(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 104025398 B
(45)授权公告日 2017.02.15

(21)申请号 201280038705.1
(22)申请日 2012.08.01
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104025398 A
(43)申请公布日 2014.09.03
(30)优先权数据
13/204,429 2011.08.05 US
(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2014.02.07
(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2012/049134 2012.08.01
(87)PCT国际申请的公布数据
WO2013/022667 EN 2013.02.14

(73)专利权人 相干公司
地址 美国加利福尼亚州
(72)发明人 A·W·希尔 李成全 P·费鲁
(74)专利代理机构 余姚德盛专利代理事务所（普通合伙）33239
代理人 戚秋鹏

(51)Int.Cl.
H01S 3/00(2006.01)
H01S 3/23(2006.01)
审查员 郝荣飞

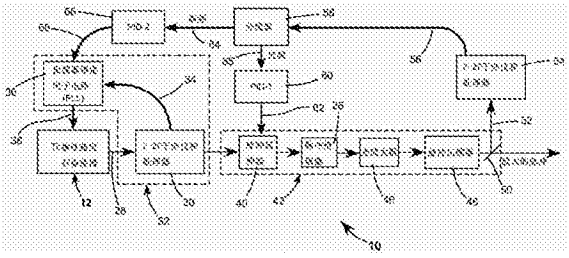
权利要求书4页 说明书6页 附图5页

(54)发明名称

主振荡器光放大器系统的载波包络相位稳定性

(57)摘要

激光器(12)和放大器(42)的组合在预定脉冲重复频率PRF下传递光脉冲序列。干涉仪(54)产生代表具有与PRF对应的间隔的脉冲的载波包络相位(CEP)的信号。信号(56)包括从DC至PRF的频率分量。该信号(56)被分成高(64)和低频率(65)范围。高和低频率范围(64,65)被发送至单独的高频(64)和低频(60)控制电子装置，其分别驱动高频CEP控制器(36)和低频控制器(40)以稳定序列中的脉冲的CEP。



CN 104025398 B

1.一种光学设备，包括：

振荡器装置，其包括用于产生锁模光脉冲的激光腔，从所述锁模光脉冲中选择具有预定脉冲重复频率的序列用于放大；

光学放大器装置，用于放大被选择用于放大的光脉冲序列并传递相应的放大后的脉冲序列；

干涉仪，用于以小于或等于光脉冲序列的脉冲重复频率的最大频率周期性地产生第一信号，所述第一信号代表放大后的脉冲序列中的脉冲的瞬态载波包络相位；

分频器，用于将第一信号划分成第二和第三信号，第二信号包括介于直流与小于最大频率的第一频率之间的第一范围内的频率分量，第三信号包括介于小于最大频率的第二频率与最大频率之间的第二范围内的频率分量；

慢响应载波包络相位控制器和快响应载波包络相位控制器，用于调节放大后的脉冲序列中的脉冲的载波包络相位，每个载波包络相位控制器都处于振荡器装置的激光腔的外部；

慢响应载波包络相位控制器被布置用于接收第二信号，快响应载波包络相位控制器被布置用于接收第三信号，慢响应载波包络相位控制器和快响应载波包络相位控制器被布置成分别产生第一和第二控制信号，第一和第二控制信号的每一个都表示放大后的脉冲序列中的脉冲的瞬态与期望载波包络相位之间的差异，以及

其中第一和第二控制信号用于使得放大后的脉冲序列中的脉冲的瞬态与期望载波包络相位之间的差异最小。

2.根据权利要求1所述的设备，其中第一和第二频率相等。

3.根据权利要求1所述的设备，其中第一频率小于第二频率。

4.根据权利要求1所述的设备，其中快响应载波包络相位控制器被布置成响应于第三信号而调节用于调节放大后的脉冲的载波包络相位的振荡器装置的激光腔所传递的锁模光脉冲的载波包络相位。

5.根据权利要求4所述的设备，其中振荡器装置的激光腔被泵激光器传递的泵光束光学泵浦，而且快响应载波包络相位控制器可选可变调制器，用于可选地调节用于改变激光腔所传递的锁模光脉冲的载波包络相位的泵光束。

6.根据权利要求4所述的设备，其中慢响应载波包络相位控制器被布置成响应于第二信号而在用于调节放大后的脉冲的载波包络相位的放大之前调节脉冲序列中的脉冲的载波包络相位。

7.根据权利要求4所述的设备，其中慢响应载波包络相位控制器被布置成响应于第二信号而在用于调节放大后的脉冲的载波包络相位的放大之后调节脉冲序列中的脉冲的载波包络相位。

8.根据权利要求1所述的设备，其中振荡器装置的激光腔在比脉冲序列中的脉冲预定脉冲重复频率大的脉冲重复频率下传递锁模光脉冲，而且振荡器装置包括用于从锁模光脉冲中选择光脉冲序列的脉冲拾取器。

9.根据权利要求8所述的设备，其中锁模光脉冲的脉冲重复频率是80兆赫，脉冲序列的预定脉冲重复频率是10千赫。

10.根据权利要求8所述的设备，其中放大器装置包括用于使将被放大的脉冲的持续时

间在放大之前延伸的脉冲延伸器、用于提供放大的光学放大器、以及用于缩短放大后的脉冲的持续时间的脉冲压缩器，而且其中脉冲拾取器处于脉冲延伸器和光学放大器之间。

11.根据权利要求10所述的设备，其中光学放大器是再生式放大器。

12.根据权利要求10所述的设备，其中脉冲延伸器和脉冲压缩器之一还额外地起到慢响应载波包络相位控制器的作用。

13.根据权利要求10所述的设备，其中脉冲延伸器还额外地起到慢响应载波包络相位控制器的作用。

14.根据权利要求1所述的设备，其中慢响应载波包络相位控制器和快响应载波包络相位控制器是PID控制器。

15.一种光学设备，包括：

振荡器装置，其包括用于产生锁模光脉冲的激光腔，从所述锁模光脉冲中选择具有预定脉冲重复频率的序列用于放大，激光腔被来自泵激光器的泵光束光学泵浦，泵激光器具有处于泵激光器和激光腔之间的泵光束中的可选的可变调制器；

线性调频脉冲光学放大器装置，用于放大被选择用于放大的光脉冲序列并传递相应的放大后的脉冲序列，线性调频脉冲光学放大器装置包括用于在放大之前延伸脉冲的持续时间的脉冲延伸器、用于放大延伸后的脉冲的光学放大器、以及用于压缩放大后的延伸过的脉冲的脉冲压缩器；

干涉仪，用于以小于或等于光脉冲序列的脉冲重复频率的最大频率周期性地产生第一信号，所述第一信号代表放大后的脉冲序列中的脉冲的瞬态载波包络相位；

分频器，用于将第一信号划分成第二和第三信号，第二信号包括介于直流与小于最大频率的第一频率之间的第一范围内的频率分量，第三信号包括介于小于最大频率的第二频率与最大频率之间的第二范围内的频率分量；

慢响应载波包络相位控制器和快响应载波包络相位控制器，用于调节放大后的脉冲序列中的脉冲的载波包络相位，每个载波包络相位控制器都处于振荡器装置的激光腔的外部，其中脉冲压缩器和脉冲延伸器之一具有起到慢响应载波包络相位控制器的作用的可选的可变色散、以及起到快响应载波包络相位控制器的作用的可选的可变泵光束调制器；

慢响应载波包络相位控制器被布置用于接收第二信号，快响应载波包络相位控制器被布置用于接收第三信号，慢响应载波包络相位控制器和快响应载波包络相位控制器被布置成分别产生第一和第二控制信号，第一和第二控制信号的每一个都表示放大后的脉冲序列中的脉冲的瞬态与期望载波包络相位之间的差异，以及

其中第一和第二控制信号被用于使得放大后的脉冲序列中的脉冲的瞬态与期望载波包络相位之间的差异最小。

16.根据权利要求15所述的设备，其中具有预定脉冲重复频率的脉冲序列由位于脉冲压缩器和光学放大器之间的脉冲拾取器从激光腔所传递的锁模光脉冲中选取。

17.根据权利要求15所述的设备，其中光学放大器是再生式放大器。

18.一种激光器系统，包括：

锁模激光器，其产生锁模光脉冲；

脉冲延伸器，用于延伸锁模光脉冲；

光学放大器，用于放大锁模光脉冲；

脉冲压缩器，用于压缩放大后的脉冲；

检测器，用于测量压缩后的脉冲的载波包络相位并且产生与之对应的第一输出信号；

分离器，用于从检测器接收第一输出信号，并且产生第二和第三输出信号；

第一控制器，用于响应于第二输出信号的变化而产生第一反馈信号，所述第一反馈信号用于控制锁模激光器，所述第一反馈信号具有第一频率范围；以及

第二控制器，用于响应于第三输出信号的变化而产生第二反馈信号，所述第二反馈信号具有低于第一频率范围的第二频率范围，所述第二反馈信号用于控制脉冲延伸器或脉冲压缩器中的一个。

19.根据权利要求18所述的激光器系统，其所述分离器是分频器。

20.根据权利要求18所述的激光器系统，其中第二和第三输出信号中的每个都通过一个单独的分频器。

21.根据权利要求20所述的激光器系统，其中第一频率范围和第二频率范围重叠。

22.根据权利要求18所述的激光器系统，其中接收第二反馈信号的脉冲延伸器或脉冲压缩器包括至少一个光栅，而且其中响应于第二反馈信号来调节光栅的角度。

23.根据权利要求18所述的激光器系统，其中接收第二反馈信号的脉冲延伸器或脉冲压缩器包括一对隔开的光栅，而且其中响应于第二反馈信号来调节光栅之间的距离。

24.根据权利要求18所述的激光器系统，其中锁模激光器包括由通过泵激光器传递的泵光束泵浦的光腔，泵光束在进入腔之前通过了可变调制器，而且其中第一反馈信号被提供可变调制器。

25.根据权利要求24所述的激光器系统，其中可变调制器是声光调制器。

26.一种激光器系统，包括：

锁模激光器，其产生锁模光脉冲；

脉冲延伸器，用于延伸锁模光脉冲；

光学放大器，用于放大锁模光脉冲；

脉冲压缩器，用于压缩放大后的脉冲；

检测器，用于测量压缩后的脉冲的载波包络相位并产生与之对应的第一输出信号；

分离器，用于从检测器接收第一输出信号，并且产生第二和第三输出信号；

第一控制器，其响应于第二输出信号的变化而产生第一反馈信号，所述第一反馈信号用于控制从锁模激光器传递至光学放大器的脉冲的载波包络相位，第一反馈信号具有第一频率范围；以及

第二控制器，用于响应于第三输出信号的变化而产生第二反馈信号，所述第二反馈信号用于控制脉冲延伸器或脉冲压缩器中的一个，所述第二反馈信号具有低于第一频率范围的第二频率范围，所述第二反馈信号控制压缩后的脉冲的载波包络相位。

27.根据权利要求26所述的激光器系统，其中所述分离器是分频器。

28.根据权利要求26所述的激光器系统，其中第二和第三输出信号中的每个都通过一个单独的分频器。

29.根据权利要求28所述的激光器系统，其中第一频率范围和第二频率范围重叠。

30.根据权利要求26所述的激光器系统，其中接收第二反馈信号的脉冲延伸器或脉冲压缩器包括至少一个光栅，而且其中响应于第二反馈信号来调节光栅的角度。

31.根据权利要求26所述的激光器系统，其中接收第二反馈信号的脉冲延伸器或脉冲压缩器包括一对隔开的光栅，而且其中响应于第二反馈信号来调节光栅之间的距离。

32.根据权利要求26所述的激光器系统，其中锁模激光器包括由通过泵激光器传递的泵光束泵浦的光腔，泵光束在进入腔之前通过了可变调制器，而且其中第一反馈信号被提供可变调制器。

33.一种操作激光器系统的方法，所述激光器系统包括用于产生激光脉冲的锁模激光器，激光脉冲被提供给脉冲延伸器，脉冲延伸器被放大器跟随并且被脉冲压缩器跟随，所述方法包括：

监控从脉冲压缩器出来的脉冲的载波包络相位，并产生与之对应的第一输出信号；

将第一输出信号划分成第二和第三输出信号；

根据监控到的载波包络相位来基于第二和第三输出信号创建分开的第一和第二反馈信号，所述第一和第二反馈信号分别具有第一和第二频率范围，其中第一频率范围在频率方面高于第二频率范围；

根据第一反馈信号调节锁模激光器的载波包络相位；以及

将第二反馈信号提供给脉冲延伸器或脉冲压缩器中的一个以调节压缩后的脉冲的载波包络相位。

34.根据权利要求33所述的方法，其中第二和第三输出信号由分频器产生。

35.根据权利要求33所述的方法，第二和第三输出信号中的每个都通过一个单独的分频器。

36.根据权利要求35所述的方法，其中第一频率范围和第二频率范围重叠。

37.根据权利要求33所述的方法，接收第二反馈信号的脉冲延伸器或脉冲压缩器包括至少一个光栅，而且其中响应于第二反馈信号来调节光栅的角度。

38.根据权利要求33所述的方法，其中接收第二反馈信号的脉冲延伸器或脉冲压缩器包括一对隔开的光栅，而且其中响应于第二反馈信号来调节光栅之间的距离。

39.根据权利要求33所述的方法，其中锁模激光器包括由通过泵激光器传递的泵光束泵浦的光腔，泵光束在进入腔之前通过了可变调制器，而且其中第一反馈信号被提供可变调制器。

主振荡器光放大器系统的载波包络相位稳定性

技术领域

[0001] 本发明总体上涉及用于传递飞秒脉冲的激光振荡器加放大器装置。本发明具体涉及其中在放大之前脉冲在时间上伸展并且放大后的脉冲在传递之前在时间上压缩的这种装置。

背景技术

[0002] 持续时间为几飞秒或更短的光脉冲可仅仅包括脉冲包络内的脉冲基本载波频率下的很少的光周期。脉冲包络通常具有高斯(Gaussian)或双曲正割(Sech-squared)形式。包络内的峰值功率将取决于载波周期相对于包络的相位。本领域技术人员将其称为载波包络相位(CEP)。图1A是图示出其中载波相位相对于脉冲包络迟延一个ΦCE量的情况的示图。最高峰功率将在载波周期之一的峰值正好处于具有包络峰值的相位(ΦCE=0.0)时出现。这被示意性地在图1B中图示出来。包络中的周期越少(即,脉冲越短),该相位越取决于脉冲的峰值功率。

[0003] 用于稳定激光振荡器的CEP的技术早已是本领域公知的。该技术之一包括闭环反馈装置,其中CEP被测量并与期望值进行比较。测量值与实际值之间的任何差异被用来改变光泵功能以获取振荡器的介质来将测量值驱动回到期望值。但是,已经发现,如果来自CEP稳定振荡器的脉冲在线性调频(chirped)脉冲中放大,则放大的脉冲的放大装置CEP通常不稳定。在该装置中,来自振荡器的输入脉冲在时间上被脉冲延伸器从放大之前的初始持续时间延伸、被光学放大器放大、并且被脉冲压缩器在时间上压缩回大约初始的脉冲持续时间。

[0004] 美国专利公开No.2010/0061411中公开了用于稳定来自线性调频脉冲放大装置的输出脉冲的一种方案,在此通过引用并入本文。在此,稳定性被其中CEP被再次测量并与期望值比较的闭环装置影响。测量值与实际值之间的任何差异被用来改变放大器的脉冲延伸器或压缩器中的光栅的分离以驱动测量值回到期望值。

[0005] 针对主振荡器加放大器系统中的CEP控制的该方案及其它现有技术的方案的问题在于,方案没有考虑到不同的因素促进了总体的CEP不稳定。举例来说,可能存在由于热效应产生的缓慢的CEP偏移以及由于脉冲延伸器、光学放大器或脉冲压缩器内的机械谐振产生的更高频率偏移。

[0006] 授权给Yu等人的美国专利No.7701982公开了一种用于稳定被来自泵激光的光束光学泵浦的模式锁定振荡器的CEP的装置。此处,平衡零拍探测系统被用在f-2f干涉仪以产生用于稳定超快振荡器的CEP的CEP误差信号。误差信号的两个部分(平衡零拍检测器装置的每个壁各一部分)被第一PID(比例-积分-微分)控制器(反馈电路)处理。来自第一PID控制器的反馈信号被分成两部分。这两部分的第一部分被馈入第二PID控制器。来自第二PID控制器的信号被用于调节振荡器中的慢(低频)响应制动器,在这种情况下,振荡器中的棱镜处于振荡器的谐振器(激光腔)镜之间,并且可响应于来自第二PID控制器的信号被压电式换能器(PZT)移动。来自第一PID控制器的信号的这两个部分的第二部分被馈入激光腔外

的快速响应制动器，其主要响应于来自第一PID控制器的信号的高频分量。在这种情况下，制动器是插入泵激光束中的声光调制器(AOM)由此精确地调制传递至振荡器激光腔中的增益元件的泵功率。该方法被描述为对于稳定模式锁定振荡器的CE相位是有效的。

[0007] Yu等人的专利的装置的一个缺点在于，控制低频制动器的信号与控制高频制动器的信号不独立。对第一PID控制器的增益的任意调节将连续地自动调节第一和第二PID控制器的净增益。Yu等人的专利的装置的另一个缺点在于，不存在针对选择应用至高频和低频制动器的频带的规定。最初选择的具体制动器确定了无论频率选择是怎么样的。Yu等人的专利的装置的另一个缺点在于，低频控制要求振荡器激光腔中的可动元件。在操作期间移动该元件会干扰振荡器的模式锁定。Yu等人的专利的装置的另一个缺点在于，其没有解决振荡器加放大器系统的控制CEP的问题。这是很显著的，因为在用的大部分超快系统都是振荡器加放大器系统。

[0008] 仍然存在对用于控制超快振荡器加放大器系统的CEP的方法和系统的需求。这样的方法和系统应该能够处理上述频率相关的CEP不稳定源，同时克服Yu等人的用于振荡器控制的装置的缺点。

发明内容

[0009] 根据本发明的设备的一个方面包括振荡器装置，其包括用于产生锁模光脉冲的激光腔，从所述锁模光脉冲中选择具有预定脉冲重复频率(PRF)的序列用于放大。光学放大器装置被提供用于放大被选择用于放大的光脉冲序列并传递相应的放大后的脉冲序列。装置用于以小于或等于光脉冲序列的PRF的最大频率周期性地产生第一信号，第一信号代表放大后的脉冲序列中的脉冲的瞬态载波包络相位(CEP)。电子装置被提供用于将第一信号分成第二和第三信号。第二信号包括介于DC与小于最大频率的第一频率之间的第一范围内的频率分量，第三信号包括介于小于最大频率的第二频率与最大频率之间的第二范围内的频率分量。慢响应CEP控制器和快响应CEP控制器被提供用于调节放大后的脉冲序列中的脉冲的CEP。每个CEP控制器都处于振荡器装置的激光腔的外部。第一信号处理装置被布置用于接收第二信号，第二信号处理装置被布置用于接收第三信号。第一和第二信号处理装置被布置用于分别产生第一和第二控制信号，第一和第二控制信号的每一个都表示放大后的脉冲序列中的脉冲的瞬态与期望CEP之间的差异。第一和第二控制信号分别调节慢响应和快响应CEP控制器以使得放大后的脉冲序列中的脉冲的瞬态与期望CEP之间的差异最小。

附图说明

[0010] 图1A是示意性地图示了载波在相位上滞后脉冲包络ΦCE的示图。

[0011] 图1B是示意性地图示了载波在相位上与脉冲包络完全相同的示图。

[0012] 图2示意性地图示了根据本发明的设备的一个优选实施例，包括CEP锁定振荡器并传递将被放大的脉冲，线性调频脉冲放大器(CPA)包括用于在放大之前延伸脉冲的持续时间的脉冲延伸器、用于放大延伸后的脉冲的光学放大器、以及用于压缩放大后的延伸过的脉冲的脉冲压缩器，干涉仪用于测量的压缩后的放大后的脉冲的CEP，分频装置用于将CEP测量结果分成高频率分量和低频率分量，低频率分量被用于通过调节脉冲延伸器中的色散来调节放大器的CEP，高频率分量被用于调节相位稳定振荡器的CEP。

[0013] 图2A示意性地图示了图2的振荡器的细节。

[0014] 图3是示意性地图示了作为图2的设备的实验示例中的时间的函数的压缩后的放大后的脉冲的测得CEP的示图。

[0015] 图4示意性地图示了根据本发明的设备的另一优选实施例，其类似于图2的设备，但是其中CEP测量结果的低频分量被用来通过调节脉冲-压缩器的色散来调节放大器的CEP。

[0016] 图5A示意性地图示了仅仅包括单个检测器元件的图2的设备中的CEP测量干涉仪的配置。

[0017] 图5B示意性地图示了包括多元件位置敏感探测器的图2的设备中的CEP测量干涉仪的配置。

[0018] 图5C示意性地图示了仅仅包括CCD阵列探测器的图2的设备中的CEP测量干涉仪的配置。

具体实施方式

[0019] 继续参考附图，其中类似的特征标有类似的标号，图2和图2A示意性地图示了根据本发明的超快振荡器-放大器设备的一个优选实施例10。在这些附图中，以及在下文将进一步参考的其它附图中，电子路径被描绘为粗线而且光路被描绘为细线。

[0020] 设备10包括超快激光振荡器12，此处，振荡器包括掺钛蓝宝石(Ti:sapphire)增益介质。振荡器12(见图2A)包括对泵辐射的光束16进行传递的泵激光器14。调制器18(例如AOM)被提供用于可选地调制光束16以提供调制过的泵光束20。光束20光学地泵浦锁模激光谐振器(激光腔)22中的掺钛蓝宝石增益介质(未示出)。谐振器22传递几十兆赫(MHz)数量级的脉冲重复频率下的锁模脉冲序列28。

[0021] 光束28中的脉冲的CEP被包括在线f-2f干涉仪30和锁定电子电路(PLL电子电路)36的锁相回路32锁定至预定偏移频率和相位(锁定点)。偏移频率是路径28中的脉冲的PRF的整数分数倍。举例来说，0.25的偏移频率提供了路径中每四个脉冲与前面的或后面的四个脉冲大致相同。干涉仪30向锁定电子电路36提供了表示路径28中的脉冲的瞬态CEP的信号34。

[0022] 如超快领域技术人员公知的是，在f-2f干涉仪中，将被CEP测量的脉冲的频谱通过诸如结构化光纤之类的扩频装置而被扩频至超过一个八度音。对于中心波长处于普通超快增益介质光谱的增益带宽内的脉冲被扩频至白光连续区。光谱被分成高低频率部分，低频部分是被光学非线性晶体转换成更高频率的频率。高频和转换后的低频部分在时间上分开，留下时间上的重叠以及相应的光谱重叠。两个部分光学重组以提供被直接测量为RF信号的成拍频率，从成拍频率计算信号34。锁定电子电路提供了表示瞬态CEP与期望值之差的控制信号38，而且该信号被传递至AOM28，AOM28通过改变传递至谐振器22的泵功能来将路径28中的脉冲的CEP调节至预定锁定点值。AOM具有高频响应并且能够在路径28中的脉冲的最高PRF下做出响应。

[0023] 用于振荡器12的一个适当的振荡器是可从加州圣克拉拉的Coherent公司获取的模型Micra-CEPS™。该振荡器被如上所述的f-2f干涉仪锁相，而且与可作为德国慕尼黑的Menlo Systems GmbH公司的模型XPS800的锁定电子电路相关。

[0024] 继续参考图2，路径28中的锁相脉冲可被传递至包括脉冲延伸器40、光学放大器46和脉冲-压缩器48的线性调频脉冲放大器(CPA)系统42。由于从振荡器12传递的脉冲的PRF对于脉冲的后续放大来说太高，所以提供了脉冲拾取器或分频器26(在此处于脉冲延伸器和放大器之间)，用于沿光束路径28将脉冲重复频率降低若干千赫(KHz)。适合用作CPA42的一个光学放大器是Coherent公司的模型Legend-Elite™，其中放大器46是再生式放大器。放大器46被Coherent公司的模型Evolution-30™ DPSS泵激光器(未示出)光学泵浦。

[0025] 来自脉冲压缩器48的放大后的脉冲被分束镜50采样，并且样本52被发送至f-2f干涉仪和处理器54以测量放大后的脉冲的CEP。干涉仪54优选地具有检测器装置，该检测器装置足够快到能够测量每个脉冲的CEP，这允许采集从脉冲压缩器48传递来的脉冲序列的每个激光脉冲上的数据，从而使频域中检测到的CE相位噪声信息最大。在用于本发明的设备的实验评估的干涉仪54的示例中，单个模拟检测器(光二极管)被用来测量干涉仪提供的成拍频谱。以与来自CPA的脉冲的PRF相等的最大速率对检测器输出进行采样。这允许(以合适的同步)实现每个脉冲的检测，从而在光谱仪检测器的最大采样速率(例如，大约30Hz)和激光器系统的重复速率(例如大约10kHz)之间的频带中的频率下提供CE相位噪声信息。

[0026] 在设备10中，来自干涉仪54的CEP电压-信号56被电子分频器58分成两个部分。高频部分64包括预定划分频率和最大频率(优选地是放大后的脉冲的脉冲重复频率)之间的频率。低频部分64包括处于DC和划分频率之间的频率。处理电子电路60(优选地，PID控制器PID-1)接收了低频部分。PID-1产生表示瞬时测得的CEP和放大后的脉冲的期望CEP值之差的控制信号62。该信号被传递至脉冲延伸器40，其被配置成使得脉冲延伸可通过改变脉冲延伸器中的色散元件(例如光栅或棱镜)提供的色散而被选择性地改变。

[0027] 通过改变脉冲延伸器中的色散进行CEP控制在本领域是已知的。如上所述，美国专利公开No.2010/0061411中公开了一种稳定来自线性调频脉冲放大装置的输出脉冲的方案。此处，表示测量值和期望值之间的差异的误差信号被用来改变脉冲延伸器中的光栅对或CPA系统中的压缩器的分离，以将测量值驱动回到期望值。优选方案包括利用误差信号来改变脉冲延伸器或脉冲压缩器中的光栅的倾斜以改变色散，由此改变CEP。转让给本发明的受让人的美国预授权专利公开No.20110019267中描述了该方案，其整体公开在此通过引用并入本文。

[0028] 改变CEP所要求的色散变化相对于脉冲延伸所需的色散来说非常小。由此，通过采样上述方法之一，脉冲延伸器40起到了低频CEP控制器的作用，而无需损害CPA放大所需的脉冲延伸功能。

[0029] 来自分频器58的高频部分64被信号处理电子电路66(PID-2)接收。PID-2产生表示放大后的脉冲的瞬时测得的CEP与期望CEP值之差的控制信号68。该信号被传递至锁相回路32的振荡器锁定电子电路36。信号被添加至信号34并使得锁定电子电路经由高频CEP控制器(AOM)18将锁相回路的锁定点改变成预补偿相位锁定CEP，以抵消CPA42中引入高频CEP变化。

[0030] 应该注意的是，虽然将CEP控制信号56分成高频和低频部分已经如上地被描述为由分频器58完成，但是还可以通过将信号56划分成包括所有频率的两个部分来实现频率划分，随后利用处于PID-1和PID-2中或前面的单独的电子滤波装置提供频率划分。这将允许所选高频和低频范围的重叠，这被证明有利于例如使用每个PID控制器的增益带宽的更高

部分。在这种重叠情况下，低频范围的高频极限可大于高频范围的低频极限。

[0031] 无论选择什么频率分离方法，高频和低频范围都无需充满上至最大频率的整个频率范围。实际上，选择一些有限高频范围来匹配CPA36的一些已知特征机械谐振频率可能是有用的。重要的是，信号处理电子电路(PID)可完全彼此独立地调节，而不是如Yu等人的上述振荡器稳定方法那样相互依赖。

[0032] 在其中锁相掺钛蓝宝石振荡器12和CPA36被示例出来的设备10的示例中评估了本发明的CEP控制方法。脉冲延伸器40中的CEP的变化可遵循前面参考的预授权专利公开20110019267中所述的方法。振荡器输出脉冲在PRF of80兆赫(MHz)下具有大约20飞秒(fs)的FWHM持续时间。该持续时间在脉冲延伸器40中被延伸至大约150皮秒(ps)。在延伸之后，PRF被脉冲拾取器26下降至10kHz。在放大之后，延伸后的脉冲在脉冲-压缩器48中被压缩至小于40fs的持续时间。压缩的放大后的脉冲具有每脉冲大约0.5毫焦(mJ)的功率。传递至PID-1的低频信号部分包括介于DC和10Hz之间的频率。传递至PID-2的高频信号部分包括介于10Hz和10KHz之间的频率。适合作为PID-1和PID-2的PID控制器可从加州森尼韦尔Stanford Research Systems公司获得。

[0033] 图3是示意性地图示了作为图2的设备的上述实验示例中的时间的函数的压缩后的放大后的脉冲的测得CEP的示图。在120分钟的工作时间段内测量CIP。CEP的RMS相位变化大约为200毫弧度(mrad)。从示图可以看出，峰值间的变化大约是1.3弧度。峰值间的变化的大约20%是由大约60分钟的时间段内的非常低频的偏移造成的。

[0034] 图4示意性地图示了根据本发明的设备10A的另一优选实施例。设备10A类似于图2的设备10，不同之处在于脉冲压缩器而不是脉冲延伸器被用作低频CEP控制器。上述预授权专利公开20110019267中描述了压缩器的优选装置。

[0035] 其中使用不具有双重功能的CEP控制器的本发明的实施例也是可行的。举例来说，PID-2的输出可用于图2和4的装置中的干涉仪30和脉冲延伸器40之间的路径中的独立的高频响应CEP控制器。独立的低频响应CEP控制器可处于这些装置的CPA42中的任意位置。在光学放大器中包括多级放大，则这种低频响应CEP控制器可处于放大器级之间。可以在不脱离本发明的精神和范围的情况下做出本发明设备的这些和其它修改。

[0036] 适合用作单独的快速频率响应CEP控制器的装置包括声光和电光频率/相位移位器(AOFS/AOPS/EOFS/EOPS)，而且声光可编程色散滤波器(AOPDF)，例如可从法国巴黎的FASTLITE公司获取的Dazzler。用于快速频率响应的装置还可用作单独的低频响应制动器。玻璃计数器楔形物对(可选择地可彼此转移)也可被用作低频响应制动器。

[0037] 在本发明上述设备的实验示例中，干涉仪54仅仅包括单个模拟检测器，用于检查干涉仪中产生的条纹度谱。图5A以简化形式示意地描述了干涉仪的该特定装置54A。从将被测量的脉冲产生的白光连续区70被传递至多色条纹形成光系统72，其功能如上所述。包括光栅或棱镜(未示出)的色散元件74在光系统72中投射出条纹光谱的条纹化光谱76。

[0038] 该频谱具有处于从短波长λ_S至长波长λ_L的范围内的波长下的多个条纹。为了方便图示，在此将光谱描绘为从与图屏幕垂直旋转至图平面。在实验示例中，该范围介于大约490nm至大约570nm。切口装置79具有通孔78，其宽度小于光谱的一个条纹的宽度以使得单个模拟检测器80不会看见整个条纹，优选地看见条纹边缘。脉冲间的CEP变化造成了箭头M所示的条纹光谱76的移动。这使得检测器80检测CEP变化作为检测器输出电压V的简单变

化。信号处理电子电路82对测器电压进行采样并产生相应的电压(在需要时可放大或衰减)以发送用于分频的信号56。该信号具有从DC至最大采样频率的频率分量(在此为放大器输出的PRF,在实验示例中为10kHz in)。

[0039] 图5的装置的一个缺点在于,检测器80和相关信号处理电子电路82不能区分由于频谱移动M(相位噪声)和幅值噪声产生电压变化。由于这个原因,图3所呈现的稳健的相位锁定都更显著。将相位噪声与幅值噪声去耦合,可产生改进的稳定性并且使得放大器输出CEP被锁定至所选的CEP,而不是稳定的振荡器的后续锁定点。

[0040] 图5B示意性地图示了干涉仪54的装置54B,其能够提供相位噪声与幅值噪声的一些去耦合。装置54B类似于装置54A,不同之处在于装置54A的单个检测器80在装置55B中被多元件阵列位置敏感检测器84取代。切口装置79中的通孔足够宽,由此检测器可“看见光谱76的”整个条纹。检测器接收的条纹将移动超过与频谱移动M相对应的检测器。

[0041] 位置敏感检测器产生对条纹点沿阵列轴的位置敏感的电压VA和VB。电压V_A和V_B之差正比于检测器上的位置,因此正比于条纹的相位。由此,该差异信号可被直接用作(或在必要时经放大或衰减之后作为)信号56。位置敏感检测器84必须具有比放大器输出的重复速率大的工作带宽。

[0042] 图5C示意性地图示了干涉仪54的装置54C,其能够提供相位噪声与幅值噪声的基本上完全的去耦合。装置54C类似于装置54B,不同之处在于装置54B的位置敏感检测器84在装置55C中被CCD阵列56取代。切口通孔足够宽以使得大部分条纹光谱76落在CCD阵列上。条纹光谱将改变与频谱移动M对应的CCD阵列上的位置。在此,处理电子电路82在放大器输出的PRF下对CCD阵列的行进行采样。由像素电压V_0至V_N的快速傅立叶变换计算相位电压V,其中N一般是255。出于诊断目的提取作为波长的函数的条纹幅值的读出。从CCD阵列样本的获取到计算傅立叶变换的整个采样和计算必须在放大的激光脉冲的PRF下进行。

[0043] 总之,以上参考优选实施例和其它实施例描述了本发明。但是本发明并不限于所描述和说明的实施例。实际上,本发明由所附权利要求限定。

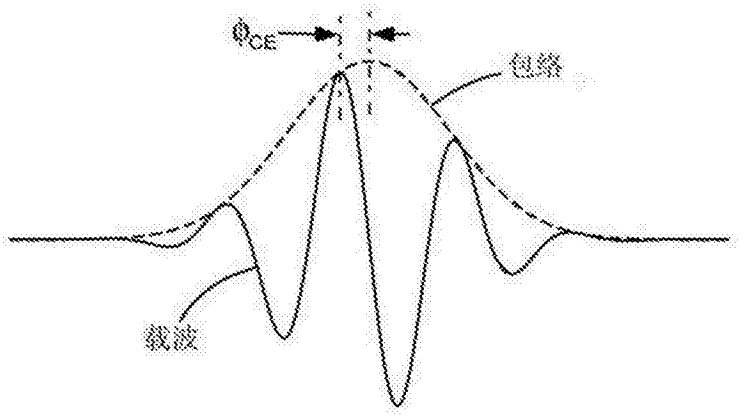


图1A
（先有技术）

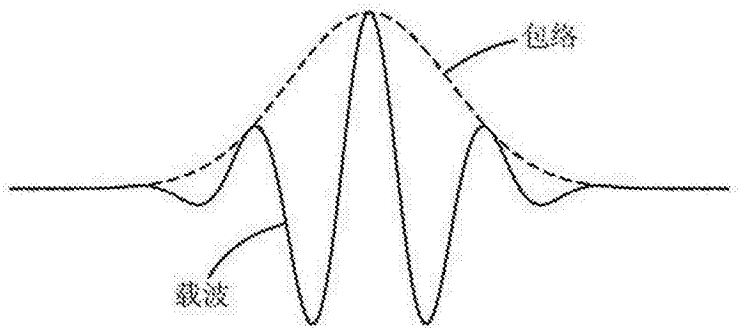


图1B
（先有技术）

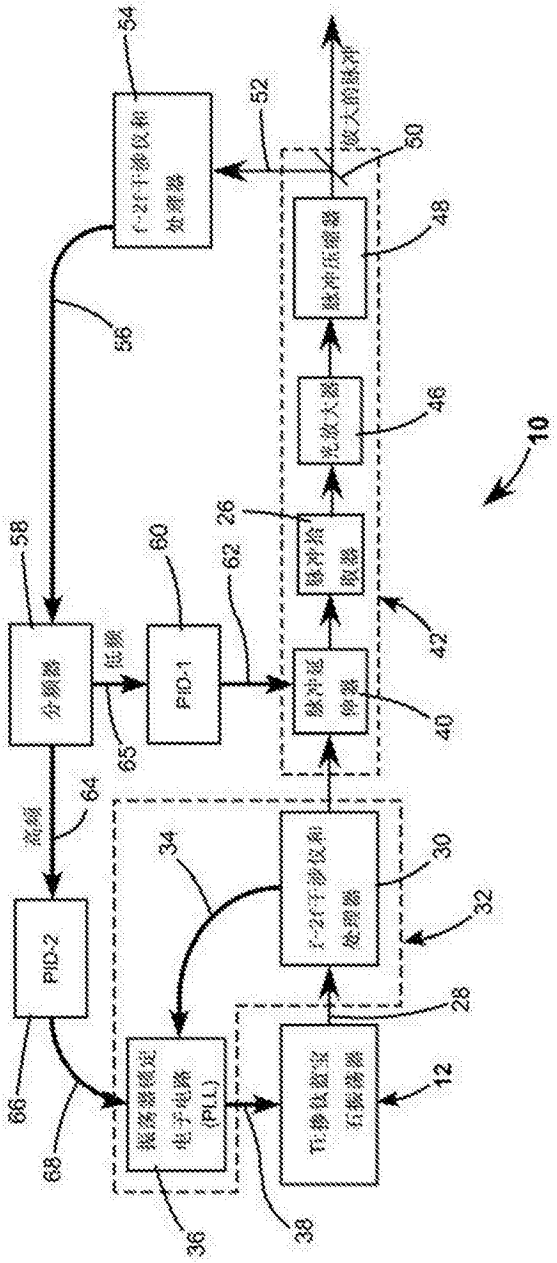

54
52
50
48
46
10
26
42
58
60
62
40
64
34
30
32
28
66
68
36
38
12
PID-1
PID-2
AOM

图2

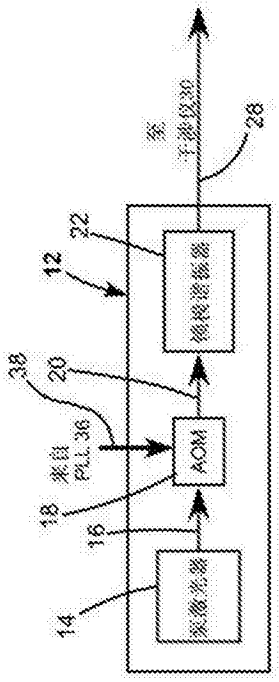

28
22
12
20
38
18
16
14
AOM

图2A

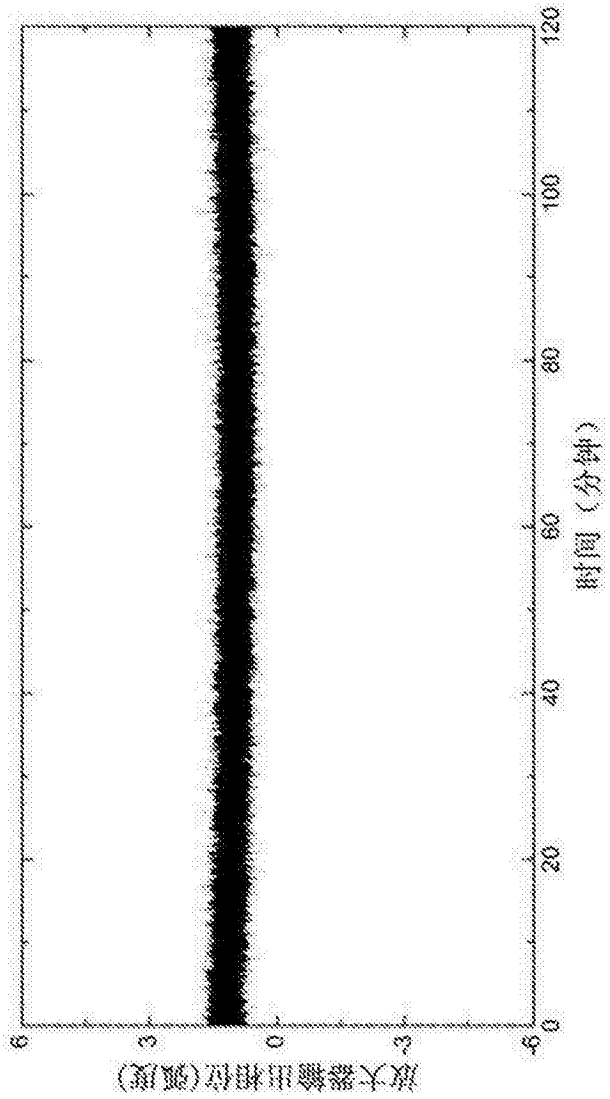


图3

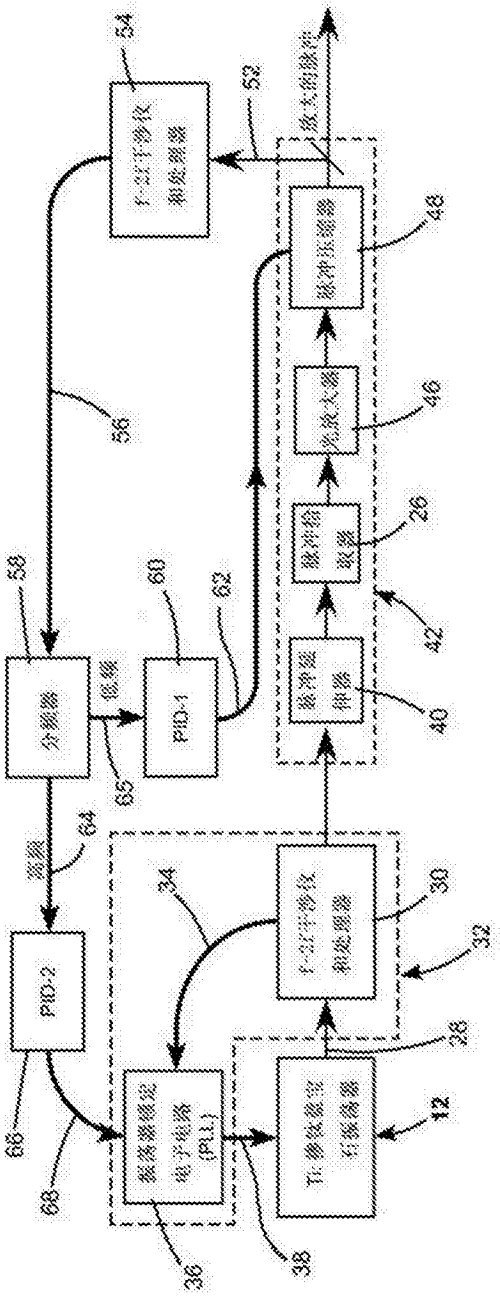

54
52
48
46
26
42
40
56
58
60
62
64
65
66
68
34
30
32
28
12
36
38
PID-1
PID-2

图4

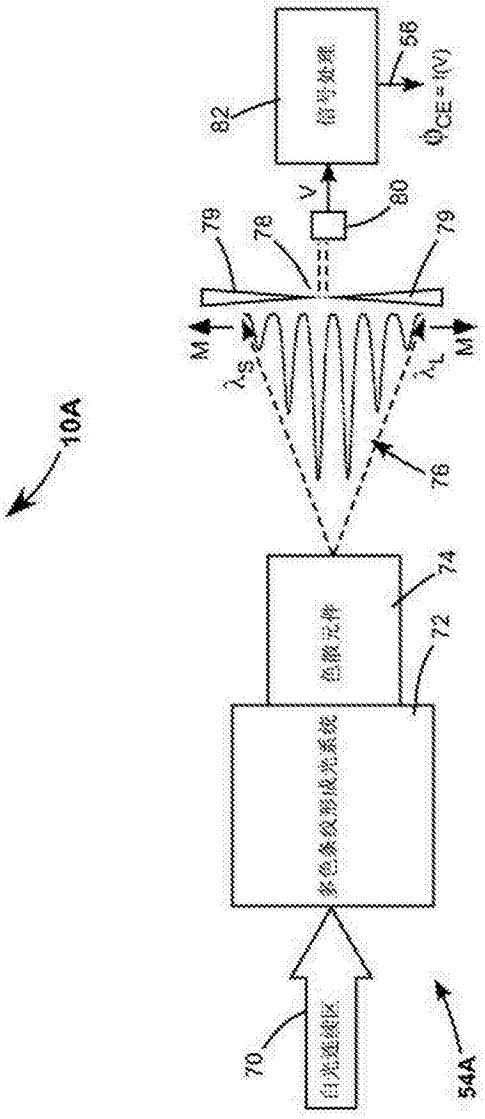

10A
82
56
V
80
79
78
79
M
M
78
74
72
70
54A

图5A

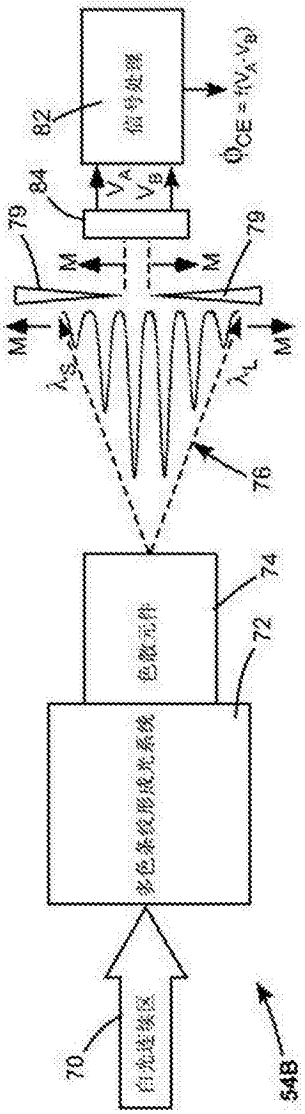

82
信号处理
$\Phi_{CE} = f(V_A, V_B)$
84
V_A
V_B
79
M
79
M
M
M
λ_S
λ_L
76
74
色散元件
72
多色条纹照明光系统
70
白光源模组
54B

图5B

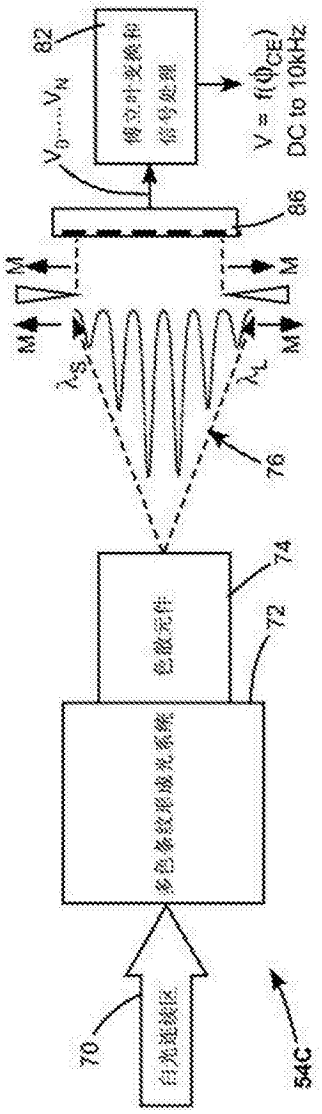

82
模拟计算模组
信号处理
$V_0 \ldots V_N$
$V = f(\Phi_{CE})$
DC to 10kHz
86
M
M
M
M
λ_S
λ_L
76
74
色散元件
72
多色条纹照明光系统
70
白光源模组
54C

图5C