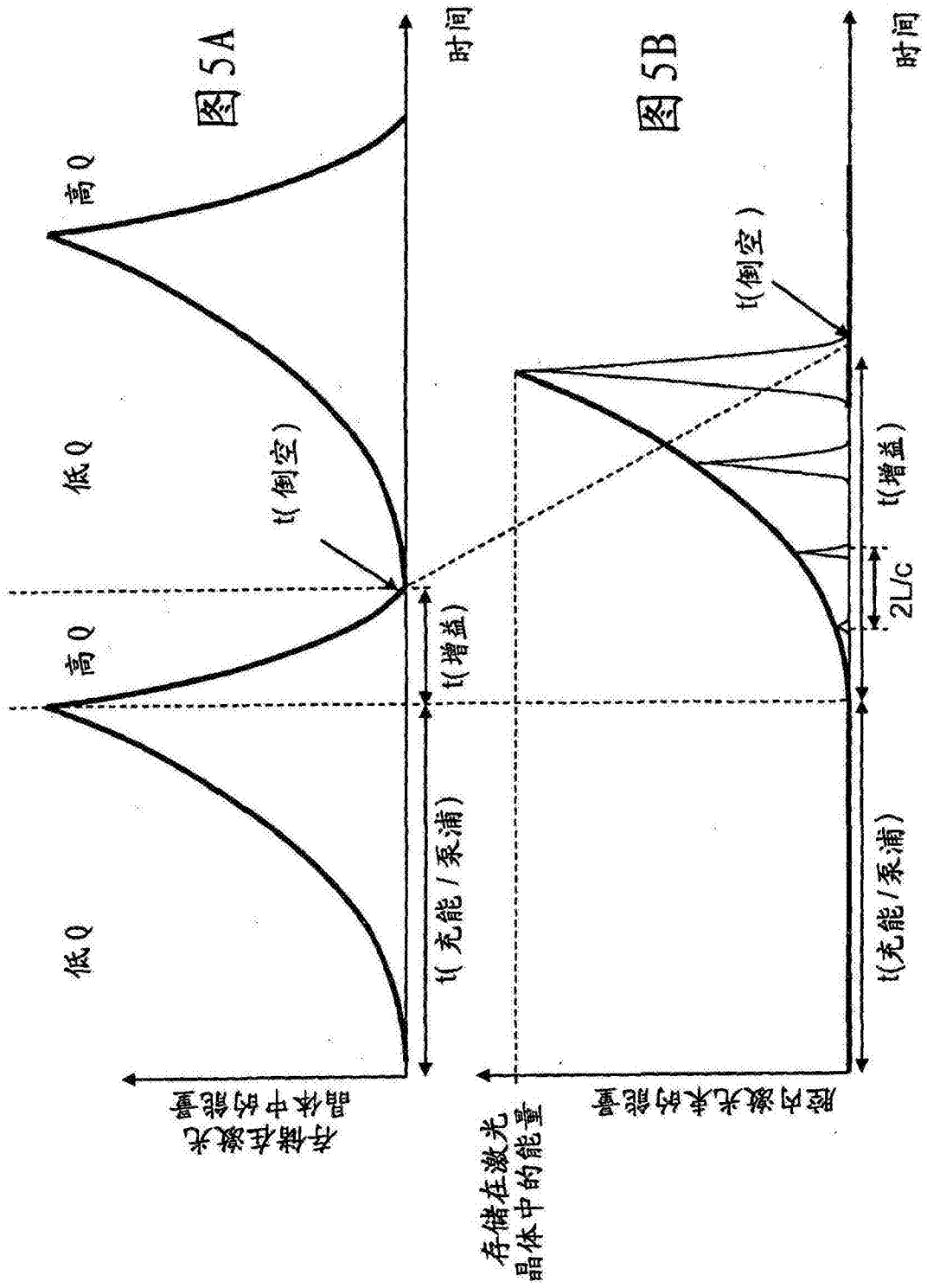


图5A
时间
高Q
低Q
t(倒空)
高Q
t(增益)
低Q
t(充能/泵浦)
存储在激光晶体中的能量
图5B
时间
t(倒空)
t(增益)
2L/c
t(充能/泵浦)
腔内激光束的能量
存储在激光晶体中的能量

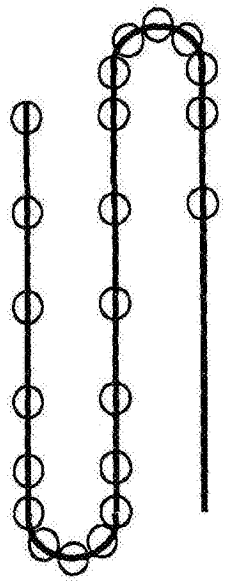


图6A

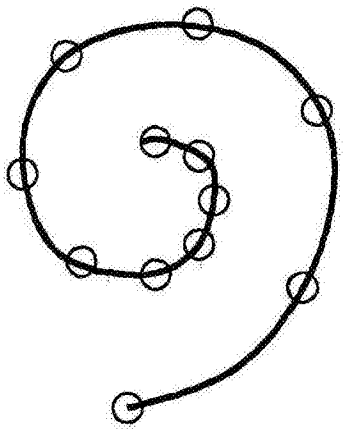


图6B

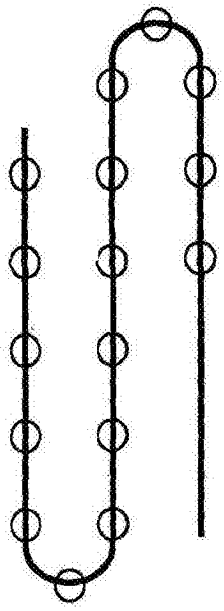


图6C

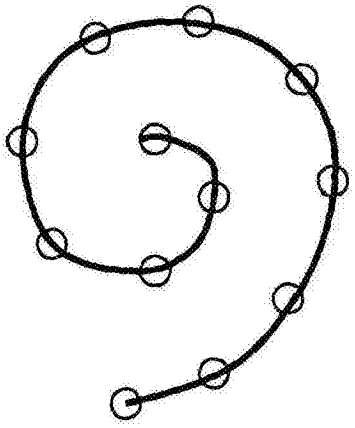


图6D

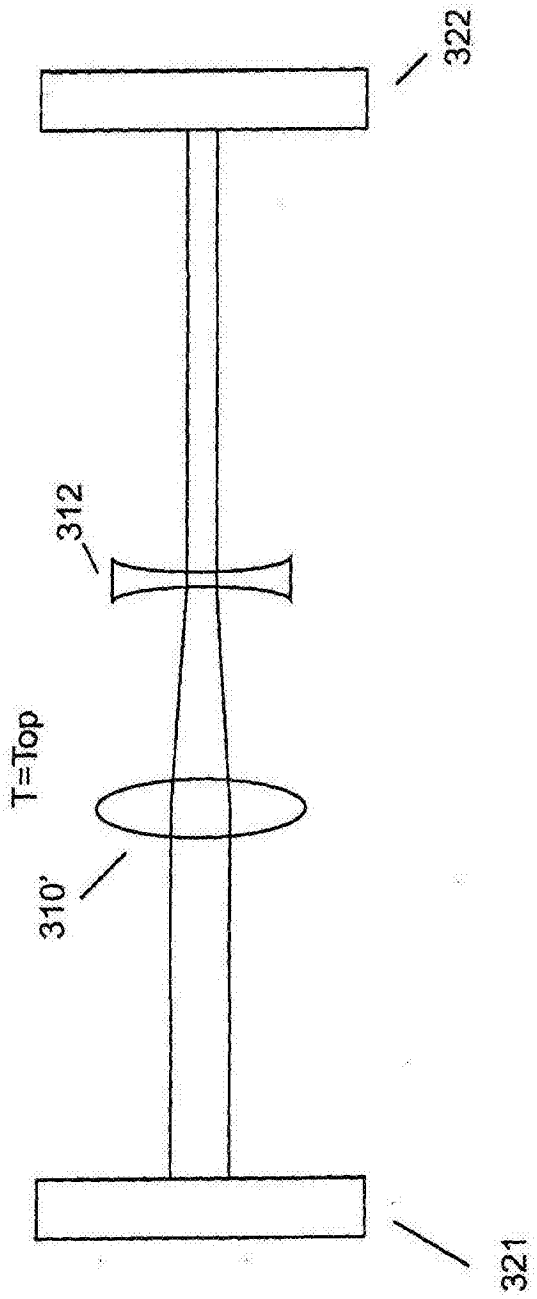


图7A

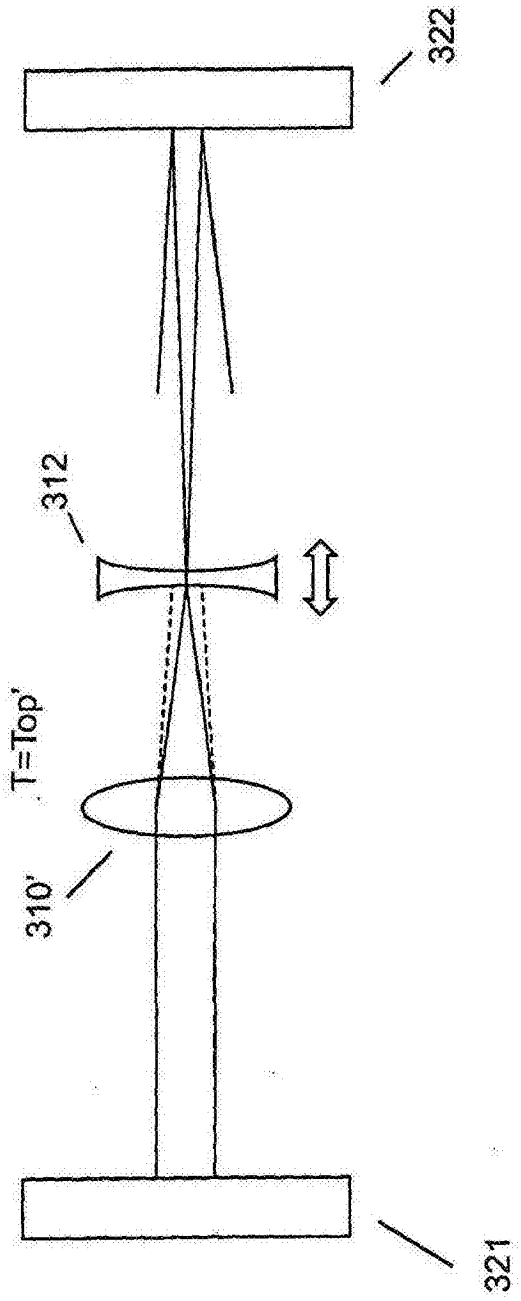


图7B

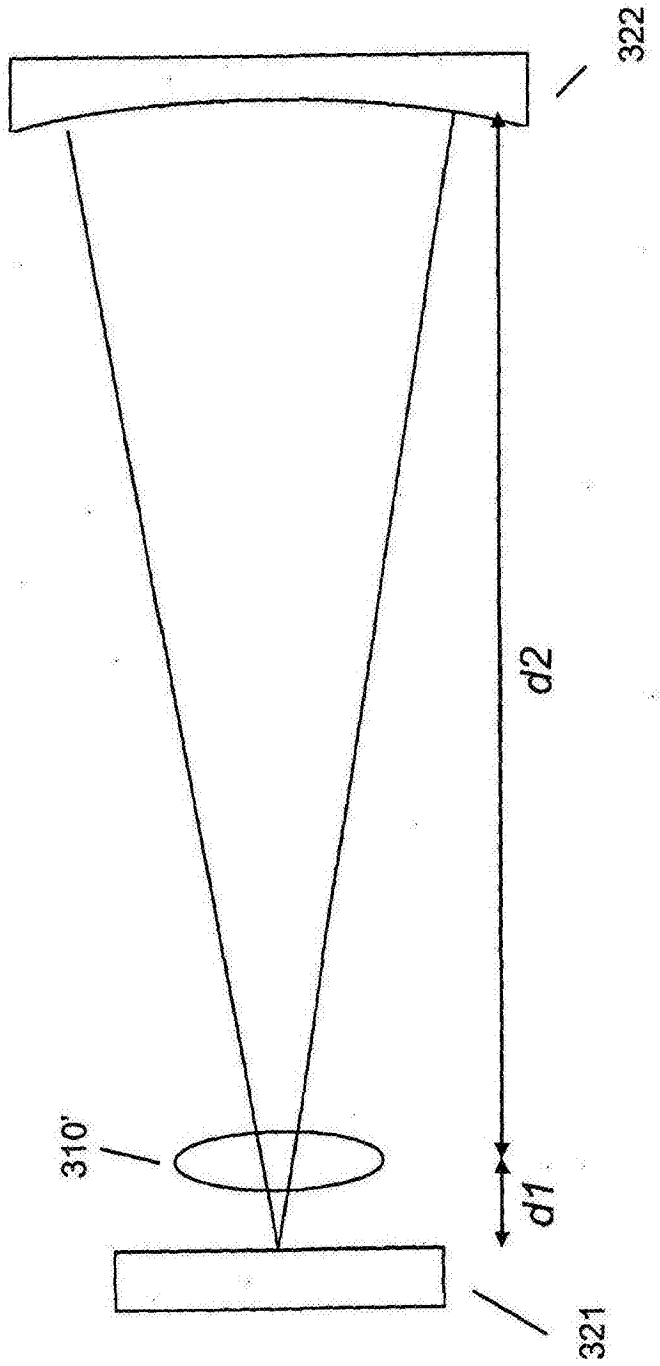


图7C

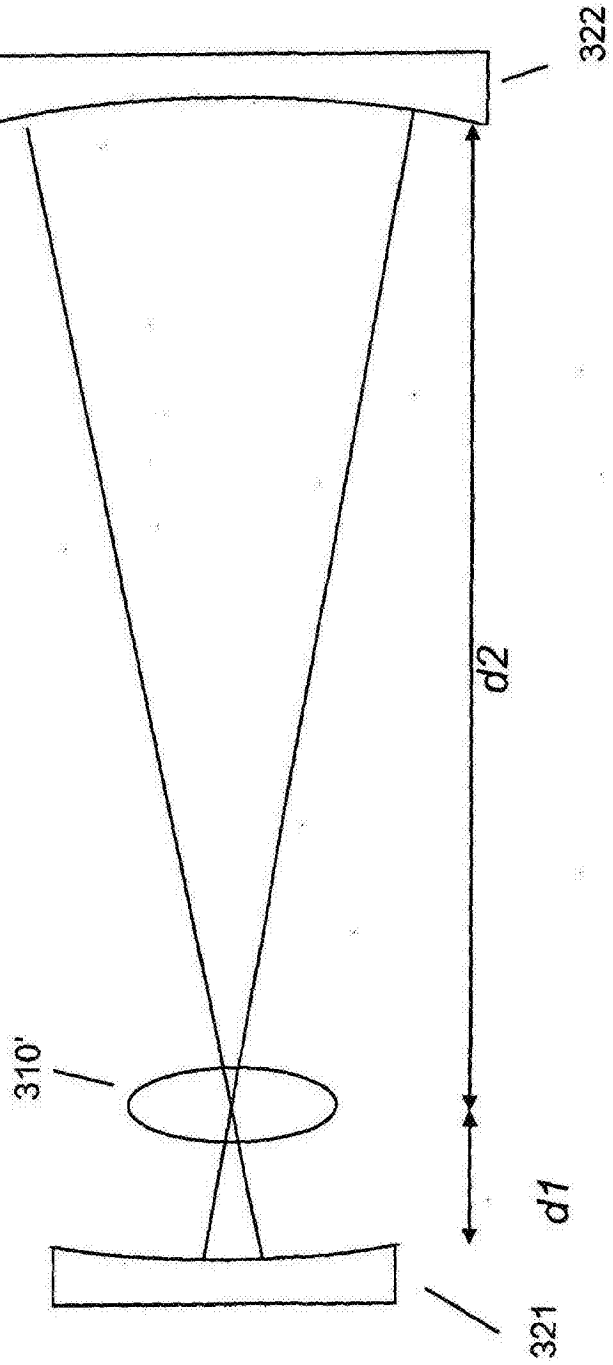


图7D

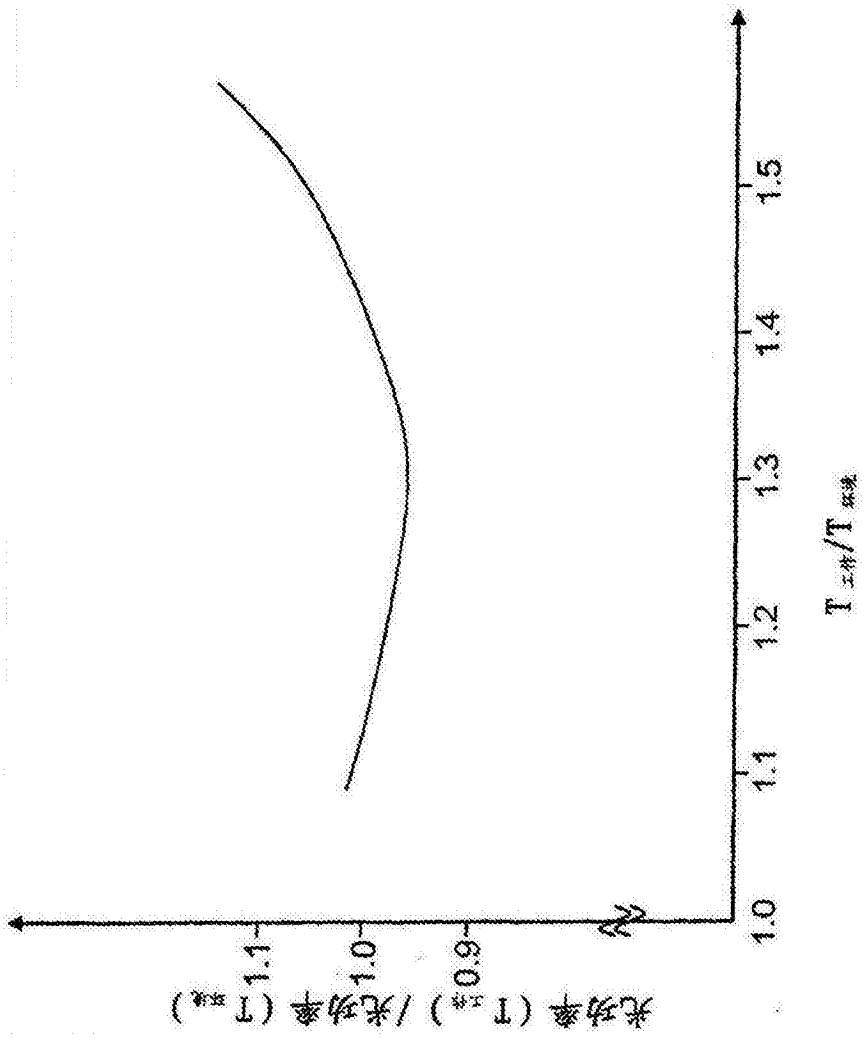


图8