(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 118648204 A
(43)申请公布日 2024.09.13

(21)申请号 202280076178.7
(22)申请日 2022.10.27
(30)优先权数据
63/281,044 2021.11.18 US
(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2024.05.15
(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2022/078772 2022.10.27
(87)PCT国际申请的公布数据
WO2023/091849 EN 2023.05.25
(71)申请人 相干公司
地址 美国加利福尼亚州
(72)发明人 V·A·塞金 D·P·施梅尔策 J·丰塔内拉 P·罗森塔尔
(74)专利代理机构 余姚德盛专利代理事务所(普通合伙) 33239
专利代理师 周积德
(51)Int.Cl.
H01S 3/223(2006.01)
H01S 3/117(2006.01)
H01S 3/13(2006.01)
H01S 3/136(2006.01)
H01S 3/10(2006.01)
H01S 3/106(2006.01)
H01S 3/23(2006.01)

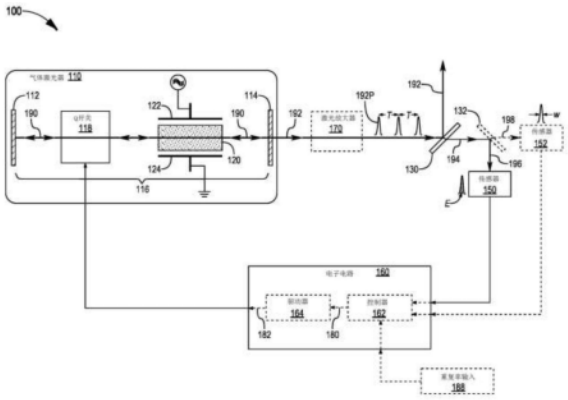
权利要求书3页 说明书10页 附图10页

(54)发明名称

Q开关式气体激光器中的脉冲均衡

(57)摘要

具有双变量脉冲均衡的Q开关式气体激光器装置包括气体激光器、传感器和电子电路。Q开关可使激光谐振器在高损耗状态与低损耗状态之间切换以生成脉冲式激光束。传感器获得指示激光脉冲能量的脉冲式激光束的测量值。电子电路操作Q开关以(a)使激光谐振器在高损耗状态和低损耗状态之间反复地切换以设置脉冲式激光束的激光脉冲的重复率,(b)基于脉冲能量测量结果来调整低损耗状态的损耗水平,以达到目标激光脉冲能量,以及(c)调整低损耗状态的持续时间,以达到目标激光脉冲持续时间。通过调整脉冲能量和持续时间两者,可以根据需要在很宽的重复率范围内实现均匀的脉冲能量和均匀的脉冲持续时间。



CN 118648204 A

1.具有脉冲均衡功能的Q开关式气体激光器装置,包括:

气体激光器,所述气体激光器包括具有Q开关的激光谐振器,该Q开关可操作以使所述激光谐振器在高损耗状态和低损耗状态之间切换以产生脉冲式激光束;

第一传感器,所述第一传感器用于获得指示激光脉冲能量的脉冲式激光束的第一测量结果;以及

电子电路,所述电子电路通信地耦合在所述Q开关与所述第一传感器之间并且被配置为操作所述Q开关以(a)使所述激光谐振器在所述高损耗状态与低损耗状态之间反复地切换以设置所述脉冲式激光束的激光脉冲的重复率,(b)基于第一测量结果调整所述低损耗状态的损耗水平,以达到目标激光脉冲能量,以及(c)调整所述低损耗状态的持续时间,以达到目标激光脉冲持续时间。

2.根据权利要求1所述的装置,还包括第二传感器,所述第二传感器用于获得指示激光脉冲持续时间的脉冲式激光束的第二测量结果,并且其中所述电子电路被配置为基于所述第二测量结果来调整所述低损耗状态的持续时间,以达到所述目标激光脉冲持续时间。

3.根据权利要求2所述的装置,其中所述第一传感器和第二传感器被布置为对所述激光谐振器外部的脉冲式激光束进行采样。

4.根据权利要求2所述的装置,其中所述电子电路完成所述第一传感器与所述Q开关之间的脉冲能量反馈环路以及所述第二传感器与所述Q开关之间的脉冲持续时间反馈环路。

5.根据权利要求4所述的装置,其中所述脉冲持续时间反馈环路比所述脉冲能量反馈环路更快。

6.根据权利要求4所述的装置,其中所述第一传感器是光敏检测器,其被配置为获得作为多个激光脉冲的平均值的所述第一测量结果,并且所述第二传感器为光学检测器,其被配置为获得作为单个激光脉冲的波形的所述第二测量结果。

7.根据权利要求1所述的装置,其中所述Q开关包括设置在所述激光谐振器中的声光调制器。

8.根据权利要求7所述的装置,其中所述电子电路包括:

RF驱动器,所述RF驱动器用于生成射频信号并向所述声光调制器提供所述射频信号,当所述射频信号具有非零幅度时,导致所述声光调制器通过衍射在所述谐振器中引入损耗;以及

控制器,所述控制器用于生成命令信号并将所述命令信号发送到所述RF驱动器,该命令信号包括具有相应前沿、后沿和信号值的一系列命令脉冲,每个前沿使所述RF驱动器生成具有将所述激光谐振器置于所述低损耗状态的较低幅度的射频信号,每个后沿使所述RF驱动器生成具有将所述激光谐振器置于所述高损耗状态的较高幅度的射频信号,并且每个信号值设置所述较低幅度的值;

其中所述控制器被配置成(a)通过设置连续前沿之间的周期以匹配目标重复率的倒数来设置所述重复率,(b)基于所述第一测量结果来调整所述信号值,以达到所述目标激光脉冲能量,以及(c)调整从所述前沿到相应后沿的持续时间,以达到所述目标激光脉冲持续时间。

9.根据权利要求1所述的装置,还包括用于放大所述脉冲式激光束的激光功率放大器,其中所述第一传感器被布置为在由所述激光功率放大器放大之后从所述脉冲式激光束获

得所述第一测量结果。

10.用于均衡Q开关式气体激光器产生的激光脉冲的方法,包括以下步骤:

操作所述Q开关式气体激光器的Q开关,以使所述Q开关式气体激光器的激光谐振器在高损耗状态与低损耗状态之间反复地切换,以产生脉冲式激光束;以及

通过重复以下步骤来均衡所述脉冲式激光束的激光脉冲的激光脉冲能量和激光脉冲持续时间:

对所述脉冲式激光束进行采样以获得指示所述激光脉冲能量的第一测量结果,

基于所述第一测量结果调整所述低损耗状态的损耗水平,以接近目标激光脉冲能量,以及

调整所述低损耗状态的持续时间,以接近目标激光脉冲持续时间。

11.根据权利要求10所述的方法,其中所述采样步骤还包括获得指示所述激光脉冲持续时间的所述激光束的第二测量结果,并且其中所述调整持续时间步骤基于所述第二测量结果。

12.根据权利要求11所述的方法,其中获得所述第一测量结果的每个实例作为多个所述激光脉冲的平均值,并且所述第二测量结果的每个实例从单个激光脉冲获得。

13.根据权利要求10所述的方法,其中:

所述操作步骤包括将所述激光脉冲的重复率从第一值改变为与所述第一值不同的第二值的步骤;以及

所述均衡步骤包括响应于所述改变步骤而执行所述调整步骤,以便最小化由所述改变步骤引起的激光脉冲能量和激光脉冲持续时间的改变。

14.根据权利要求13所述的方法,其中所述均衡步骤包括:

将与所述重复率的第一值处的单独或平均激光脉冲能量相同的所述重复率的第二值处的单独或平均激光脉冲能量保持在10%以内;以及

将与所述重复率的第一值处的激光脉冲持续时间相同的所述重复率的第二值处的激光脉冲持续时间保持在10%以内。

15.根据权利要求10所述的方法,其中:

所述操作步骤包括:

生成命令信号,该命令信号包括具有相应前沿、后沿和信号值的一系列命令脉冲,每个前沿启动所述激光谐振器到所述低损耗状态的转变,每个后沿启动所述激光谐振器到所述高损耗状态的转变,每个信号值定义所述低损耗状态期间所述激光谐振器的损耗水平,以及

通过设置连续前沿之间的周期以匹配目标重复率的倒数来设置所述激光脉冲的重复率;

所述调整损耗水平步骤包括基于所述第一测量结果调整所述信号值;以及

所述调整持续时间步骤包括基于所述第二测量结果来调整从所述前沿到相应后沿的持续时间。

16.根据权利要求10所述的方法,

进一步包括放大所述脉冲式激光束的步骤;以及

其中,所述采样步骤是对放大后的脉冲式激光束执行的。

17.根据权利要求10所述的方法,其中所述Q开关是声光调制器。

18.根据权利要求17所述的方法,其中所述操作步骤包括:驱动所述声光调制器以将激光衍射出所述激光谐振器,由此产生的损耗水平在所述低损耗状态下不为零。

19.根据权利要求10所述的方法,其中所述采样步骤在所述激光谐振器外部执行。

Q开关式气体激光器中的脉冲均衡

[0001] 优先权

[0002] 本申请要求于2021年11月18日提交的美国临时申请序号63/281,044的优先权,其公开内容通过引用整体并入。

技术领域

[0003] 本发明涉及Q开关式气体激光器,例如Q开关式二氧化碳(CO_2)和一氧化碳(CO)激光器。本发明具体涉及在改变脉冲重复率时Q开关式气体激光器的输出的激光脉冲能量和激光脉冲持续时间的变化。

背景技术

[0004] 气体激光器的激光增益介质是气体混合物。提供激光作用的光学活性实体是原子、离子或分子。这些光学活性实体通常由高压电场,即射频(RF)或直流(DC)供电,产生气体放电,从而在光学活性实体中产生粒子数反转。由于固态激光器通常效率更高、尺寸更小、成本更低且操作更简单,许多气体激光器在商业应用中已被固态激光器取代。然而,某些类型的气体激光器仍然很受欢迎,并且是某些激光应用的首选解决方案。例如,CO_2激光器和CO激光器在激光加工等工业过程中得到广泛应用,其红外(IR)波长和高平均功率在工业过程中具有优势。

[0005] CO_2激光器可传送约9微米(μm)至约11μm波长范围内的IR激光辐射,而CO激光器可传送约4.5μm至约6.0μm波长范围内的IR激光辐射。使用CO_2激光器和CO激光器可获得高达约8千瓦的平均功率。

[0006] 许多激光加工应用需要以脉冲发出激光辐射。在CO_2和CO激光器的情况下,可以通过打开和关闭增益介质中的气体放电来产生脉冲式激光束。然而,该技术生成的激光脉冲的上升时间和下降时间由气体混合物中能量传递过程的动力学决定,通常为10至200微秒(μs)的量级。这些上升时间和下降时间导致整个激光脉冲持续时间在数十到数百微秒的范围内,这对于某些应用来说太长了。特别地,这些激光脉冲持续时间在许多激光加工应用中太长,在这些应用中要求被照射材料中的热影响区很小。当激光脉冲持续时间为数十微秒或更长时,单个激光脉冲期间被照射材料中的热扩散导致热影响区在远离被照射位置的方向上显著生长。即使对于不需要较短激光脉冲的应用,气体放电的调制也具有额外的缺点,即相关的热变化导致光学不稳定。

[0007] Q开关是一种通过调制激光谐振器的腔内损耗来产生激光脉冲的技术。Q开关将激光谐振器在高损耗状态(低Q因子)和低损耗状态(高Q因子)之间切换,同时保持激光增益介质的稳定泵浦。首先通过在高损耗状态下操作激光谐振器来生成激光脉冲,以防止激光作用。在没有激光作用的情况下,增益介质的泵浦导致激光增益介质中积累大量能量。接下来,谐振器损耗突然下降到能够实现激光作用的低值。经过一段时间的建立后,循环激光功率在这种低损耗状态下迅速增加,并且存储的能量迅速耗尽。结果是产生激光脉冲,其持续时间通常在纳秒范围内。最常见的是,周期性地执行Q开关以生成以脉冲重复率为特征的一

系列激光脉冲。

[0008] Q开关可以是有源的或无源的。在有源Q开关中,激光谐振器包括有源损耗元件,例如声光调制器(AOM)或电光调制器(EOM),其被控制以转移或不转移来自谐振器的辐射以使激光谐振器在高损耗和低损耗状态之间切换。有源Q开关通常用于生成脉冲重复率范围从几百千赫(kHz)下至1kHz或更低的激光脉冲。有源Q开关可用于按需生成单个激光脉冲。

[0009] 使用脉冲式激光束执行的激光工艺通常具有最佳的脉冲重复率。最佳脉冲重复率取决于工艺。因此,最通用的脉冲激光系统能够在一定范围的脉冲重复频率下运行,有时从单激发到几百千赫兹。激光加工工艺在每个单个零件的加工过程中需要改变脉冲重复率的情况并不少见,因此需要动态调整脉冲重复率。在Q开关式激光器的情况下,脉冲重复率的调整相当于改变激光谐振器的高损耗状态的持续时间。至少对于相对高的脉冲重复率,这种变化可以影响切换到低损耗状态之前增益介质中累积的能量的量。因此,脉冲重复率的调整可能伴随着激光脉冲能量的改变。

[0010] 发明概述

[0011] 本文公开了具有激光脉冲能量和激光脉冲持续时间两者的双变量脉冲均衡的Q开关式气体激光器装置和相关方法。本装置和方法利用有源Q开关并且被配置为在宽范围的脉冲重复率上均衡激光脉冲能量和持续时间。一种均衡机制直接影响激光脉冲能量,而另一种均衡机制直接影响激光脉冲持续时间。脉冲能量均衡机制调整激光谐振器的低损耗状态的损耗,而脉冲持续时间均衡机制调整低损耗状态的持续时间。例如,当Q开关是声光调制器(AOM)时,脉冲持续时间均衡机制基于即使在低损耗状态下也保持一定量的衍射,并调整该衍射量以实现期望的脉冲能量。为了进行比较,传统的Q开关在低损耗状态下完全关闭,以最大限度地减少激光谐振器的损耗。

[0012] 我们已经意识到,脉冲能量和持续时间的均衡扩展了可以实现均匀脉冲能量的脉冲重复率范围。虽然通过仅使用脉冲能量均衡机制可以在相对高的脉冲重复率的有限范围内实现均匀的脉冲能量,但是脉冲持续时间均衡机制有利于将该范围扩展到较低的脉冲重复率。因此,即使当目标只是在宽范围的脉冲重复率上保持均匀的激光脉冲能量时,本双变量脉冲均衡也是有用的,而不管激光脉冲持续时间如何。脉冲持续时间均衡机制进一步使得能够在宽范围的脉冲重复率上实现期望的激光脉冲持续时间,从而提供最终的激光脉冲控制。

[0013] 一方面,一种具有脉冲均衡的Q开关式气体激光器装置包括气体激光器、传感器和电子电路。该气体激光器包括具有Q开关的激光谐振器,该Q开关可操作以使激光谐振器在高损耗状态和低损耗状态之间切换以生成脉冲式激光束。传感器被配置为获得指示激光脉冲能量的脉冲式激光束的测量值。电子电路通信地耦合在Q开关和传感器之间,并且被配置为操作Q开关以(a)使激光谐振器在高损耗和低损耗状态之间反复地切换以设置脉冲式激光束的激光脉冲的重复率,(b)基于由传感器获得的测量值调整低损耗状态的损耗水平,以实现目标激光脉冲能量,以及(c)调整低损耗状态的持续时间状态以达到目标激光脉冲持续时间。

[0014] 另一方面,一种用于均衡由Q开关式气体激光器产生的激光脉冲的方法,包括:操作Q开关式气体激光器的Q开关以使Q开关式气体激光器的激光谐振器在高损耗状态和低损耗状态之间反复地切换,以产生脉冲式激光束。该方法还包括通过以下重复步骤来均衡脉

冲式激光束的激光脉冲的激光脉冲能量和激光脉冲持续时间:(a)对脉冲式激光束进行采样以获得指示激光脉冲能量的测量结果,(b)基于指示激光脉冲能量的测量结果来调整低损耗状态的损耗水平,以接近目标激光脉冲能量,以及(c)调整低损耗状态的持续时间,以接近目标激光脉冲持续时间。

附图说明

[0015] 并入说明书并构成说明书的部分的附图示意性地示出了本发明的优选实施方案,并且与上面给出的一般描述和下面给出的优选实施方案的详细描述一起,用于解释本发明的原理。

[0016] 图1示出了根据实施方案的具有激光脉冲能量和激光脉冲持续时间两者均衡的Q开关式气体激光器装置。

[0017] 图2是用于对配备有AOM Q开关的激光谐振器进行Q开关的现有技术方案的时序图。

[0018] 图3示出了由图1的装置的实施方案生成的一组示例性激光脉冲,图1的装置实现AOM Q开关并根据图2的现有技术方案进行操作。

[0019] 图4示出了由图1的装置与图3相同的实施方案生成的另一组示例性激光脉冲,但以与图2的现有技术方案不同的方式实现脉冲修整。

[0020] 图5显示了进一步探索控制Q开关的命令脉冲持续时间对固定脉冲重复率下的激光脉冲能量和持续时间的影响的数据。

[0021] 图6是根据实施方案的用于对Q开关式气体激光器生成的激光脉冲进行双变量均衡的方法的流程图。

[0022] 图7是根据实施方案的图6方法使用来利用双变量脉冲均衡对气体激光器进行Q开关的方案的时序图。

[0023] 图8示出了根据实施方案的当利用双变量脉冲均衡操作图1的装置并且基于来自各个传感器的测量结果来实现激光脉冲能量和激光脉冲持续时间的动态调整时产生的激光脉冲的示例。为了比较,图8还示出了在没有脉冲均衡的情况下生成的激光脉冲的示例。

[0024] 图9A和图9B分别示出了具有和不具有双变量脉冲均衡的三种不同脉冲重复率的激光脉冲能量和激光脉冲持续时间的示例。

[0025] 图10A示出了根据实施方案的可以在图1的装置的实施方案中实现的RF驱动器,其中Q开关是AOM。图10B示出了用于控制该RF驱动器的示例性命令信号。

[0026] 图11A示出了根据实施方案的可以在图1的装置的实施方案中实现的另一个RF驱动器,其中Q开关是AOM。该RF驱动器被配置为接收单独的时序和电压输入。图11B示出了用于控制图11A的RF驱动器的定时方面的示例性定时命令信号。

[0027] 图12示出了根据实施方案的用于具有激光脉冲能量和激光脉冲持续时间两者的伺服控制的双变量脉冲均衡的控制器。

[0028] 发明详述

[0029] 现在参考附图,其中相同的部件由相同的附图标记表示。图1示出了一种具有双变量脉冲均衡的Q开关式气体激光器装置100。装置100包括气体激光器110、传感器150和电子电路160。气体激光器110包括具有Q开关118的激光谐振器116。Q开关118例如是AOM或EOM。

[0030] 固有地,气体激光器110还包括气体增益介质120。在一个实施方案中,气体激光器110是CO_2或CO激光器并且增益介质120相应地包括CO_2或CO。至少当气体激光器110是CO_2或CO激光器时,气体激光器110还包括一个或多个电极,电极通过增益介质120施加高压电场以泵浦(激励)其中的CO_2或CO分子。在其他实施方案中,气体激光器110可以是具有长上态寿命的不同类型的气体激光器。气体激光器110可以包括位于增益介质120的相对侧上的电极122和124,以在气态增益介质120中产生放电。电极122耦合到高压RF源,并且电极124接地。

[0031] 在图1所示的实施例中,谐振器116是具有两个端镜112和114的线性谐振器,激光辐射190在两个端镜112和114之间来回传播。端镜114是具有部分反射率(例如在10%和90%之间的范围内)的输出耦合器。端镜112可以是具有至少99%反射率的高反射器。在装置100的其他实施例中,谐振器116是由多于两个反射镜限定的线性谐振器,其中激光辐射190的传播路径被折叠。在又一些实施例中,谐振器116是环形谐振器。

[0032] Q开关118放置在循环激光辐射190的传播路径中。电子电路160控制Q开关118的操作来以脉冲方式发出激光辐射190,使得气体激光器110输出脉冲式激光束192。更具体地,电子电路160操作Q开关118以使谐振器116在高损耗状态和低损耗状态之间反复地切换,以设置激光束192的激光脉冲192P的重复率。电子电路160能够通过以下方式改变激光束192的脉冲重复率:改变Q开关118在高损耗状态和低损耗状态之间切换谐振器116的速率。换句话说,电子电路160能够控制Q开关118以实现激光脉冲192P之间的周期T的值的范围。电子电路160可以接收指示激光脉冲192P的期望重复率的重复率输入188。电子电路160可以从外部控制系统或用户接收重复率输入188。

[0033] 电子电路160还被配置为控制和改变在谐振器116的低损耗状态下由Q开关118施加的损耗,以实现激光脉冲192P的目标能量。Q开关118、传感器150和电子电路160布置在有源反馈回路中以对激光脉冲192P的能量施加伺服控制。装置100分离激光束192的一部分196并将激光束部分196引导到传感器150。传感器150测量激光束部分196的激光脉冲的脉冲能量E(或相关参数)以获得激光脉冲192P的能量的量度(或指示其的另一参数)。传感器150将该脉冲能量测量结果传送至电子电路160,并且电子电路160相应地调整Q开关118的操作以达到目标脉冲能量,至少在一定容差内的目标脉冲能量。

[0034] 由传感器150测量的特性可以是激光束部分196的平均能量并且可以作为几个或多个激光脉冲192P的平均值来获得。在一种实施方式中,传感器150是热电堆传感器、光电导或光伏半导体传感器、或测辐射热传感器。替代地,传感器150可以足够快以测量激光束部分196中的各个脉冲的能量。装置100可以包括一个或多个分束器以从激光束192获得激光束部分196。

[0035] 电子电路160还被配置为根据需要控制由Q开关118限定的谐振器116的低损耗状态的持续时间,以调整激光脉冲192P的持续时间。电子电路160可以基于(a)激光脉冲192P的持续时间的测量结果或(b)脉冲重复率、目标脉冲能量、从传感器150获得的脉冲能量测量结果和目标脉冲持续时间中的一个或多个之间的预校准关系来执行该调整。

[0036] 尽管图1中未示出,电子电路160可以从外部系统或用户接收目标脉冲能量和目标脉冲持续时间。电子电路160可以包括分立电子部件、集成电路、微处理器和配备软件的计算机中的一个或多个。

[0037] 装置100的某些实施方案包括传感器152并将激光束192的一部分198引导至传感器152。传感器152从激光束部分198获得激光脉冲192P的持续时间w的测量结果并将该脉冲持续时间测量结果传送至电子电路160。然后,电子电路160可以基于脉冲持续时间测量结果来调节Q开关118的操作。传感器152可以完成有源反馈回路,该有源反馈回路允许对激光脉冲192P的持续时间进行伺服控制,以达到目标脉冲持续时间,至少在一定容差内达到目标脉冲持续时间。传感器152例如是记录各个激光脉冲192P的波形的高速光学检测器。

[0038] 装置100可以包括一个或多个分束器,以将激光束192的一部分分裂到传感器150并且任选地还分裂到传感器152。在如图1所示的实施例中,装置100包括(a)分束器130,其将激光束192的部分194分裂成朝向传感器150和152,以及(b)分束器132,其将部分194分裂成激光束部分196和198。可以在不包括传感器152的实施方案中省略分束器132。在不脱离其范围的情况下,装置100可以实施其他方案以从激光束192获得激光束部分196,并且任选地获得激光束部分198。

[0039] 电子电路160可以包括控制器162和驱动器164。驱动器164生成电驱动信号182并将驱动信号182提供给Q开关118以调制谐振器损耗。例如,当Q开关118是AOM时,驱动器164是RF驱动器并且驱动信号182是高压RF信号。通过驱动器164生成驱动信号182是由从控制器162接收的命令信号180指示的。命令信号180定义激光脉冲192P的重复率、处于低损耗状态的谐振器116的损耗以及低损耗状态的持续时间。对于任何给定的脉冲重复率,控制器162至少部分地基于从传感器150获得的脉冲能量测量结果并且任选地还基于从传感器152获得的脉冲持续时间测量结果来生成命令信号180。通过控制器162生成命令信号180还基于期望的脉冲重复率,例如由重复率输入188定义的脉冲重复率。

[0040] 在一个实施方案中,装置100被配置为主振荡器功率放大器(MOPA)。在该MOPA实施方案中,气体激光器110是主振荡器,并且装置100还包括放大激光束192的激光放大器170。在MOPA实施方案中,传感器150和传感器152(如果包括的话)可以被布置为在通过放大器170放大之前或之后在对激光束192进行采样。通常有利的是在放大之后对激光束192进行采样,如图1所示。当在放大之后分裂时,激光束192向传感器分裂的部分可能是微不足道的。当在放大之前进行分裂时,必须分裂激光束192的较大部分,并且对传送到应用(例如,激光加工)的激光束192的最终功率的影响可能是显著的。另外,由于放大的激光束192是MOPA的输出,对放大的激光束192的采样提供了对实际输出的更直接的评估,并且由电子电路160施加的控制可以补偿在放大器170中引起的效应。

[0041] 图2是用于对配备有AOM Q开关的激光谐振器进行Q开关的现有技术方案200的时序图。图2示出了与激光脉冲232的生成有关的三个曲线图210、220、230。曲线图210描绘了提供给用于驱动AOM的RF驱动器的命令信号212的时间演变。曲线图220描绘了由RF驱动器提供给AOM的RF驱动信号222的时间演变。RF驱动信号222由命令信号212定义。命令信号212的值V_C在两个值V_{high}和零之间切换。当$V_C = V_{high}$时,驱动信号222的RF电压V_{RF}具有幅度ΔV_{high},并且由AOM引起的相关衍射赋予谐振器损耗,使得激光谐振器处于高损耗状态。当V_C零时,V_{RF}为零,使得AOM关闭,从而将激光谐振器置于低损耗状态。

[0042] 曲线图230描绘了在激光谐振器中循环的激光功率P_L的时间演变。在方案200中,激光脉冲232由下降至$V_C = 0$的命令信号212的命令脉冲214生成。命令脉冲214具有在时间t_1处的前沿和时间t_2处的后沿之间的持续时间Δt。命令脉冲214的持续时间Δt定义了激光

谐振器的低损耗状态的持续时间。声学和光学延迟施加从时间t_1到激光脉冲232的延迟T_{delay}。声学延迟对应于AOM光学器件中的声波,该声波直到时间t_1为止生成,从换能器完全通过激光辐射190的路径传播。光学延迟对应于在通过通电谐振器的多次往返期间由受激发射“累积”的自发发射引发的激光辐射。在图2所示的场景中,声学延迟比光学延迟长,因此激光脉冲232在时间t_2之后生成。

[0043] 电子电路160能够根据现有技术方案200操作Q开关118。然而,现有技术方案200不提供脉冲均衡,并且激光脉冲192P的能量和持续时间将随着脉冲重复率而变化。

[0044] 图3示出了由装置100的实施方案生成的一组示例性激光脉冲,该装置100将Q开关118实现为AOM并且被限制为根据现有技术方案200进行操作。激光脉冲波形由被实现为高速光学检测器的传感器152记录,高速光学检测器检测并记录瞬时激光功率随时间的变化。在图3的实施例中,命令脉冲214的持续时间Δt是1.0μs。图3示出了在每个脉冲重复率1kHz、5kHz、10kHz、25kHz、50kHz、75kHz和100kHz下记录的所得激光脉冲波形。虽然脉冲重复率在1kHz至25kHz范围内激光脉冲波形基本保持不变,但当脉冲重复率增加到超过25kHz时,会发生显著变化。特别是,对于高于25kHz的脉冲重复率,脉冲能量表现出随脉冲重复率的强烈下降。此外,当脉冲重复率增加到25kHz以上时,激光脉冲的形状和持续时间会发生变化。以1-25kHz范围内的脉冲重复率产生的激光脉冲由主脉冲和随后的显著尾部310组成。当脉冲重复率增加到25kHz以上时,尾部310逐渐消失并且激光脉冲持续时间相应地减小。

[0045] 图4示出了由与图3的实施方案相同的装置100的实施方案生成的另一组示例性激光脉冲,但使用较短的命令脉冲214,与现有技术方案200有偏差。该技术在下文中被称为“脉冲修整”。在图4的实施例中,命令脉冲214的持续时间Δt是0.8μs。图4示出了在每个脉冲重复率1kHz、5kHz、10kHz、25kHz、50kHz、75kHz和100kHz下记录的所得激光脉冲波形。命令脉冲214从1.0μs减少到0.8μs基本上消除了所有测量的脉冲重复率处的尾部310。然而,当脉冲重复率增加到25kHz以上时,激光脉冲能量仍然急剧下降。因此,虽然脉冲修整可以帮助在一定范围的脉冲重复率上实现更均匀的激光脉冲持续时间和形状,但脉冲修整并不均衡激光脉冲能量。

[0046] 图5进一步探讨了在固定脉冲重复率下命令脉冲持续时间对激光脉冲能量和持续时间的影响。图5示出了在固定脉冲重复率下利用不同命令脉冲持续时间获得的激光脉冲波形。图5中的各激光脉冲波形由命令脉冲214的相应持续时间Δt来标记。以1.1μs的最长命令脉冲持续时间开始,激光脉冲波形呈现出实质上的基座状尾部。主脉冲的宽度约为0.2μs,基座状尾部将总激光脉冲持续时间延长了约0.5μs。随着命令脉冲持续时间从1.1μs减少,该尾部被截断,并在命令脉冲持续时间达到0.7μs时基本消除。当命令脉冲持续时间减少到0.7μs以下时,由于主脉冲宽度减少,激光脉冲持续时间进一步减少。此外,激光脉冲的峰值功率降低。

[0047] 图5数据表明,至少在某些脉冲重复率范围内,激光脉冲能量对低损耗状态的持续时间敏感。图5的数据还表明,至少在某些脉冲重复率范围内,只有相当窄范围的命令脉冲持续时间才能提供干净的无尾脉冲,同时保持主脉冲的全部能量。换句话说,存在“最佳”命令脉冲持续时间,并且即使与该最佳命令脉冲持续时间的相对较小的偏差也会产生显著的影响。我们发现,最佳命令脉冲持续时间随着脉冲重复率的增加而增加,至少对于高于特定

阈值率的脉冲重复率而言如此。

[0048] 图3、图4和图5的数据一起展示了由Q开关式气体激光器(例如气体激光器110)产生的激光脉冲的重复率、能量和持续时间之间的强耦合关系。这些关系的性质取决于由脉冲重复率、能量和持续时间跨越的三维参数空间中的位置。另外,这些关系对其他参数敏感,包括谐振器116、增益介质120和增益介质120的泵浦的特性。

[0049] 图6是用于对Q开关式气体激光器生成的激光脉冲进行双变量均衡的一种方法600的流程图。方法600可以应用于装置100并且克服图3-5的数据所示的问题,从而在较宽的脉冲重复率范围内提供均匀的激光脉冲能量和持续时间。方法600需要根据比现有技术方案200更先进的方案来操作Q开关。下面,在装置100的背景下讨论方法600。方法600包括并行执行的步骤610和620。

[0050] 在步骤610中,电子电路160操作Q开关118以使谐振器116在高损耗状态和低损耗状态之间反复地切换以生成脉冲式激光束192,如上面参考图1所讨论的。在步骤620中,电子电路160与传感器150协作,并且任选地还与传感器152协作,以在脉冲重复率范围内均衡激光脉冲192P的能量和持续时间。

[0051] 步骤620包括步骤630和632。在步骤630中,传感器150对激光束192进行采样以获得指示激光脉冲192P的能量的测量结果,如上面参考图1所讨论的。步骤630可以实现获得该脉冲能量测量结果作为多个激光脉冲192P上的平均值的步骤634。在步骤632中,电子电路160基于在步骤630中获得的脉冲能量测量结果来调整谐振器116的低损耗状态的损耗水平,以实现或至少接近目标脉冲能量。步骤630和632可以在有源反馈环路中迭代地执行,以实现目标脉冲能量。在实施例场景中,步骤620实现了在目标脉冲能量的10%以内的激光脉冲能量,其中激光脉冲能量被评估为单个激光脉冲的能量或多个激光脉冲的平均能量。

[0052] 图7是方法600用于对气体激光器110进行Q开关的一种方案700的时序图。方案700是方案200的修改,其能够实现脉冲能量均衡和脉冲持续时间均衡。图7示出了利用AOM执行Q开关的实施方案的方案700。方案700很容易适用于其他类型的Q开关,例如EOM。图7的曲线图720和730提供了步骤632的更详细的实施例。曲线图720描绘了由电子电路160提供给AOM的RF驱动信号722的时间演变。与方案200的RF驱动信号222相比,RF驱动信号722在谐振器116的低损耗状态期间不一定为零。相反,RF驱动信号722通常在低损耗状态期间具有非零幅度ΔV_{low},并且电子电路160基于在步骤630中由传感器150获得的脉冲能量测量结果来调整ΔV_{low}的值。

[0053] 曲线图730描绘了在谐振器116中循环的激光功率P_L的时间演变。当AOM由RF驱动信号722驱动时,RF驱动信号722从幅度ΔV_{high}下降到非零幅度ΔV_{low}导致激光脉冲732的生成。与当将RF驱动信号一直下降到零时生成的激光脉冲232(参见图2)相比,激光脉冲732具有较低的峰值功率P_{peak}和较低的脉冲能量E。脉冲能量E(和峰值功率P_{peak})的减少是AOM在谐振器116的低损耗状态期间赋予非零衍射损耗的结果。在步骤632中,电子电路160根据需要调整ΔV_{low}以实现目标脉冲能量。例如,当从传感器150获得的脉冲能量测量结果表明激光脉冲192P的能量超过目标脉冲能量时,电子电路160可以增加ΔV_{low}以增加谐振器116的低损耗状态的损耗。相反,当从传感器150获得的脉冲能量测量结果表明激光脉冲192P的能量小于目标脉冲能量时,电子电路160可以降低ΔV_{low}。

[0054] 方法600的步骤620还包括步骤642,其中电子电路160调整谐振器116的低损耗状

态的持续时间以实现或至少接近目标脉冲持续时间。图7的曲线图720和730提供了步骤642的更详细的实施例。在该实施例中,电子电路160调整具有幅度ΔV_{low}的RF驱动信号722的持续时间Δt。在另一实施例中,电子电路160减少持续时间Δt以防止激光脉冲732具有尾部,或增加持续时间Δt以最大化激光脉冲732的主脉冲中的能量。在又一实施例中,电子电路160调整持续时间Δt以实现目标脉冲持续时间,例如某个半高全宽(FWHM)脉冲持续时间。

[0055] 在步骤620的一个实施方案中,步骤642之前是步骤640A,其中传感器152对激光束192进行采样以获得指示激光脉冲192P的持续时间的测量结果,如上面参考图1所讨论的。步骤640A可以实现从单个激光脉冲192P获得该脉冲持续时间测量结果或者作为若干个单脉冲持续时间的平均值的步骤644。当步骤620包括步骤640A时,步骤642基于在步骤640A中获得的脉冲持续时间测量结果。该实施方案可以在主动反馈环路中迭代地执行步骤640A和642。由步骤640A和642进行的脉冲持续时间反馈环路可以比由步骤630和632进行的脉冲能量反馈环路更快,特别是当激光脉冲持续时间是从单个或仅几个激光脉冲192P。的测量获得时。在实施例场景中,步骤620实现了在目标脉冲持续时间的10%以内的激光脉冲持续时间。

[0056] 在步骤620的另一实施方案中,步骤642之前是步骤640B,其中电子电路160计算谐振器116的低损耗状态的期望持续时间Δt,或者从查找表检索期望持续时间Δt。电子电路160可以根据(a)目标脉冲持续时间和(b)持续时间Δt和脉冲重复率之间的预先校准的函数关系以及任选地气体激光器110的一个或多个其他参数和/或目标脉冲能量来计算期望的持续时间Δt。例如,通过以线性地取决于激光脉冲192P之间的周期T(相当于脉冲重复率的倒数)的方式调整持续时间Δt,可以在一定范围的脉冲重复率上实现恒定的激光脉冲持续时间。替代地,作为目标脉冲持续时间、脉冲重复率以及任选地气体激光器110的一个或多个其他参数和/或目标脉冲能量的函数的预校准持续时间Δt可以列在电子电路160中所包括的查找表中。

[0057] 在一种场景中,步骤610包括改变激光脉冲192P的重复率的步骤612。在这种场景中,方法600响应于步骤612中实现的重复率改变而执行步骤632,并且任选地执行步骤642,以便最小化由重复率改变引起的激光脉冲能量和激光脉冲持续时间的改变。

[0058] 在电子电路160包括控制器162和驱动器164的实施方案中,方案700的执行需要驱动器164生成RF驱动信号722(驱动信号182的示例)。驱动器164根据控制器162生成的命令信号180来生成RF驱动信号722。图7的曲线图710示出了命令信号712的时间演变。命令信号712是可以使驱动器164生成RF驱动信号722的命令信号的一个示例。命令信号712是在高值V_{high}和低值V_{low}之间交替的电压V_C。当$V_C=V_{high}$时,V_{RF}的幅度为ΔV_{high}。当$V_C=V_{low}$时,V_{RF}的幅度为ΔV_{low}。V_{low}的值是决定ΔV_{low}值的信号值。每个激光脉冲192P在由信号值V_{low}表征的命令脉冲714之后生成。V_{low}的值控制ΔV_{low}的值,从而控制激光脉冲192P的能量。

[0059] 控制器162可以通过将连续命令脉冲714的前沿714L之间的周期设置为期望脉冲重复率的倒数来设置激光脉冲192P的重复率。在这种情况下,控制器162通过调整命令脉冲714的后沿714T的时间位置来调整谐振器116的低损耗状态的持续时间Δt。

[0060] 命令信号712包含定时信息(时间t_1和t_2)和可变电压V_{low}。替代地,控制器162可产生命令信号作为两个单独的分量:定时信号和可变DC电压。定时信号可以是包含类似于命令脉冲714但具有恒定信号值V_{low}的TTL脉冲的晶体管-晶体管逻辑(TTL)信号。可变DC电压

可以是模拟信号,例如值V_{low}的DC电压,其指示幅度ΔV_{low}或RF驱动信号722。通常,商业RF驱动器被配置用于数字控制,而不是模拟控制。命令信号可以是数字信号,包括数字编码的时间t_1、延迟Δt、电压值ΔV_{high}和电压值ΔV_{low}。

[0061] 图8示出了当根据方案700利用双变量脉冲均衡来操作装置100并且基于来自传感器150和152的测量结果来实现激光脉冲能量和激光脉冲持续时间两者的动态调整时生成的激光脉冲192P的示例。为了比较,图8还示出了当根据现有技术方案200在没有脉冲均衡的情况下操作装置100时生成的激光脉冲的示例。图8描绘了由传感器152测量的六个激光脉冲波形的示波器迹线。迹线810、820和830是使用现有技术方案200以相应的脉冲重复率10kHz、50kHz和100kHz获得的。因此,对于迹线810、820和830,V_{low}保持为零并且持续时间Δt保持恒定。迹线812、822和832也在各自的脉冲重复率10kHz、50kHz和100kHz下获得,但是使用根据方案700的脉冲均衡以及利用对信号值V_{low}和持续时间Δt两者的动态调整。

[0062] 迹线810、820和830的测量脉冲能量分别为704微焦耳(μJ)、542μJ和355μJ,并且相应的FWHM脉冲持续时间为105纳秒(ns)、118ns和117ns。很明显,在没有脉冲均衡的情况下,当脉冲重复率从10kHz增加到100kHz时,脉冲能量会发生巨大变化。相反,当根据方案700实现脉冲均衡时,对于所有三个脉冲重复率获得基本上相同的激光脉冲波形,如从迹线812、822和832明显看出的。利用脉冲均衡,在10kHz、50kHz和100kHz处测量的脉冲能量分别为250μJ、254μJ和262μJ。此外,三个脉冲中的每一个的FWHM脉冲持续时间均为99ns。

[0063] 图9A和图9B分别示出了具有和不具有双变量脉冲均衡的三种不同脉冲重复率10kHz、50kHz和100kHz的激光脉冲能量和激光脉冲持续时间的示例。数据集910是在没有脉冲均衡的情况下获得的,即$\Delta V_{low}=0$且Δt为常数。数据集920和930是根据方案700使用双变量脉冲均衡获得的,其中ΔV_{low}和Δt都基于从传感器150和152获得的测量结果而进行动态调整。在数据集920的情况下,目标脉冲能量E_{target}为340μJ,目标脉冲持续时间w_{target}为99ns。在数据集930的情况下,目标脉冲能量E_{target}为250μJ并且目标脉冲持续时间w_{target}为117ns。

[0064] 数据集910显示,在没有脉冲均衡的情况下,激光脉冲能量随着脉冲重复率的增加而迅速降低,从10kHz到100kHz降低了2倍。此外,激光脉冲持续时间以一种不明显的方式对脉冲重复率高度敏感。相反,如数据集920和930中所见,双变量脉冲均衡非常有效。在所有三种脉冲重复率下均达到了目标脉冲持续时间,并且脉冲能量变化很小。对于两种不同的目标脉冲能量340和250μJ中的每一种,测量的每个激光脉冲能量均在目标脉冲能量的5%以内。

[0065] 图10A示出了一种RF驱动器1000,其可以被实现为装置100的实施方案中的驱动器164,其中Q开关118是AOM。图10B示出了控制RF驱动器1000的示例性命令信号1080。RF驱动器1000包括RF振荡器1010、混频器1020和放大器1040。RF振荡器1010生成RF信号。混频器1020接收该RF信号并且进一步在混频器1020的“IF”端口处接收命令信号1080。命令信号1080是由命令信号712的连续实例组成以定义激光脉冲192P的重复率、V_{low}和持续时间Δt的可变模拟电压V_{VA}(见图7)。命令信号1080由控制器162的示例生成。混频器1020根据命令信号1080调制来自RF振荡器1010的RF信号。放大器1040放大该调制的RF信号以生成用于驱动AOM Q开关的RF驱动信号1082。RF驱动信号1082相当于RF驱动信号722的连续实例。RF驱动器1000还可以包括低通滤波器1030,其滤除混频器1020生成的不期望的谐波。

[0066] 图11A示出了被配置为接收单独的定时和电压输入的另一个RF驱动器1100。图11B示出了控制RF驱动器1100的定时方面的示例性定时命令信号1180。除了还包括耦合到混频器1020的IF端口的数控模拟开关1150之外,RF驱动器1100类似于RF驱动器1000。模拟开关1150具有两个模拟电压输入端口。一个端口保持在电压V_{high},而另一个端口从控制器162的示例接收V_{low}。模拟开关1150还从控制器162接收单独的定时命令信号1180。定时命令信号1180除了是一个仅获得两个值的数字信号,即低值和高值,而不携带有关V_{low}的信息之外,类似于命令信号1080。模拟开关1150根据定时命令信号1180在V_{high}和V_{low}之间切换,从而产生命令信号1080。

[0067] 图12示出了一种具有激光脉冲能量和激光脉冲持续时间两者的伺服控制的用于双变量脉冲均衡的控制器1200。控制器1200是控制器162的实施方案并且可以与RF驱动器1100一起在电子电路160中实现。控制器1200从传感器150接收激光束192的平均功率测量值P_{AVE}以及从传感器152接收激光脉冲192P的激光脉冲波形。激光脉冲波形是作为时间的函数的瞬时激光功率$P_{INST}(t)$。控制器1200处理P_{AVE}和$P_{INST}(t)$以分别生成V_{low}和定时命令信号1180,然后将V_{low}和定时命令信号1180传送到RF驱动器1100。P_{AVE}的处理用于实现目标脉冲能量E_{target},$P_{INST}(t)$的处理用于实现目标脉冲持续时间w_{target}。(激光脉冲能量和激光脉冲持续时间之间可能存在某种程度的耦合,如上面参考图3-5所讨论的。)

[0068] 为了脉冲能量均衡的目的,控制器1200包括脉冲能量计算器1210、求和节点1220和比例-积分-微分(PID)控制器1230。脉冲能量计算器1210根据平均功率测量值P_{AVE}和脉冲重复率f_{rep}来计算脉冲能量E。脉冲重复率f_{rep}可以从外部源/信号接收或者在控制器1200内部定义。求和节点1220评估计算的脉冲能量E与目标脉冲能量E_{target}之间的差ΔE,并且生成指示ΔE的误差信号。PID控制器1230然后确定并输出新的V_{low}以减小ΔE。

[0069] PID控制只是装置100和方法600可以采用的反馈算法的一个实施例。替代地,装置100和方法600可以采用本领域已知的不同反馈算法。因此,PID控制器1230可以由采用不同原理的另一种类型的伺服控制器来代替,以最小化误差信号。

[0070] 为了脉冲持续时间均衡的目的,控制器1200包括波形分析器1250和定时信号发生器1260。波形分析器1250分析激光脉冲波形$P_{INST}(t)$以导出激光脉冲持续时间w。定时信号发生器1260然后将测量的激光脉冲持续时间w与目标脉冲持续时间w_{target}进行比较,并且调整定时命令信号1180以最小化它们之间的差异。具体地,定时信号发生器1260调整持续时间Δt,如上面参考图6和图7所讨论的。定时信号发生器1260然后将定时命令信号1180传送到RF驱动器1100。

[0071] 尽管V_{low}的调整的每次迭代基于一系列激光脉冲192P的采样,但是定时命令信号1180的调整的每次迭代可以基于单个激光脉冲192P并且因此可以在短得多的时间尺度上执行。

[0072] 上述基于图7、图10A、图10B、图11A、图11B和图12的讨论涉及基于AOM的Q开关。通过相应地改变Q开关的驱动信号,可以针对其他类型的Q开关修改这些实施方案。例如,当Q开关118是EOM时,上面讨论的RF驱动信号被DC驱动信号替代。

[0073] 以上通过优选实施方案和其他实施方案对本发明进行了描述。然而,本发明不限于本文描述和描绘的实施方案。相反,本发明仅受所附权利要求书的限制。

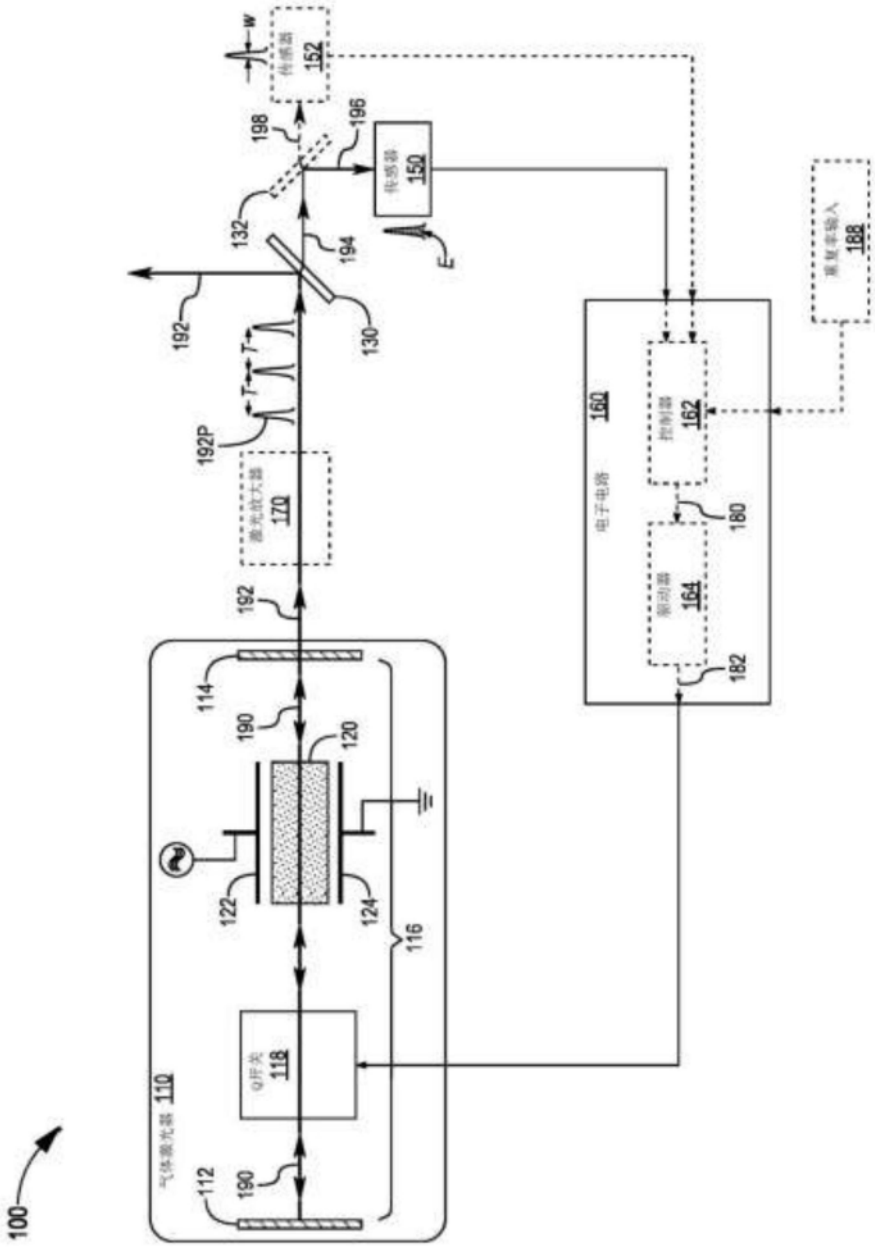

W
传感器
152
198
196
传感器
150
132
194
E
192
130
T
T
192P
激光放大器
170
192
114
190
120
122
124
116
气体激光器
110
Q开关
118
112
190
100
电子电路
160
控制器
162
180
驱动器
164
182
188

图1

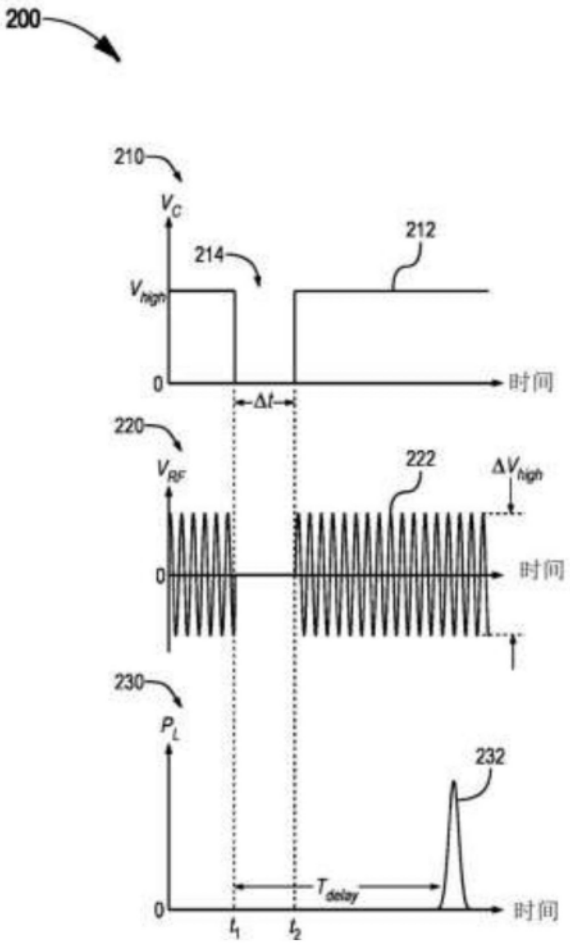

200
210
V_C
214
212
V_{high}
0
时间
Δt
220
V_{RF}
222
ΔV_{high}
0
时间
230
P_L
232
T_{delay}
0
时间
t_1
t_2

图2(现有技术)

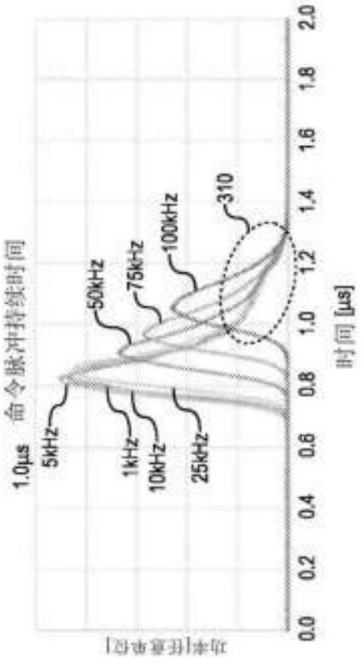

1.0μs 命令脉冲持续时间
5kHz
50kHz
75kHz
100kHz
310
1kHz
10kHz
25kHz
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6
1.8
2.0
时间 [μs]

图3

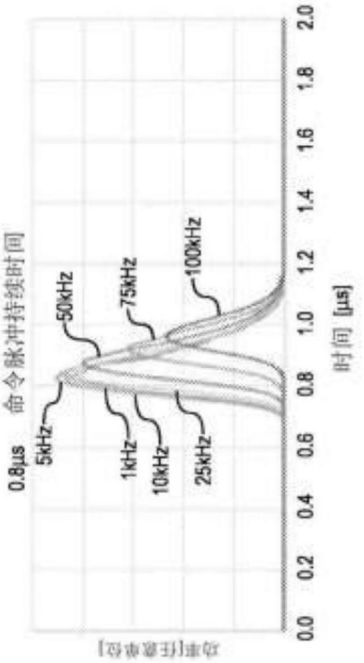

0.8μs 命令脉冲持续时间
5kHz
50kHz
75kHz
100kHz
1kHz
10kHz
25kHz
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6
1.8
2.0
时间 [μs]

图4

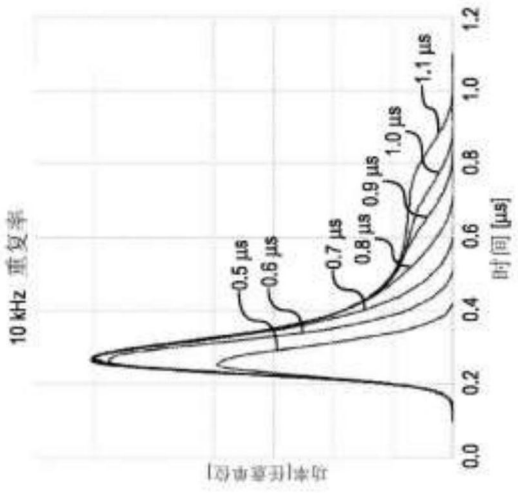

10 kHz 重复率
0.5 µs
0.6 µs
0.7 µs
0.8 µs
0.9 µs
1.0 µs
1.1 µs
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
时间 [µs]

图5

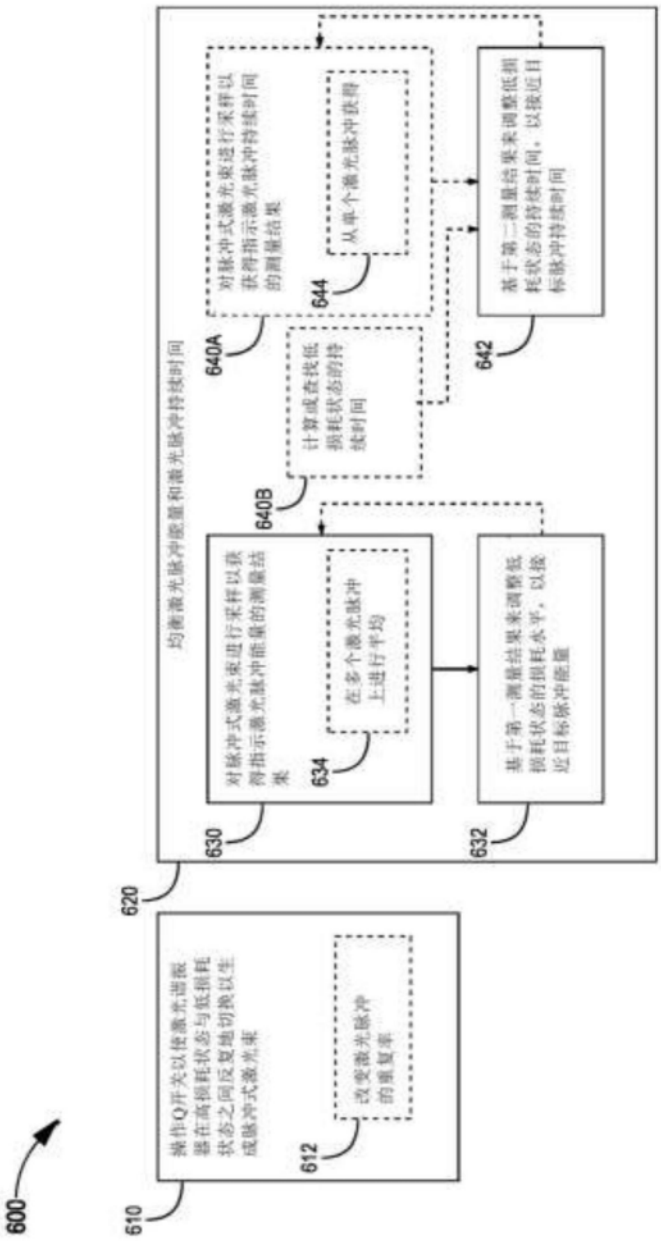

600
610
操作Q开关以使激光谐振器在高损耗状态与低损耗状态之间反复地切换以生成脉冲式激光束
612
改变激光脉冲的重复率
620
均衡激光脉冲能量和激光脉冲持续时间
630
对脉冲式激光束进行采样以获得指示激光脉冲能量的测量结果
634
在多个激光脉冲上进行平均
632
基于第一测量结果来调整低损耗状态的损耗水平，以接近目标脉冲能量
640A
对脉冲式激光束进行采样以获得指示激光脉冲持续时间的测量结果
644
从单个激光脉冲获得
640B
计算或查找低损耗状态的持续时间
642
基于第二测量结果来调整低损耗状态的持续时间，以接近目标脉冲持续时间

图6

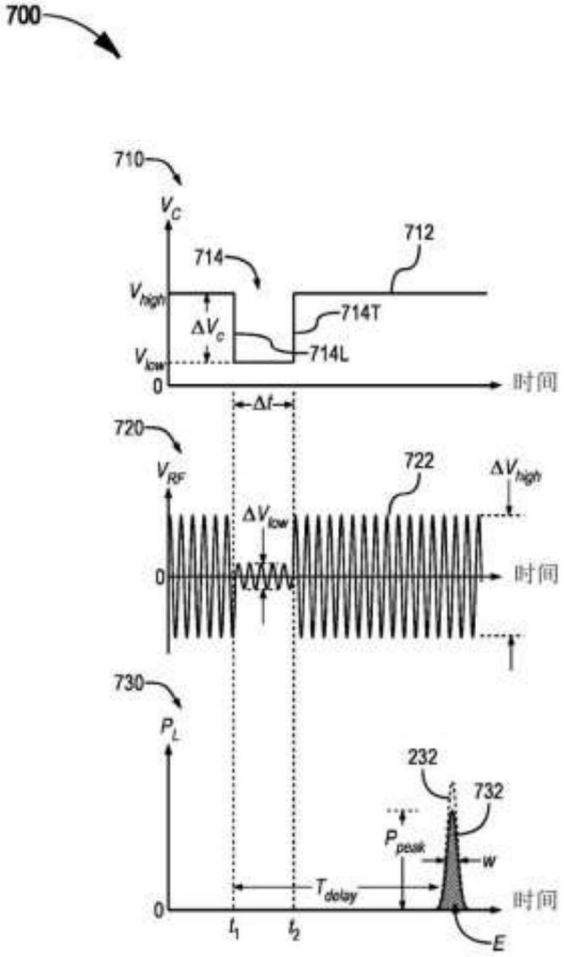

700
710
V_C
712
714
V_{high}
ΔV_C
714T
714L
V_{low}
0
时间
Δt
720
V_{RF}
722
ΔV_{high}
ΔV_{low}
0
时间
730
P_L
232
732
P_{peak}
w
T_{delay}
0
时间
t_1
t_2
E

图7

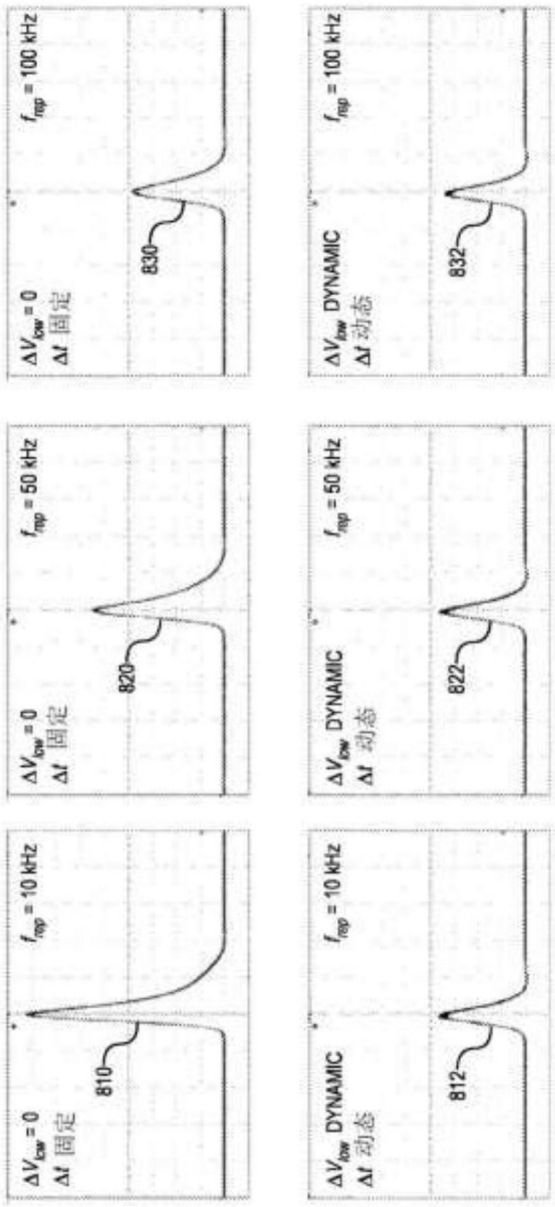

f_{rep} = 100 kHz
ΔV_{ICW} = 0
Δt 固定
830
f_{rep} = 100 kHz
ΔV_{ICW} DYNAMIC
Δt 动态
832
f_{rep} = 50 kHz
ΔV_{ICW} = 0
Δt 固定
820
f_{rep} = 50 kHz
ΔV_{ICW} DYNAMIC
Δt 动态
822
f_{rep} = 10 kHz
ΔV_{ICW} = 0
Δt 固定
810
f_{rep} = 10 kHz
ΔV_{ICW} DYNAMIC
Δt 动态
812

图8

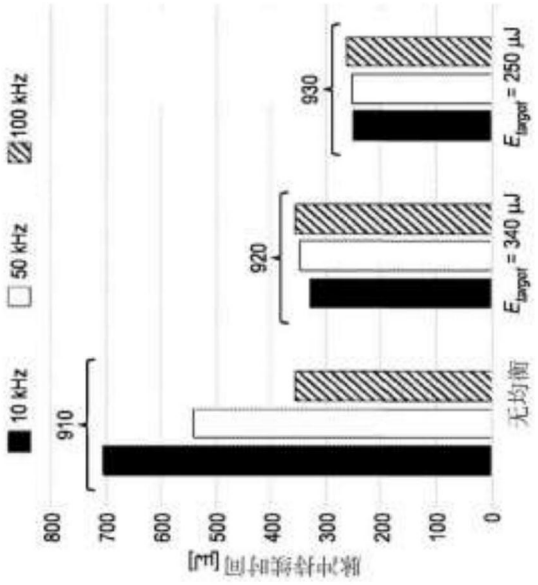

100 kHz
50 kHz
10 kHz
910
920
930
无均衡
E_{target} = 340 µJ
E_{target} = 250 µJ
脉冲持续时间 [µJ]
800
700
600
500
400
300
200
100
0

图9A

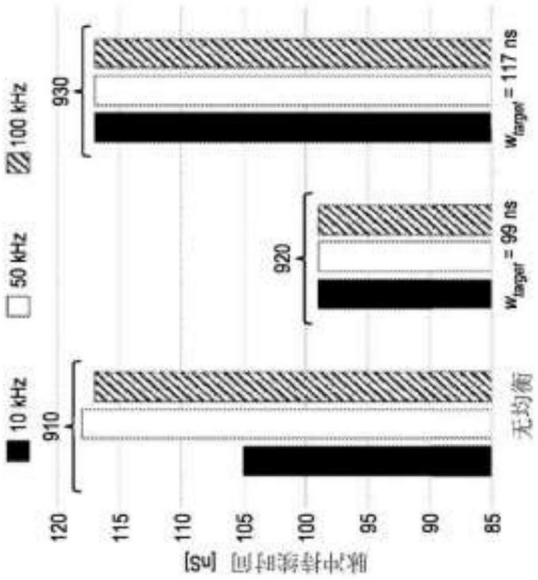

100 kHz
50 kHz
10 kHz
910
920
930
无均衡
w_{target} = 99 ns
w_{target} = 117 ns
脉冲持续时间 [ns]
120
115
110
105
100
95
90
85

图9B

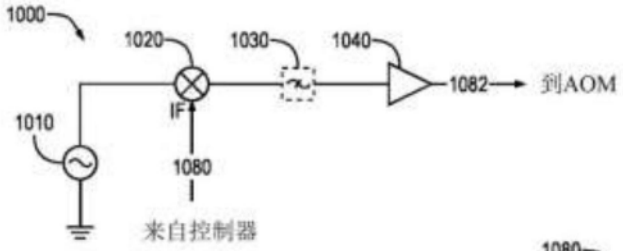


图10A

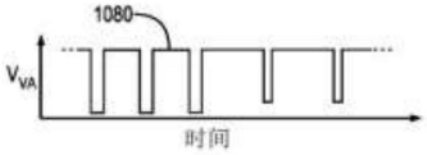


图10B

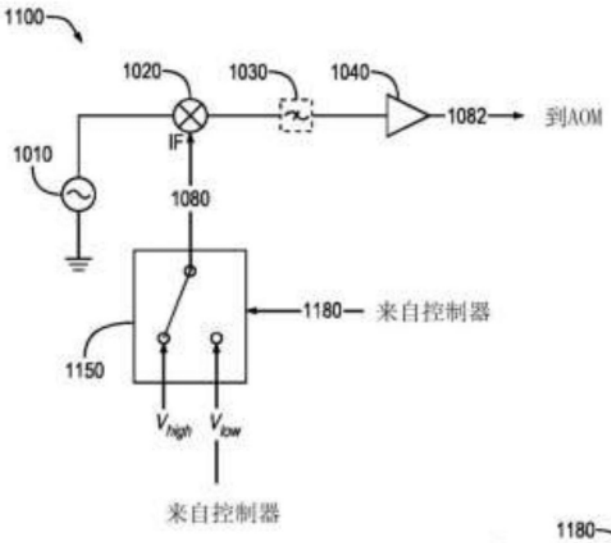


图11A

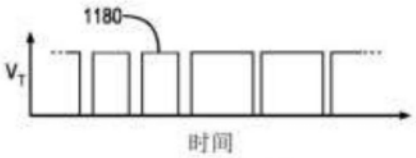


图11B

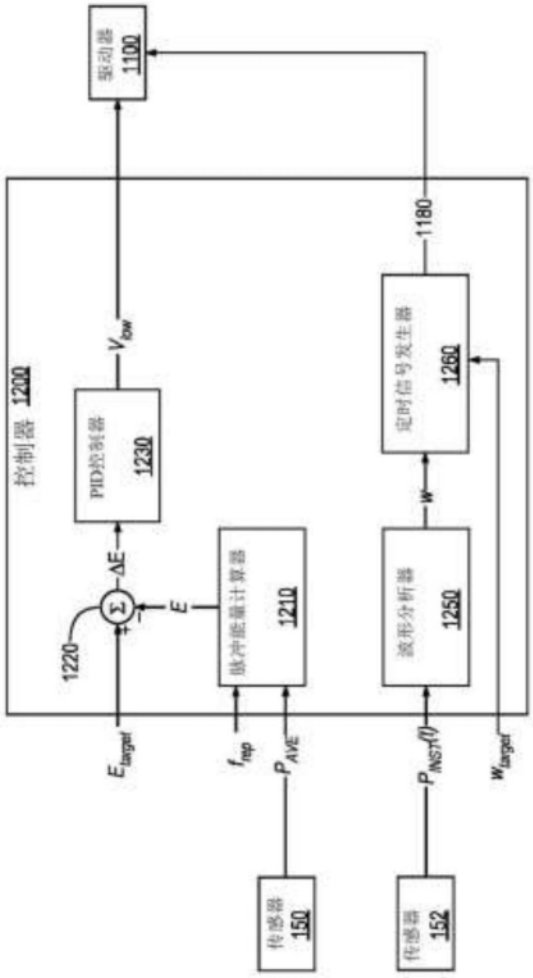

驱动器
1100
控制器 1200
PID控制器
1230
V_{bw}
ΔE
E
1220
脉冲能量计算器
1210
波形分析器
1250
W
定时信号发生器
1260
1180
E_{target}
f_{rep}
P_{AVE}
$P_{INST(t)}$
W_{target}
传感器
150
传感器
152

图12