



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110140262 A

(43)申请公布日 2019.08.16

(21)申请号 201780075031.5

(74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司 72001

(22)申请日 2017.12.02

代理人 周学斌 闫小龙

(30)优先权数据

62/429,830 2016.12.04 US

(51)Int.Cl.

H01S 3/11(2006.01)

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

H01S 3/16(2006.01)

2019.06.04

H01S 3/067(2006.01)

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/US2017/064369 2017.12.02

(87)PCT国际申请的公布数据

W02018/102791 EN 2018.06.07

(71)申请人 纽波特公司

地址 美国加利福尼亚州

(72)发明人 J.沙尔 C-Y.简 R.博吉

J.卡夫卡 A.迪纳

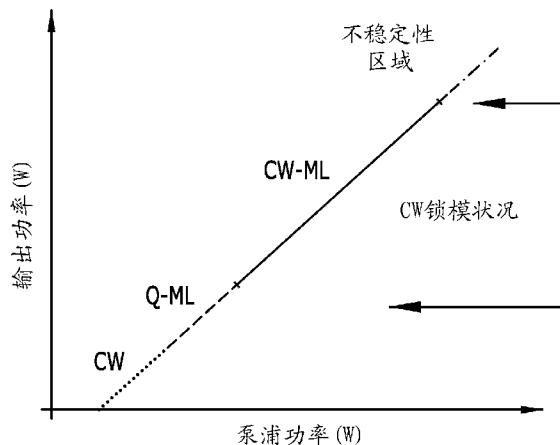
权利要求书3页 说明书11页 附图6页

(54)发明名称

高功率锁模激光系统及使用方法

(57)摘要

本文中公开了一种高功率镱掺杂氟化钙激光系统，其包括至少一个泵浦源、由至少一个高反射器和至少一个输出耦合器形成的至少一个激光腔，以及定位在与泵浦源通信的激光腔内的至少一个镱掺杂氟化钙光学晶体，该镱掺杂氟化钙光学晶体被配置成输出至少一个至少20 W的输出信号，其具有200 fs或更小的脉冲宽度和至少40 MHz的重复率。



1. 一种高功率镱掺杂氟化钙激光系统,其包括:
至少一个泵浦源;
至少一个激光腔,其由至少一个高反射器和至少一个输出耦合器形成;
定位在所述至少一个激光腔内的至少一个镱掺杂氟化钙光学晶体,所述至少一个镱掺杂氟化钙光学晶体与至少一个泵浦信号通信并由其泵浦,并且被配置成输出具有20W或更高输出功率以及200fs或更小脉冲宽度的至少一个输出信号。
2. 根据权利要求1所述的高功率镱掺杂氟化钙激光系统,其中所述至少一个泵浦信号包括连续波泵浦信号。
3. 根据权利要求1所述的高功率镱掺杂氟化钙激光系统,其中所述至少一个输出信号包括连续波锁模信号。
4. 根据权利要求1所述的高功率镱掺杂氟化钙激光系统,其中所述至少一个泵浦源包括:耦合到单个光纤器件的位于单个二极管封装内的多个激光二极管发射器,每个发射器被配置成将光学信号输出到所述单个光纤器件中,所述单个光纤器件被配置成从所述多个激光二极管发射器接收所述光学信号并且输出单个泵浦信号。
5. 根据权利要求1所述的高功率镱掺杂氟化钙激光系统,进一步包括:至少一个定位在所述至少一个激光腔内的至少一个晶体支架,所述至少一个晶体支架被配置成在所述至少一个激光腔内的期望位置处支撑和定位所述至少一个镱掺杂氟化钙光学晶体。
6. 根据权利要求5所述的高功率镱掺杂氟化钙激光系统,其中所述至少一个晶体支架由至少一种具有高导热系数的材料制成。
7. 根据权利要求6所述的高功率镱掺杂氟化钙激光系统,其中所述至少一个晶体支架包括:至少一个热控制特征,所述至少一个热控制特征被配置成增强定位在所述至少一个晶体支架上的至少一个镱掺杂氟化钙光学晶体的对流冷却。
8. 根据权利要求7所述的高功率镱掺杂氟化钙激光系统,进一步包括:至少一个热控制系统,所述至少一个热控制系统被配置成帮助冷却所述至少一个镱掺杂氟化钙光学晶体。
9. 根据权利要求8所述的高功率镱掺杂氟化钙激光系统,其中所述至少一个热控制系统包括空气冷却系统。
10. 根据权利要求1所述的高功率镱掺杂氟化钙激光系统,进一步包括:定位在所述至少一个激光腔内的晶体支架上的镱掺杂氟化钙光学晶体,所述晶体支架具有与其耦合的热控制系统。
11. 根据权利要求1所述的高功率镱掺杂氟化钙激光系统,其中所述至少一个镱掺杂氟化钙光学晶体包括<111>切割的晶体。
12. 根据权利要求1所述的高功率镱掺杂氟化钙激光系统,其中所述至少一个输出信号具有跨越所述输出功率动态范围的上部区域的至少百分之五十(50%)的连续锁模范围。
13. 一种高功率体块型激光系统,其包括:
至少一个泵浦源;
由至少一个高反射器和至少一个输出耦合器形成的至少一个激光腔;
至少一个体块型光学晶体,其定位在所述至少一个激光腔内并且与所述至少一个泵浦源通信,所述至少一个体块型光学晶体被配置成输出至少一个20W或更高以及200fs或更小的输出信号,所述至少一个输出信号被配置成从所述至少一个输出耦合器输出。

14. 根据权利要求13所述的高功率体块型激光系统,其中所述至少一个泵浦信号包括连续波泵浦信号。

15. 根据权利要求13所述的高功率体块型激光系统,其中所述至少一个输出信号包括连续波锁模信号。

16. 根据权利要求13所述的高功率体块型激光系统,其中所述至少一个泵浦源包括:至少一个光纤器件,所述光纤器件与基于单二极管的泵浦源光通信地耦合。

18. 根据权利要求13所述的高功率体块型激光系统,其中所述至少一个泵浦源包括:耦合到单个光纤器件的位于单个二极管封装内的多个激光二极管发射器,每个发射器被配置成将至少一个光学信号输出到所述单个光纤器件中,所述单个光纤器件被配置成从所述多个激光二极管发射器接收所述至少一个光学信号并且输出单个泵浦信号。

17. 根据权利要求13所述的高功率体块型激光系统,其中所述至少一个高功率体块型激光系统包括空气冷却激光系统。

18. 根据权利要求13所述的高功率体块型激光系统,进一步包括:至少一个热控制系统,其被配置成帮助冷却所述至少一个体块型光学晶体。

19. 根据权利要求13所述的高功率体块型激光系统,其中所述至少一个输出信号具有跨越所述输出功率动态范围的上部区域的至少百分之五十(50%)的连续锁模范围。

20. 一种高功率激光器,其包括:

至少一个泵浦源;

由至少一个高反射器、至少一个输出耦合器形成的至少一个激光腔,所述至少一个输出耦合器被配置成输出至少一个输出信号;以及

至少一个增益介质,其定位在所述至少一个激光腔内并且与所述至少一个泵浦源通信,所述至少一个增益介质被配置成从所述至少一个输出耦合器输出至少一个至少20W的输出信号,其具有200fs或更小的脉冲宽度和至少40MHz的重复率。

21. 根据权利要求20所述的高功率激光系统,其中所述至少一个输出信号包括连续波泵浦信号。

22. 根据权利要求20所述的高功率激光系统,其中所述至少一个输出信号包括连续波锁模泵浦信号。

23. 根据权利要求20所述的高功率激光系统,其中所述至少一个泵浦源包括:至少一个光纤器件,所述光纤器件与基于单二极管的泵浦源光通信地耦合。

24. 根据权利要求20所述的高功率激光系统,其中所述至少一个泵浦源包括:多个激光二极管发射器,每个发射器被配置成将光学信号输出到所述至少一个光纤器件中,所述至少一个光纤器件被配置成从所述多个激光二极管发射器接收所述光学信号并且输出单个泵浦信号。

25. 根据权利要求20所述的高功率激光系统,其中所述至少一个泵浦源包括:耦合到单个光纤器件的位于单个二极管封装内的多个激光二极管发射器,每个发射器被配置成将至少一个光学信号输出到所述单个光纤器件中,所述单个光纤器件被配置成从所述多个激光二极管发射器接收所述至少一个光学信号并且输出单个泵浦信号。

26. 根据权利要求20所述的高功率激光系统,进一步包括:至少一个热控制系统,其与所述至少一个增益介质通信并且被配置成帮助冷却所述至少一个增益介质。

27. 根据权利要求25所述的高功率激光系统,其中所述至少一个热控制系统包括空气冷却系统。

28. 根据权利要求20所述的高功率激光系统,其中所述至少一个增益介质被配置成从所述至少一个输出耦合器输出至少一个至少20W的输出信号,其具有200fs或更小的脉冲宽度和至少80MHz的重复率。

29. 根据权利要求20所述的高功率激光系统,其中所述至少一个增益介质被配置成从所述至少一个输出耦合器输出至少一个至少20W的输出信号,其具有200fs或更小的脉冲宽度和至少140MHz的重复率。

30. 根据权利要求20所述的高功率激光系统,其中所述至少一个增益介质被配置成从所述至少一个输出耦合器输出至少一个至少20W的输出信号,其具有200fs或更小的脉冲宽度和至少200MHz的重复率。

31. 根据权利要求20所述的高功率激光系统,其中所述至少一个增益介质被配置成从所述至少一个输出耦合器输出至少一个至少20W的输出信号,其具有200fs或更小的脉冲宽度和至少300MHz的重复率。

32. 根据权利要求20所述的高功率激光系统,其中所述至少一个增益介质被配置成从所述至少一个输出耦合器输出至少一个至少20W的输出信号,其具有200fs或更小的脉冲宽度和至少400MHz的重复率。

33. 根据权利要求20所述的高功率激光系统,其中所述至少一个输出信号具有跨越所述输出功率动态范围的上部区域的至少百分之五十(50%)的连续锁模范围。

34. 一种用于在多光子显微镜系统中使用的高功率镱掺杂氟化钙激光系统,其包括:

至少一个泵浦源,其被配置成输出至少一个泵浦信号;

至少一个激光腔,其由至少一个高反射器和至少一个输出耦合器形成;

定位在所述至少一个光学参量振荡器内的至少一个镱掺杂氟化钙光学晶体,所述至少一个镱掺杂氟化钙光学晶体与所述至少一个泵浦信号通信并由其泵浦,并且被配置成输出具有20W或更高输出功率以及200fs或更小脉冲宽度的至少一个输出信号;

与所述至少一个镱掺杂氟化钙激光器光通信的至少一个谐波发生系统,所述至少一个谐波发生系统被配置成接收光学参量振荡器输出信号并且输出至少一个谐波输出信号;

至少一个光学参量振荡器,其由至少一个高反射器和至少一个输出耦合器形成,并且与所述至少一个镱掺杂氟化钙激光器光通信;以及

至少一个多光子显微镜系统,其与所述光学参量振荡器中的至少一个光通信。

35. 根据权利要求34所述的高功率激光系统,其中所述至少一个泵浦源包括:耦合到单个光纤器件的位于单个二极管封装内的多个激光二极管发射器,每个发射器被配置成将至少一个光学信号输出到所述单个光纤器件中,所述单个光纤器件被配置成从所述多个激光二极管发射器接收所述至少一个光学信号并且输出单个泵浦信号。

36. 根据权利要求34所述的高功率激光系统,其中所述至少一个谐波输出信号包括:所述至少一个镱掺杂氟化钙激光系统输出信号的二次谐波。

37. 根据权利要求34所述的高功率镱掺杂氟化钙激光系统,其中所述至少一个谐波输出信号包括:所述至少一个镱掺杂氟化钙激光系统输出信号的三次谐波。

高功率锁模激光系统及使用方法

[0001] 对相关申请的交叉引用

本申请要求2016年12月4日提交的题为“High-Power Ytterbium Doped Calcium Fluoride Mode-Locked Laser and Methods of Use”的美国临时专利申请序列号62/429,830的优先权，其整个内容通过引用结合到本文中。

背景技术

[0002] 高功率锁模激光系统目前被用于各种各样的应用，诸如多光子显微镜和器件制造。目前，通常有三种类型的高功率锁模激光系统可用于这些应用：薄盘激光系统、线性调频脉冲光纤放大器系统和体块型(bulk)激光系统。薄盘激光系统是二极管泵浦的固态激光系统，其包括定位在散热器上的一薄层有源增益材料。来自二极管泵浦源的泵浦信号多次入射在有源增益材料上，响应于此，该有源增益材料产生输出信号。历史上，盘形(disk)激光系统已经能够产生高平均功率。然而，盘形激光系统在很大程度上尚不能够可靠地产生具有小于约500飞秒(在下文中称为“fs”)的脉冲宽度的输出信号，以及以高平均功率和高重复率可靠地产生。此外，盘形激光系统需要复杂且昂贵的光学泵浦配置和热管理系统。由于峰值功率限制，基于光纤的高功率锁模激光器需要振荡器和线性调频脉冲放大器，其包括在放大之前拉伸脉冲，然后在放大之后进行随后的压缩，因此向系统添加了成本和复杂性。

[0003] 相反地，体块型高功率锁模激光系统使用光学晶体(诸如Yb:YAG、Yb:CALGO、Yb:KYW或Yb:KGW)作为增益材料。虽然现有技术的体块型高功率锁模激光系统在过去已被证明是有用的，但是已经发现了许多缺点。常常，光学晶体的高功率光学泵浦导致了光学晶体内的一个或多个不期望的热效应。例如，可以在光学晶体内部创建一个或多个热透镜，由此减小激光系统的输出功率。通常，这些现有技术的体块型激光系统的平均输出功率小于约15 W。图1以图表方式示出了该范围，其中连续波锁模(CW-ML)信号从现有技术激光腔内的激光器输出，作为平均输出功率对比来自泵浦源的平均泵浦功率的函数。如示出的，窄的CW-ML状况(regime)被不合期望的不稳定性状况终止。如此，需要CW-ML信号的操作或系统被局限于相对低的光学平均功率应用。另外，目前可用的体块型高功率锁模激光系统往往是需要多个泵浦源、复杂热管理系统等等的复杂系统。

[0004] 因此，鉴于前述内容，一直需要一种能够以高平均功率产生短脉冲的简单、低成本的高功率锁模激光系统。进一步需要一种能够产生具有平均功率大于20 W的低于200 fs脉冲持续时间的简单、低成本的高功率锁模激光系统。此外，一直需要一种能够对于应用而言足够的重复率产生这些短脉冲持续时间和高平均功率的简单、低成本的高功率锁模激光系统。此外，需要一种具有扩展的CW-ML范围以易于制造和鲁棒性的简单、低成本的高功率锁模激光系统。

发明内容

[0005] 本申请公开了高功率锁模激光系统的各种实施例及使用方法。在一个实施例中，

本申请公开了一种高功率镱掺杂氟化钙激光系统。该高功率镱掺杂氟化钙激光系统可以包括：至少一个泵浦源，其被配置成提供至少一个泵浦信号。该泵浦信号可以被引导到至少一个激光腔中，该激光腔由至少一个高反射器和至少一个输出耦合器形成。此外，至少一个镱掺杂氟化钙光学晶体可以定位在至少一个激光腔内。镱掺杂氟化钙激光系统与来自泵浦源的泵浦信号通信并由其泵浦，并且可以被配置成输出至少一个输出信号，该至少一个输出信号具有20 W或更高的输出功率以及约200 fs或更小的脉冲宽度。

[0006] 在另一实施例中，本申请涉及一种高功率体块型激光系统。和先前的实施例一样，高功率体块型激光器包括至少一个泵浦源。由至少一个高反射器和至少一个输出耦合器形成的至少一个激光腔可以被配置成从泵浦源接收泵浦信号。至少一个体块型光学晶体可以定位在激光腔内并且与泵浦源通信。体块型光学晶体可以被配置成输出可以从输出耦合器输出的至少一个20 W和200 fs的输出信号。

[0007] 在又另一实施例中，本申请公开了一种高功率激光器。该高功率激光器包括至少一个泵浦源。由至少一个高反射器和至少一个输出耦合器形成的至少一个激光腔可以被配置成接收泵浦信号。至少一个增益介质可以定位在激光腔内并且可以与泵浦源通信。增益介质可以被配置成从至少一个输出耦合器输出至少一个至少20 W的输出信号，其具有200 fs或更小的脉冲宽度和至少40 MHz的重复率。

[0008] 如本文中描述的高功率锁模激光系统及使用方法的其他特征和优点将根据以下详细描述的考虑而变得更加显而易见。

附图说明

[0009] 如本文中公开的高功率锁模激光系统及使用方法的新颖方面将通过审阅以下附图而变得更加显而易见，其中：

图1以图表方式示出了现有技术的高功率激光系统的锁模状况；

图2示出了高功率锁模激光系统的实施例的示意图，该系统具有经由光纤器件将泵浦信号输送到激光腔的单个二极管泵浦源；

图3示出了高功率锁模激光系统的另一实施例的示意图，该系统具有将多个泵浦信号输送到激光腔的单个二极管泵浦源；

图4示出了高功率锁模激光系统的实施例的示意图，该系统具有将多个泵浦信号输送到激光腔的多个二极管泵浦源；

图5示出了将本文中描述的新颖体块型Yb:CaF₂激光系统的性能相对于现有技术激光器的性能进行比较的表格；以及

图6以图表方式示出了由本文中公开的Yb:CaF₂锁模激光系统的实施例实现的经改善的性能和增加的锁模状况。

具体实施方式

[0010] 本申请涉及用于与各种光学系统一起使用的高功率镱掺杂氟化钙（在下文中称为“Yb:CaF₂”）锁模激光系统的各种实施例。高功率Yb:CaF₂锁模激光系统的各种实施例包括：新颖的腔设计，其被配置成利用Yb掺杂光学晶体（诸如Yb:CaF₂）的独特光热属性来提供具有连续锁模范围的输出信号，该连续锁模范围跨越激光系统的输出功率动态范围的上部区

域的几乎百分之五十(50%)，同时减少或消除锁模窗口上部区域处的光谱不稳定性，同时使最低或几乎最低阶的横向空间高斯光束(TEM_{00})共振。在一个实施例中，本文中描述的高功率Yb:CaF₂锁模激光系统可以被配置成以大于约50 MHz的重复率来输送具有超过约20 W的平均输出功率的几乎变换有限的低于300 fs脉冲。例如，在一个实施例中，本文中描述的体块型Yb:CaF₂激光系统可以被配置成以大于约70 MHz的重复率来输送具有超过约25 W的平均输出功率的几乎变换有限的低于200 fs脉冲。在另一实施例中，本文中描述的体块型Yb:CaF₂激光系统可以被配置成以大于约80 MHz的重复率来输送具有超过约30 W或更高的平均输出功率的几乎变换有限的低于150 fs脉冲。本文中公开的高功率Yb:CaF₂锁模激光系统可以与谐波晶体、光学参量振荡器和用于各种多光子显微镜应用的类似器件结合地使用。可选地，本文中公开的高功率Yb:CaF₂锁模激光系统可以被配置为用于基于激光的光谱应用，其包括例如，双梳光谱应用。在另一实施例中，本文中公开的高功率Yb:CaF₂锁模激光系统可以包括：定位在其中或与其耦合的至少一个放大器模块，由此提供高功率锁模激光系统。可选地，高功率Yb:CaF₂锁模激光系统可以被用作泵浦源，以便泵浦近红外光学参量振荡器(在下文中称为“OPO”)和/或中红外OPO、和/或远红外OPO、和/或光学参量发生器。在另一应用中，本文中描述的高功率Yb:CaF₂锁模激光系统可以被用于制造各种各样的器件，诸如写入波导等等。在又一应用中，本文中描述的高功率Yb:CaF₂锁模激光系统可以与非线性光学材料结合地使用，以产生超连续光谱发生系统和器件，该非线性光学材料包括基于光纤的非线性光学器件和/或诸如蓝宝石、YAG或金刚石之类的体块型非线性器件。在又一应用中，本文中描述的高功率Yb:CaF₂锁模激光系统可以被用于产生用于光谱应用的双梳源。图2示出了高功率Yb:CaF₂锁模激光系统(在下文中称为“激光系统”)的实施例的示意图。如示出的，激光系统200包括：至少一个泵浦源202，其被配置成输出至少一个泵浦信号204。在一个实施例中，泵浦信号204具有约850 nm至约995 nm的波长。例如，在一个实施例中，泵浦信号204具有约979 nm的波长。在另一实施例中，泵浦信号204具有约940 nm的波长。可选地，泵浦信号204可以具有约976 nm的波长。在又一实施例中，泵浦信号204具有约917 nm的波长。在另一实施例中，泵浦信号204可以在其中包括多个波长。此外，泵浦源202可以被配置成输出连续波泵浦信号204。在另一实施例中，泵浦源202可以被配置成输出至少一个脉冲泵浦信号204。

[0011] 在说明性实施例中，泵浦源202包括：其中具有多个发射器的单个基于二极管的泵浦源，每个发射器被配置成输出光学信号。例如，在一个实施例中，单二极管泵浦源包括：位于单个二极管封装或器件内的多个激光二极管发射器，其中每个发射器被配置成将光学信号输出到单个光纤器件中。如此，单个光纤器件可以被配置成从多个激光二极管发射器接收光学信号并且输出单个泵浦信号。可选地，在本系统中可以使用多个基于二极管的泵浦源。此外，任何种类的替代泵浦源都可以与激光系统200一起使用。例如，光纤激光器可以被用作泵浦源202。如示出的，至少一个光纤器件206可以与单个基于二极管的泵浦源202耦合或以其他方式光通信，并且被配置成从泵浦源202内的多个发射器接收多个光学信号并且从其输出单个泵浦信号204。在一个实施例中，光纤器件206被配置成输出单个模混合泵浦信号204。可选地，光纤器件206可以被配置成输出非模混合泵浦信号204。此外，光纤器件206可以被配置成更改来自泵浦源202内的发射器中的至少一个的至少一个泵浦信号的偏振。例如，光纤器件206可以被配置成输出具有单一线性偏振的泵浦信号204。在替换方案

中,光纤器件206可以被配置成输出具有椭圆偏振的泵浦信号204。在另一替换方案中,光纤器件206可以被配置成输出去极化泵浦信号204。可选地,光纤器件206可以被配置成混合从定位在泵浦源202内的至少两个发射器接收的至少两个光学信号的模式、偏振、强度等等。本领域技术人员将领会的是,光纤器件206可以用任何种类的长度、横向尺寸等等进行制造。此外,在一个实施例中,光纤器件206可以包括具有100微米、200微米等等的核心大小的多模光纤、单模光纤、渐变折射率光纤、多孔光纤、光子晶体光纤等等。

[0012] 再次参考图2,泵浦信号204可以被引导到至少一个光学系统210中。在说明性实施例中,光学系统210包括第一透镜212和可选的第二透镜214。如此,图2示出了激光系统200,其具有被配置成将望远镜泵浦信号204聚焦到激光器中的透镜望远镜器件或系统。本领域技术人员将领会的是,可以在光学系统210中使用任何数量或类型的光学组件或器件。例如,如图2所示,至少一个可选的光学组件216可以定位在光学系统210内或接近光学系统210。示例性可选光学元件216包括但不限于透镜、光栅、光谱滤波器、分束器、传感器、空间孔径、快门、调制器、衰减器、均质器、偏振器等等。

[0013] 如图2中所示,泵浦信号204可以穿过高反射器220和/或输出耦合器260中的至少一个,并且可以入射在定位在激光腔290内的至少一个光学晶体系统230上。在说明性实施例中,高反射器220包括:至少一个光学涂层,其被配置成反射基本上全部(即,大于约99.9%)腔内信号236(即,具有约1000 nm至约1700 nm波长的光),同时通过该涂层透射基本上全部泵浦信号204(即,具有约850 nm至约995 nm波长的光)。在说明性实施例中,高反射器220包括至少一个平面体。在另一实施例中,高反射器220包括弯曲或弓形体。此外,高反射器220可以被耦合到至少一个光学工作台或支架。可选地,支撑高反射器220的光学工作台可以包括可调节的反射镜支架。在替换方案中,支撑高反射器220的光学工作台可以包括不可调节的反射镜支架。

[0014] 再次参考图2,至少一个光学晶体系统230可以定位在激光腔290内,并且被配置成在其中接收至少一部分泵浦信号204。在一个实施例中,光学晶体系统230包括:定位在至少一个晶体支架234上的至少一个光学晶体232。在一个实施例中,光学晶体232包括至少一种体块型光学材料。示例性体块型光学材料包括但不限于镱掺杂氟化钙(在下文中称为“Yb:CaF₂”)单晶材料、Yb:CaF₂陶瓷材料、Yb:CALGO、其他镱掺杂增益介质等等。可选地,本文中描述的Yb:CaF₂材料可以包括本领域中已知的一种或多种附加掺杂剂。例如,在一个实施例中,本文中描述的Yb:CaF₂材料可以具有从约880 nm延伸至约1100 nm的吸收光谱。此外,Yb:CaF₂材料可以被配置成响应于被泵浦信号204泵浦而生成具有从约1000 nm至约1700 nm或更大波长的至少一个腔内信号236。可选地,多个光学晶体232可以定位在激光腔290内。光学晶体232可以包括与入射泵浦信号204正交的至少一个小平面(facet)或者相对于入射泵浦信号204成角度的至少一个小平面。此外,泵浦信号204可以沿着光学晶体232的任何方向传播。如此,光学晶体232可以包括<100>切割的晶体。在另一实施例中,光学晶体232可以包括<110>切割的晶体。可选地,光学晶体232可以包括<111>切割的晶体。可选地,晶体可以在任何其他传播方向上被切割。

[0015] 如图2中所示,光学晶体232可以定位在至少一个晶体支架234上,该晶体支架234被配置成将光学晶体232牢固且精确地定位在激光腔290内。在说明性实施例中,激光腔290包括线性腔。可选地,激光腔290可以包括折叠腔、Z形腔、环形腔等等。如此,激光系统200可

以包括：被配置成允许用户根据需要来配置该腔架构的一个或多个附加的固定和/或可调节折叠镜、平面镜、曲面镜、二向色镜、色散管理镜等等。在说明性实施例中，晶体支架234可以与至少一个热控制系统238通信。例如，如果存在，热控制系统238可以包括一个或多个热电冷却器、制冷机、流体源、加热器、热电偶、传感器等等。在使用期间，热控制系统238可以被配置成监测和控制晶体支架234和定位在晶体支架234上的光学晶体232的温度。如此，晶体支架234可以由任何种类的材料制成，该材料包括具有高导热系数的材料。可选地，热控制系统238可以包括：一个或多个风扇或类似器件，其被配置成通过对流冷来却定位在晶体支架234上的光学晶体232，由此消除了对目前许多激光器中使用的复杂水基导热控制系统的需要。如此，晶体支架234可以包括：被配置成帮助光学晶体232的对流冷却的一个或多个特征或元件，诸如翅片、散热器等。此外，热控制系统238可以与至少一个内部或外部处理器通信，该处理器被配置成监测光学晶体232并将其维持在期望的温度。可选地，激光系统200可以在没有热控制系统238的情况下操作。

[0016] 再次参考图2，光学晶体232被配置成响应于被泵浦信号204泵浦而生成至少一个腔内信号236。腔内信号236可以被引导到定位在激光腔290内或接近激光腔290的至少一个锁模系统240中。在一个实施例中，锁模系统240包括至少一个克尔透镜锁模系统（在下文中称为“KLM系统”）。在另一实施例中，锁模系统240包括至少一个可饱和吸收器、半导体可饱和吸收镜（在下文中称为“SESAM”），和/或被配置成允许自启动锁模的混合KLM/SESAM系统。在另一实施例中，锁模系统240包括非线性光学晶体，其中有意相位不匹配的谐波生成提供自启动锁模。本领域技术人员将领会的是，任何种类的替换锁模系统和器件都可以与激光系统200一起使用。

[0017] 如图2中所示，至少一个腔内光学组件250可以定位在激光腔290内。在说明性实施例中，两个腔内光学组件250定位在激光腔290内，但是本领域技术人员将领会的是，可以在激光腔290内的各个位置中使用任何数量的器件。在一个实施例中，腔内光学组件250包括空间滤波器。在另一实施例中，腔内光学组件250包括偏振器。例如，激光系统200可以用线性偏振状态操作，其中腔内光学组件250包括腔内偏振选择元件。如此，激光系统200可以在共线配置中以两个正交线性偏振状态同时操作。附加地，两个偏振状态可以在略微不同的重复率下进行操作，同时占据相同的腔体积，从而减少了输出信号280上的共模噪声水平。

[0018] 可选地，可以使用任何种类的光学组件作为腔内光学组件250，其包括但不限于透镜、分束器、反射镜、光学滤波器、孔径、光阑（stop）、光圈、传感器、棱镜、色散补偿器件或系统、群延迟色散器件和系统、Gires-Tournois干涉仪镜、调制器、光学平面、布鲁斯特窗等等。在另一实施例中，腔内光学组件250包括至少一个谐波发生器件或晶体。例如，腔内光学组件250可以包括：至少一个谐波发生器件，其被配置成当利用泵浦信号204和/或腔内信号236中的至少一个进行泵浦时产生至少一个二次谐波信号、三次谐波信号、四次谐波信号等等。

[0019] 再次参考图2，激光系统200包括：至少一个输出耦合器260，其与高反射器220结合地限定了激光腔290。在一个实施例中，输出耦合器260被配置成透射腔内信号236的约百分之五（5%）到约百分之五十（50%）之间，由此允许腔内信号236的至少一部分离开激光腔290，由此产生具有约1000 nm至约1700 nm波长的输出信号280。例如，在一个实施例中，输出信号280具有在约1000 nm与1100 nm之间的波长。在另一实施例中，输出耦合器260被配

置成透射多于约百分之五(5%)且小于约百分之五十(50%)的腔内信号236。此外,本文中描述的独特的体块型Yb:CaF₂激光系统200(以及下面描述的并且在图3和4中示出的激光系统)可以被配置成以大于约50 MHz的重复率来输送具有超过约20 W的平均输出功率的几乎变换有限的低于300 fs脉冲。例如,在一个实施例中,本文中描述的体块型Yb:CaF₂激光系统可以被配置成以大于约70 MHz的重复率来输送具有超过约25 W的平均输出功率的几乎变换有限的低于200 fs的脉冲。可选地,存在其中输出信号280的输入峰值功率受限的应用,例如,光纤中的连续体生成,其中自聚焦导致在小于1 MW峰值功率和更高峰值功率下损坏光纤。对于这样的应用,可以通过增加激光系统200的重复率来增加激光系统200的平均功率,同时保持脉冲能量和脉冲持续时间二者(以及因此峰值功率)不变。因此,对于具有持续时间为100 fs的100 nJ脉冲,100 MHz的重复率将导致10 W的平均功率激光器,而200 MHz的重复率将产生20 W的平均功率,两者均具有1 MW的峰值功率。这样的较高重复率的激光器将产生较高的平均功率连续源(continuum source)并且在物理上较短,因此更紧凑。

[0020] 在另一实施例中,本文中描述的体块型Yb:CaF₂激光系统可以被配置成以大于约80 MHz的重复率来输送具有超过约30 W或更高的平均输出功率的几乎变换有限的低于150 fs的脉冲。在另一实施例中,本文中公开的各种激光系统可以被配置成输出至少一个至少20 W的输出信号,其具有200 fs或更小的脉冲宽度和至少300 MHz的重复率。可选地,本文中公开的各种激光系统可以被配置成输出至少一个至少20 W的输出信号,其具有200 fs或更小的脉冲宽度和至少400 MHz的重复率。此外,如图2中所示,腔内光学组件250可以是反射镜,其被配置成将泵浦信号204的至少一部分往回反射到光学晶体232中。可选地,输出耦合器260可以包括施加到其上的任何附加或替换的光学涂层。示例性附加涂层可以包括但不限于偏振涂层、带通滤波器涂层、陷波滤波器涂层、波长选择性涂层等等。

[0021] 图3示出了高功率镱掺杂氟化钙锁模激光系统(在下文中称为“激光系统”)的另一实施例的示意图。和先前的实施例一样,激光系统300包括:被配置成输出至少一个泵浦信号304的单个基于二极管的泵浦源302。和先前的实施例一样,激光系统包括:至少一个光纤器件306,其与基于单个基于二极管的泵浦源302耦合或以其他方式通信。泵浦信号304可以具有约850 nm至约995 nm的波长。例如,在一个实施例中,泵浦信号304具有约979 nm的波长。在另一实施例中,泵浦信号304具有约940 nm的波长。在另一实施例中,泵浦信号304具有约976 nm的波长。在又一实施例中,泵浦信号304具有约917 nm的波长。在另一实施例中,泵浦信号304可以在其中包括多个波长。此外,单个基于二极管的泵浦源302可以被配置成输出连续波泵浦信号304。在另一实施例中,单个基于二极管的泵浦源302可以被配置成输出至少一个脉冲泵浦信号304。

[0022] 再次参考图3,可以将由耦合到单个基于二极管的泵浦源302的光纤器件306输出的泵浦信号304引导到如上所述的至少一个光学系统310中。例如,光学系统310可以包括至少一个望远镜、准直器等等。在说明性实施例中,光学系统310包括:分束器,其被配置成接收泵浦信号304并且形成第一泵浦光束308a和至少第二泵浦光束308b。可选地,光学系统310可以包括各种光纤器件、波导、透镜、反射镜等等,这允许在任何期望的位置处将第一泵浦光束308a和第二泵浦光束308b中的至少一个插入到激光腔390中。

[0023] 如图3所示,激光腔390可以由高反射器320和输出耦合器360限定。本领域技术人员将领会的是,激光腔390可以用任何种类的配置来形成,该配置包括但不限于线性配置、

折叠腔、Z形腔、环形腔等等。如此,可以使用任何数量的平面或弯曲折叠镜、反射器、光学支架等等来形成任何期望的腔架构。如示出的,高反射器320被配置成允许第一泵浦光束308a的至少一部分穿过其中。如此,和先前的实施例一样,高反射器320可以包括施加到其上的一个或多个光学涂层。第一泵浦光束308a可以穿过高反射器320并且可以入射在定位在激光腔390内的至少一个光学晶体330和/或光学晶体332上。在说明性实施例中,高反射器320包括:至少一个光学涂层,其被配置成反射基本上全部(即,大于约99.9%)腔内信号336(即,具有约1000 nm至约1700 nm波长的光),同时通过该涂层透射基本上全部第一泵浦光束308a(即,具有约850 nm至约995 nm波长的光)。在说明性实施例中,高反射器320包括至少一个平面体。在另一实施例中,高反射器320包括弯曲或弓形体。此外,高反射器320可以被耦合到至少一个光学工作台或支架。可选地,支撑高反射器320的光学工作台可以包括可调节的反射镜支架。在替换方案中,支撑高反射器320的光学工作台可以包括不可调节的反射镜支架。

[0024] 和第一泵浦光束308a一样,第二泵浦光束308b可以被引导到激光腔390中并且使其入射在定位在激光腔390内的光学晶体系统330上。在说明性实施例中,第二泵浦光束308b被引导通过输出耦合器360。可选地,可以使用一个或多个光纤、波导、反射镜、自由空间传播系统等等将第二泵浦光束308b引导到输出耦合器360。例如,一个或多个光纤导管可以被配置成从光学系统310接收第二泵浦光束308b,并且经由输出耦合器360将第二泵浦光束308b引导到激光腔390中。在另一实施例中,一个或多个反射镜可以被配置成从光学系统310接收第二泵浦光束308b,并且将该第二泵浦光束308b的至少一部分引导到激光腔390中。

[0025] 再次参考图3,至少一个光学晶体系统330可以定位在激光腔390内,并且被配置成在其中接收第一泵浦光束308a和/或第二泵浦光束308b的至少一部分。和先前的实施例一样,光学晶体系统330包括定位在至少一个晶体支架334上的至少一个光学晶体332。可选地,光学晶体可以包括至少一种体块型光学材料。示例性体块型光学材料包括但不限于镱掺杂氟化钙“Yb:CaF₂”单晶材料、Yb:CaF₂陶瓷材料、Yb:CALGO、Yb:KGW、Yb:KYW、Yb:玻璃、Yb:LuO、Yb:YCOB、Yb:LuScO、其他Yb掺杂增益介质等等。可选地,本文中描述的Yb:CaF₂材料可以包括本领域中已知的一种或多种附加掺杂剂。例如,在一个实施例中,本文中描述的Yb:CaF₂材料可以具有从约880 nm延伸至约1100 nm的吸收光谱。此外,Yb:CaF₂材料可以被配置成响应于被第一泵浦光束308a和第二泵浦光束308b中的至少一个泵浦而生成具有从约1000 nm至约1700 nm或更大波长的至少一个腔内信号336。可选地,多个光学晶体332可以定位在激光腔390内。

[0026] 如图3中所示,光学晶体332可以定位在至少一个晶体支架334上,该晶体支架334被配置成将光学晶体332牢固且精确地定位在激光腔390内。在一个实施例中,光学晶体系统330可以与一个或多个热控制系统(未示出)通信,该热控制系统类似于上述热控制系统(参见段落[0008],图2)。例如,如果存在,热控制系统可以包括一个或多个热电冷却器、制冷机、流体源、加热器、热电偶、传感器等等。为了成本和简单性,常常合期望的是消除光学晶体332的水冷却,从而消除在这样的热控制系统中使用的组件,诸如制冷机。在说明性实施例中,光学晶体系统330包括空气冷却晶体支架系统334。本领域技术人员将领会的是,本申请中描述的各种激光系统可以在远高于已知损坏阈值的情况下操作,而即使在升高的温

度下也不会大幅降低平均功率。此外,与在其他有源光学材料中创建的强热透镜相比,由于在使用期间在Yb:CaF₂光学晶体中生成的弱热透镜,腔模式(腔内信号336的激光模式)对温度相对不敏感。因此,本申请中公开的激光系统可以在30℃或更高的温度下操作而不会大幅降低性能。如此,晶体支架334可以包括被配置成增强晶体支架334的对流冷却、并且通过扩展来增强光学晶体332的冷却的一个或多个特征、翅片、元件。

[0027] 再次参考图3,光学晶体332被配置成响应于被第一泵浦光束308a和第二泵浦光束308b泵浦而生成至少一个腔内信号336。腔内信号336可以被引导到定位在激光腔390内或接近激光腔390的至少一个锁模系统340中。腔内光学组件350可以包括空间滤波器。在另一实施例中,腔内光学组件350包括偏振器。可选地,可以使用任何种类的光学组件作为腔内光学组件350,其包括但不限于透镜、分束器、反射镜、光学滤波器、孔径、光阑、光圈、传感器、棱镜、色散补偿器件或系统、群延迟色散器件和系统、Gires-Tournois干涉仪镜、调制器、光学平面、布鲁斯特窗等等。在另一实施例中,腔内光学组件350包括至少一个谐波发生器件或晶体。例如,腔内光学组件350可以包括:至少一个谐波发生器件,其被配置成当利用第一泵浦光束308a、第二泵浦光束308b和/或腔内信号336中的至少一个泵浦时产生至少一个二次谐波信号、三次谐波信号、四次谐波信号等等。可选地,激光系统可以被腔倒空以增加脉冲能量。

[0028] 再次参考图3,激光系统300包括:至少一个输出耦合器360,其如上所述与高反射器320结合地限定激光腔390。在一个实施例中,输出耦合器360被配置成反射腔内信号336的约百分之五(5%)至约百分之五十(50%),由此允许腔内信号336的至少一部分离开激光腔390,由此产生具有约1000 nm至约1700 nm波长的输出信号380。例如,在一个实施例中,输出信号380具有在约1000 nm与1100 nm之间的波长。可选地,输出耦合器360可以包括施加到其上的任何附加或替换的光学涂层。示例性附加涂层可以包括但不限于偏振涂层、带通滤波器涂层、陷波滤波器涂层、波长选择性涂层等等。

[0029] 如图3所示,至少一个光学系统或器件392可以与激光腔390耦合或定位成与其光通信,并且被配置成接收输出信号380,并且在使用之前引导、修改、测量或以其他方式调节输出信号380。例如,在一个实施例中,外部光学系统392被配置成输出至少一个经修改的输出信号394。可选地,外部光学系统392包括:至少一个谐波发生系统,其被配置成响应于被输出信号380照射而输出一个或多个谐波光学信号。例如,外部光学系统392可以在其中包括至少一个二次谐波发生器件。在另一实施例中,外部光学系统392可以在其中包括至少一个三次谐波发生器件。在另一实施例中,外部光学系统392包括其中的至少一个倍频器件和至少一个光学参量振荡器。此外,外部光学系统392可以包括一个或多个放大器。在另一实施例中,外部光学系统392包括:红外光学参量振荡器,其可以被配置成由输出信号380直接泵浦。如此,外部光学参量振荡器392可以包括一个或多个非线性材料,诸如PPLN、PPLT、PPKTP、KTP、BBO、LBO等等。可选地,红外光学参量振荡器可以被腔倒空,以使脉冲能量和/或腔内频率成倍增加,以扩展调谐范围。红外光学参量振荡器的调谐范围可以通过使用来自OPO的信号和闲频(idler)的差频混合来进一步扩展到中红外,或者通过使用信号和泵浦或闲频和泵浦的和频混合来进一步扩展到可见光。本领域技术人员将领会的是,本文中描述的激光系统中的任何系统可以包括以上讨论的一个或多个外部光学系统。

[0030] 图4示出了高Yb:CaF₂锁模激光系统的另一实施例的示意图。如示出的,激光系统

400包括第一泵浦源402a和至少第二泵浦源402b。和先前的实施例一样,第一泵浦源402a和第二泵浦源402b可以包括基于二极管的泵浦器件,但是本领域技术人员将领会的是,任何种类的泵浦源都可以与本申请中描述的激光系统一起使用。此外,第一泵浦源402a可以耦合到第一光纤器件406a。类似地,第二泵浦源402b可以耦合到第二光纤器件406b。第一泵浦源402a被配置成生成至少一个泵浦信号404a,而第二泵浦源402b被配置成生成至少第二泵浦信号404b。在一个实施例中,第一泵浦信号404a和第二泵浦信号404b中的至少一个具有约850 nm至约995 nm的波长。例如,在一个实施例中,第一泵浦信号404a和第二泵浦信号404b中的至少一个具有约979 nm的波长。在另一实施例中,第一泵浦信号404a和第二泵浦信号404b中的至少一个具有约976 nm的波长。在另一实施例中,第一泵浦信号404a和第二泵浦信号404b中的至少一个具有约940 nm的波长。在又另一实施例中,第一泵浦信号404a和第二泵浦信号404b中的至少一个具有约917 nm的波长。可选地,第一泵浦信号404a和第二泵浦信号404b可以具有相同或不同的波长、偏振、重复率、功率等等。此外,第一泵浦源402a和第二泵浦源402b中的至少一个可以被配置成输出连续波泵浦信号。在另一实施例中,第一泵浦源402a和第二泵浦源402b中的至少一个可以被配置成输出至少一个脉冲泵浦信号。

[0031] 再次参考图4,第一泵浦信号404a和第二泵浦信号404b可以被引导到至少一个光学系统410中。本领域技术人员将领会的是,可以在光学系统410中使用任何数量或类型的光学组件或器件。例如,如图4所示,光学系统420中的至少一个包括:光束导向器,其被配置成通过其透射基本上全部的第二泵浦信号404b,同时基本上反射全部的输出信号480。在光学系统410中使用的示例性其他光学元件包括但不限于透镜、光栅、滤波器、分束器、传感器、孔径、快门、调制器、衰减器、均质器、偏振器等等。

[0032] 如图4中所示,第一泵浦信号404a可以穿过至少一个高反射器220,并且可以入射在定位在激光腔490内的至少一个光学晶体系统430上。类似地,第二泵浦信号404b可以穿过至少一个输出耦合器460,并且可以入射在定位在激光腔490内的光学晶体系统430上。和先前的实施例一样,高反射器420和输出耦合器460可以包括施加在其上的一个或多个上述涂层。此外,高反射器420和/或输出耦合器460可以包括平面体或弯曲体。

[0033] 再次参考图4,至少一个光学晶体系统430可以定位在激光腔490内并且被配置成在其中接收第一和第二泵浦信号404a、404b的至少一部分。在一个实施例中,光学晶体系统430包括:定位在至少一个晶体支架434上的至少一个光学晶体432。在一个实施例中,光学晶体432包括至少一种体块型光学材料。示例性体块型光学材料包括但不限于Yb:CaF₂单晶材料、Yb:CaF₂陶瓷材料、Yb:CALGO、其他Yb掺杂增益介质等等。可选地,本文中描述的Yb:CaF₂材料可以包括本领域中已知的一种或多种附加掺杂剂。例如,在一个实施例中,本文中描述的Yb:CaF₂材料可以具有从约880 nm延伸至约1100 nm的吸收光谱。此外,Yb:CaF₂材料可以被配置成响应于被第一泵浦信号404a和第二泵浦信号404b泵浦而生成具有从约1000 nm至约1700 nm或更大波长的至少一个腔内信号436。可选地,多个光学晶体432可以定位在激光腔490内。可选地,支撑光学晶体432的晶体支架434可以被配置成是空气冷却的、流体冷却的等等。如此,晶体支架434可以与至少一个风扇、制冷机、热电冷却器、传感器等等通信。

[0034] 再次参考图4,光学晶体432被配置成响应于被第一泵浦信号404a和第二泵浦信号

404b中的至少一个泵浦而生成至少一个腔内信号436。腔内信号436可以被引导到定位在激光腔490内或接近激光腔490的至少一个锁模系统440中。在一个实施例中，锁模系统440包括至少一个克尔透镜锁模系统(在下文中称为“KLM系统”)。在另一实施例中，锁模系统440包括至少一个可饱和吸收器、半导体可饱和吸收镜(在下文中称为“SESAM”)、和/或被配置成允许自启动锁模的混合KLM/SESAM系统。在另一实施例中，锁模系统240包括：非线性光学晶体，其中有意相位不匹配的谐波生成(例如，二次谐波生成、三次谐波生成等)提供自启动锁模。本领域技术人员将领会的是，任何种类的替换锁模系统和器件都可以与激光系统400一起使用。

[0035] 如图4中所示，至少一个腔内光学组件450可以定位在激光腔490内。在一个实施例中，腔内光学组件450包括空间滤波器。在另一实施例中，腔内光学组件450包括偏振器。可选地，可以使用任何种类的光学组件作为腔内光学组件450，其包括但不限于透镜、分束器、反射镜、光学滤波器、孔径、光阑、光圈、传感器、棱镜、色散补偿器件或系统、群延迟色散器件和系统、Gires-Tournois干涉仪镜、调制器、光学平面、布鲁斯特窗等等。在另一实施例中，腔内光学组件450包括至少一个谐波发生器件或晶体。

[0036] 再次参考图4，激光系统400包括：至少一个输出耦合器460，其与高反射器420结合地限定激光腔490。在一个实施例中，输出耦合器460被配置成输出具有约1000 nm至约1700 nm波长的输出信号480。例如，在一个实施例中，输出信号480具有在约1000 nm与1100 nm之间的波长。可选地，输出耦合器460可以包括施加到其上的任何附加或替换的光学涂层。示例性附加涂层可以包括但不限于偏振涂层、带通滤波器涂层、陷波滤波器涂层、波长选择性涂层等等。

[0037] 图5示出了将本文中描述的新颖体块型Yb:CaF₂激光系统的性能相对于通常用于多光子显微镜应用、光遗传学、微机械加工和类似应用的现有技术激光系统的性能进行比较的表格。如示出的，本文中描述的新颖体块型Yb:CaF₂激光系统能够以超过约60 MHz的重复率提供具有超过约20 W的平均功率和低于200 fs脉冲宽度的输出信号280。可选地，本文中描述的新颖体块型Yb:CaF₂激光系统能够以超过约60 MHz的重复率提供具有超过约25 W的平均功率和低于200 fs脉冲宽度的输出信号。在另一实施例中，本文中描述的新颖体块型Yb:CaF₂激光系统能够以超过约60 MHz的重复率提供具有超过约30 W或更高的平均功率和低于200 fs的脉冲宽度的输出信号280。相反，大多数竞争的现有技术激光系统包括复杂的薄盘激光系统，按照定义，它们不是体块型激光系统。而且，这些盘形激光系统不能够以大于约50 MHz的重复率和低于200 fs的脉冲宽度提供高功率输出信号。相反，如图5中所示，相对于本文中描述的新颖体块型Yb:CaF₂激光系统，现有技术的体块型激光系统能够提供可比较的重复率和脉冲宽度。然而，令人遗憾的是，现有技术的体块型激光系统不能够提供20 W或更高的输出功率。

[0038] 图6以图表方式示出了由本文中公开的Yb:CaF₂锁模激光系统的实施例实现的改善的性能。更具体地，图6以图表方式示出了这样的范围，其中连续波锁模信号作为输出功率对比来自泵浦源的泵浦功率的函数而从本文中描述的激光腔的输出耦合器中输出。如上文讨论的，本文中描述的激光系统的腔可以与任何种类的光学晶体一起使用，然而，这些腔特别适合于在其中包括镱掺杂的光学晶体。全部锁模振荡器都具有有限的工作范围，在此范围内，它们产生一连串稳定的单个超快脉冲。图1所示的行为表示使用半导体可饱和吸收

镜进行锁模的振荡器，但是其他锁模技术也产生类似的结果。在低泵浦功率下，振荡器首先达到阈值，然后产生完全没有脉冲的cw输出。在较高泵浦功率下，观察到调 q 锁模(Q-ML)操作区域，直到在还更高的泵浦功率下实现期望的cw锁模(CW-ML)性能。这种cw锁模操作区域是有限的，并且在较高的泵功率下，往往会出现不稳定性状况。这些不稳定性可以包括多次脉冲、光谱不稳定性、空间不稳定性和/或时间不稳定性。如图6所示，定位在当前激光腔内的Yb:CaF₂晶体的CW-ML操作状况远大于如图1所示的现有技术激光系统的CW-ML操作状况。结果，Yb:CaF₂激光器可以输出比现有技术系统更高的功率稳定腔内信号236(参见图2)，从而产生更高的输出信号280。这种大的cw锁模范围是弱热透镜效应、最佳腔设计和最佳可饱和吸收器设计的结果，并且导致激光系统的鲁棒性和可制造性增加。激光器也可以利用光环来进行操作，该光环修改泵浦功率，以便保持输出功率恒定，而不存在在不稳定状况下操作的风险。

[0039] 本文中公开的实施例说明了本发明的原理。可以采用其他修改，这些修改都在本发明的范围内。因此，本申请中公开的器件并不限于如本文中精确示出和描述的那些。

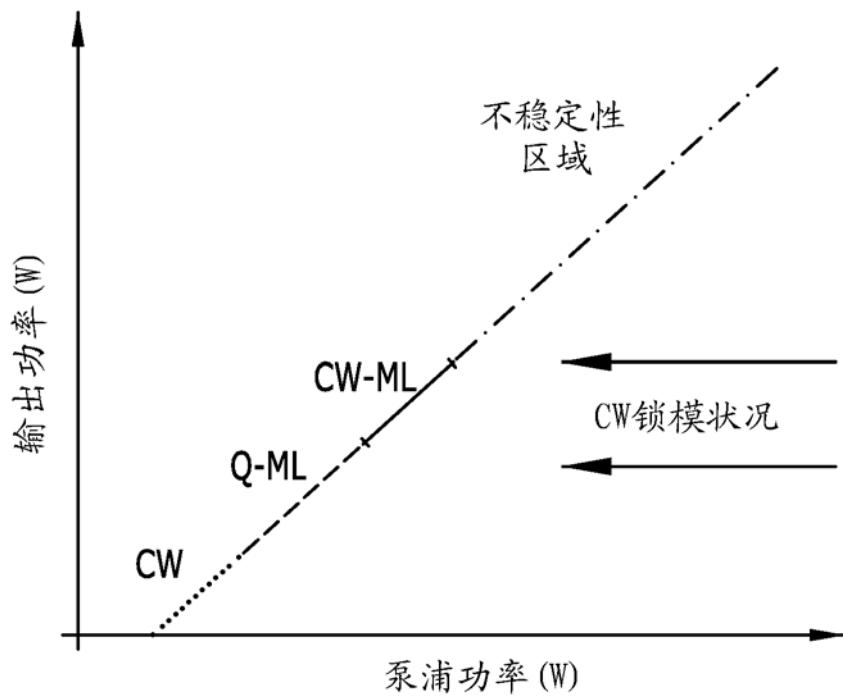


图 1

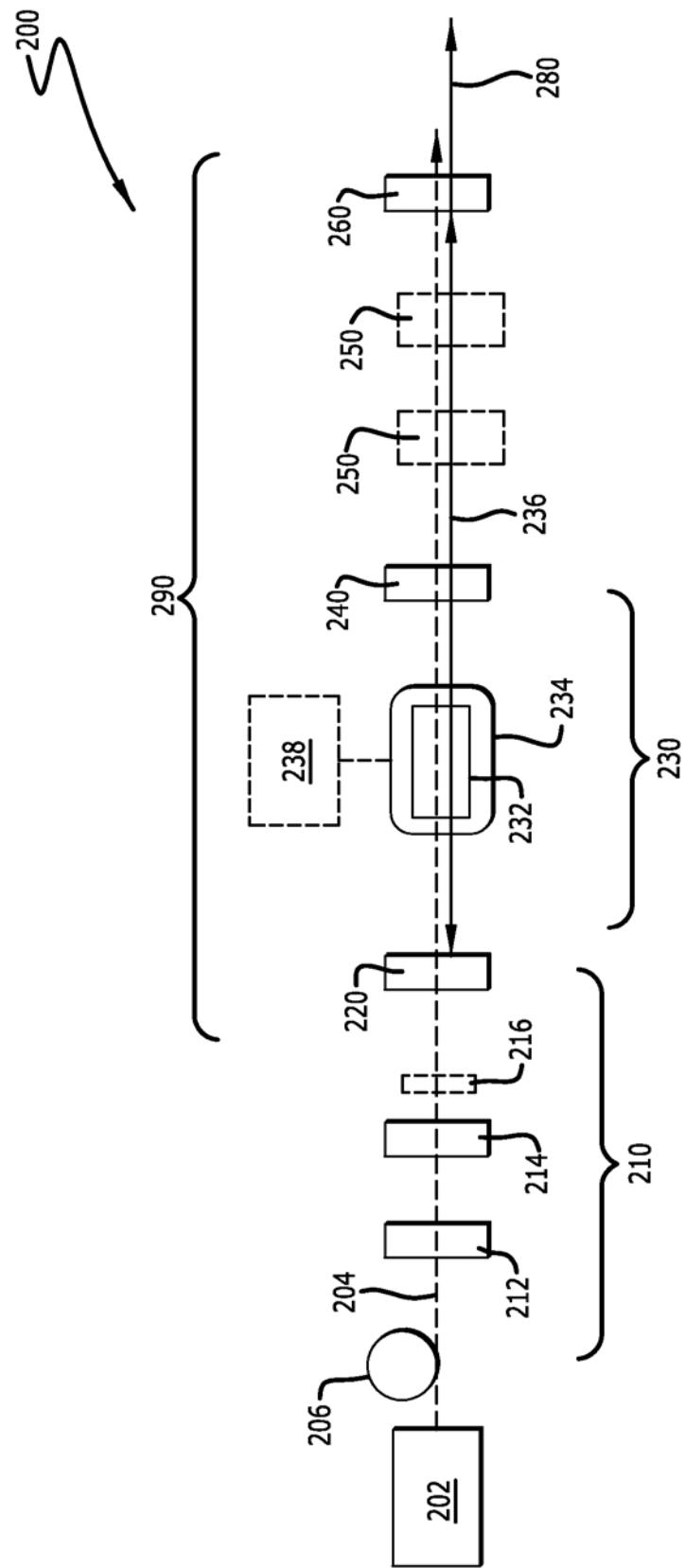


图 2

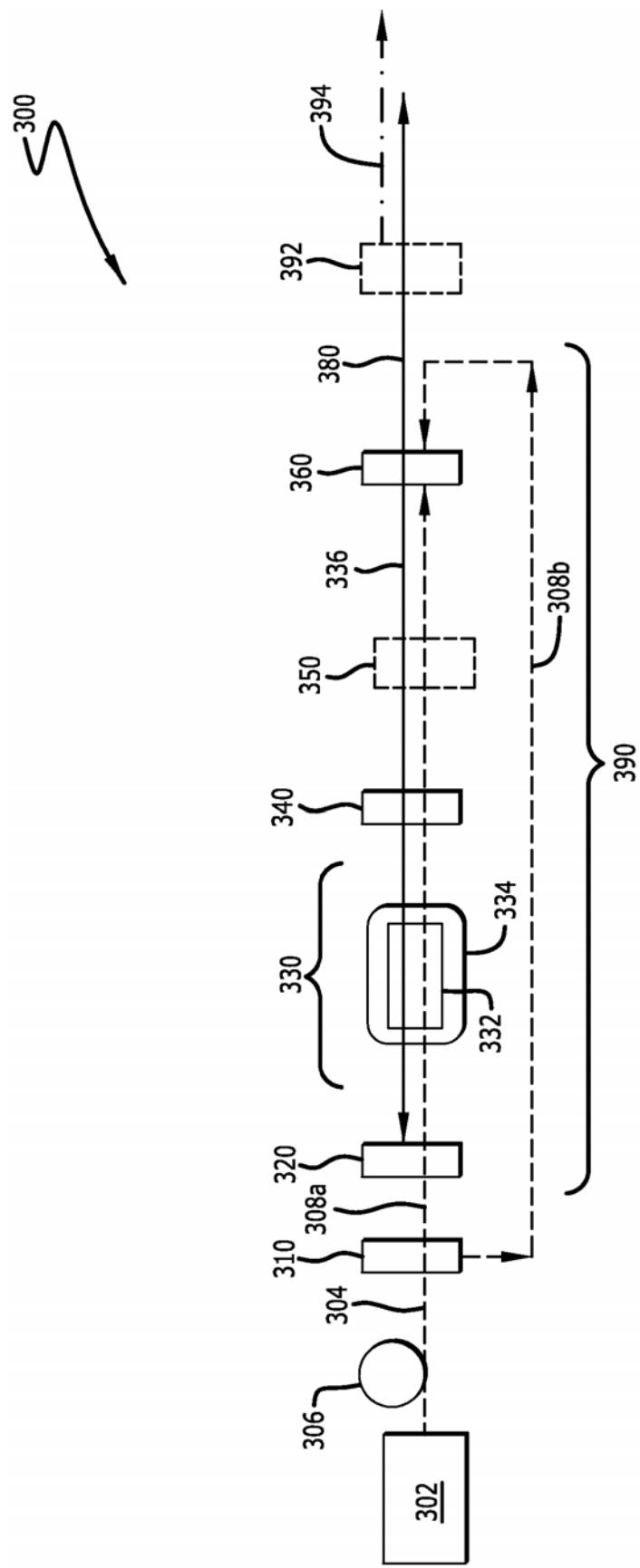


图 3

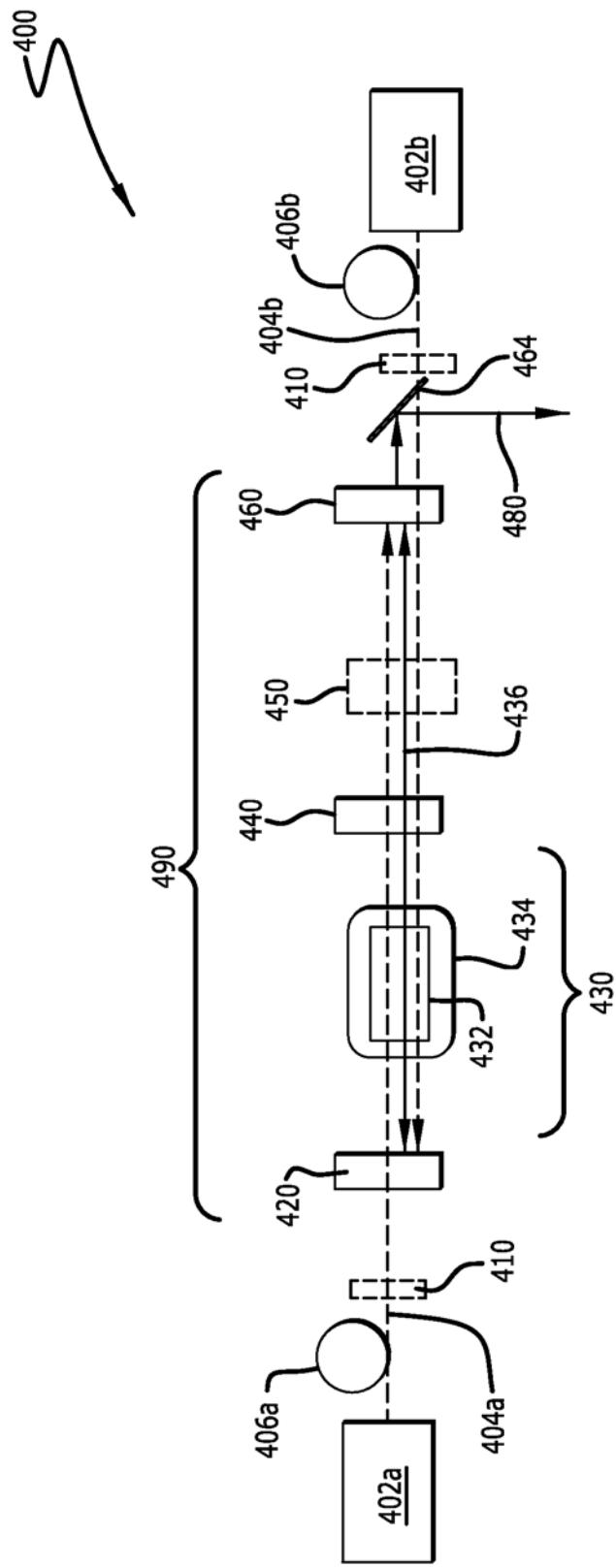


图 4

γ_b 材料	P_{ave} (W)	重 复 率 (MHz)	E (μ J)	τ_p (fs)	P_{peak} (0.88, MW)	几 何 结 构
YAG	275	16.3	16.87	583	25.5	盘形
YAG	145	3.5	41.43	1100	33.1	盘形
YAG	242	3	80.67	1000	66.0	盘形
YAG	44	4	11.00	791	12.2	盘形
YAG	270	19	14.21	330	37.9	盘形
YAG	155	15.6	9.94	140	62	盘形
KYW	22	25	0.88	240	3.2	盘形
CALGO	28	21	1.33	300	3.9	盘形
CALGO	20	21	0.95	197	4.3	盘形
CALGO	12.5	80	0.16	94	1.5	体块型
CALGO	0.015	200	0.0001	40	0.0017	体块型
LuO	141	60	2.35	738	2.8	盘形
YCOB	2	20	0.10	270	0.3	盘形
LuScO	23	70	0.33	235	1.2	盘形
CaF2	6.6	35	0.19	445	0.4	盘形
CaF2	17.8	10	1.78	285	5.5	盘形
CaF2	2.3	73	0.03	68	0.4	体块型
CaF2	0.38	113	0.0034	99	0.030	体块型
CaF2	1.74	85	0.02	230	0.08	体块型
CaF2	0.56	82	0.01	117	0.05	体块型
CaF2	2.7	73	0.04	48	0.7	体块型
CaF2	30	80	0.38	150	2.2	体块型

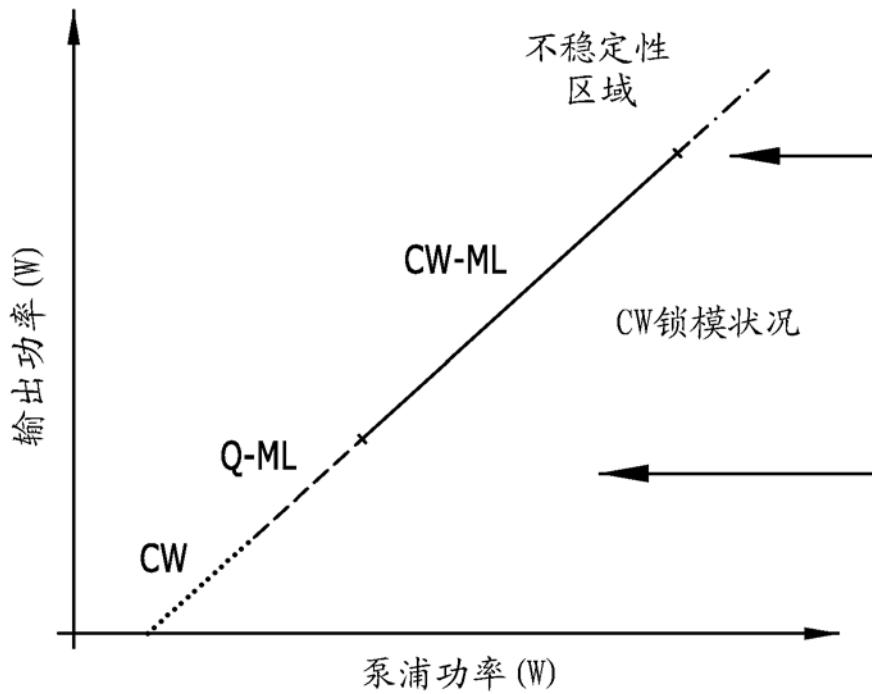


图 6