



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101939880 B

(45) 授权公告日 2013. 07. 24

(21) 申请号 200980104656. 5

(22) 申请日 2009. 02. 04

(30) 优先权数据

61/026, 952 2008. 02. 07 US

(85) PCT申请进入国家阶段日

2010. 08. 09

(86) PCT申请的申请数据

PCT/US2009/033051 2009. 02. 04

(87) PCT申请的公布数据

W02009/100113 EN 2009. 08. 13

(73) 专利权人 IMRA 美国公司

地址 美国密歇根州

(72) 发明人 M·E·费尔曼 I·哈特尔

A·马辛科维奇欧斯 董梁

(74) 专利代理机构 北京同恒源知识产权代理有限公司 11275

代理人 王维绮

(51) Int. Cl.

H01S 3/063 (2006. 01)

(56) 对比文件

US 5566196 A, 1996. 10. 15, 全文.

US 2005225846 A1, 2005. 10. 13, 全文.

US 5378888 A, 1995. 01. 03, 全文.

US 2003202547 A1, 2003. 10. 30, 全文.

US 2006263024 A1, 2006. 11. 23, 全文.

US 6570704 B2, 2003. 05. 27, 全文.

US 2007086713 A1, 2007. 04. 19, 全文.

CN 1253755 C, 2006. 04. 26, 全文.

审查员 史敏峰

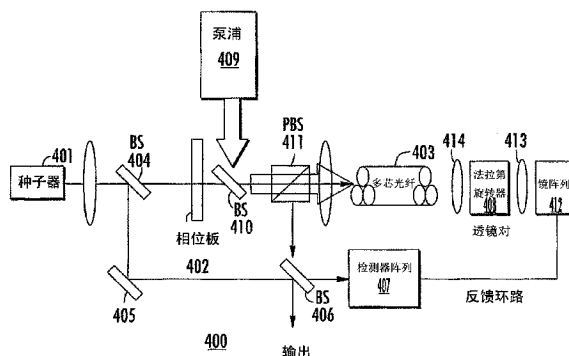
权利要求书3页 说明书18页 附图14页

(54) 发明名称

大功率平行光纤阵列

(57) 摘要

本发明披露了用于放大高峰值功率脉冲的大功率平行光纤阵列。可以实施基于各单独光纤放大器的光纤阵列以及基于多芯光纤的光纤阵列。利用各种相位检测和补偿技术来测量和控制光纤阵列的各光纤放大器元件之间的光学相位。大功率光纤阵列放大器可用于 EUV 和 X-射线生成以及参数放大器的泵浦。



1. 一种高峰值功率光纤放大器系统,包括:

以多芯光纤的形式实现的光纤放大器阵列,所述光纤放大器被间隔设置成使得所述光纤放大器的热起伏充分匹配以便将光纤放大器输出处的相对相位起伏限制在带宽小于10kHz 并且使得所述光纤放大器阵列的任何光纤放大器之间的光能耦合是可以忽略的;

激光源,所述激光源用于向所述光纤放大器阵列注入种子并产生脉宽在飞秒范围或1皮秒至1微秒的范围内的脉冲;

光束分配器,所述光束分配器设置在所述激光源和所述光纤放大器阵列之间,以便将来自所述激光源的脉冲分成入射到相应的阵列放大器上的多个光束路径,其中在所述路径中的光束的空间分配基本上类似于所述激光源的输出的空间分配;

至少一个泵浦源,所述泵浦源被设置成用于光学泵浦所述光纤放大器阵列;

多个相位控制元件,所述多个相位控制元件按空间关系设置并且光学连接至所述光纤放大器阵列的光纤放大器,所述元件改变至少一个光纤放大器输出的光学相位来响应相位控制信号;和

相位控制装置,所述相位控制装置用于产生所述控制信号以控制大多数所述光纤放大器阵列的光纤放大器的输出处的光学相位,其中所述控制信号和相位控制元件稳定大多数所述光纤放大器阵列的光纤放大器之间的光学输出相位。

2. 根据权利要求1所述的高峰值功率光纤放大器系统,所述系统包括插入在所述光纤放大器阵列的输出的下游的相位板,以便使所述光纤放大器阵列的输出的斯特列尔比最大化。

3. 根据权利要求1所述的高峰值功率光纤放大器系统,其中所述光纤放大器阵列的放大器之间的能量耦合小于1%。

4. 根据权利要求1所述的高峰值功率光纤放大器系统,其中所述相对相位起伏小于1KHz。

5. 根据权利要求1所述的高峰值功率光纤放大器系统,其中所述相位控制装置包括检测器阵列和用于处理从所述检测器获得的相位信息的自适应算法。

6. 根据权利要求5所述的高峰值功率光纤放大器系统,其中所述自适应算法包括遗传算法。

7. 根据权利要求1所述的高峰值功率光纤放大器系统,其中所述激光源包括锁模激光器。

8. 根据权利要求7所述的高峰值功率光纤放大器系统,其中所述激光源包括脉冲展宽器,所述脉冲展宽器用于增大从所述锁模激光器发射的脉冲的脉宽。

9. 根据权利要求1所述的高峰值功率光纤放大器系统,其中所述多芯光纤包括泄漏通道光纤。

10. 根据权利要求9所述的高峰值功率光纤放大器系统,其中所述泄漏通道光纤是保偏光纤。

11. 根据权利要求1所述的高峰值功率光纤放大器系统,所述系统包括信号参考臂和相位补偿器,所述参考臂被设置成干涉反向通过所述光纤放大器阵列的光束的一部分,以便通过所述相位补偿器对正向通过所述光纤放大器阵列的光束提供所述光纤放大器阵列的每个单独光纤放大器的光学相位的补偿。

12. 根据权利要求 11 所述的高峰值功率光纤放大器系统,其中所述相位补偿器包括空间光调制器。

13. 根据权利要求 1 所述的高峰值功率光纤放大器系统,其中所述光纤放大器阵列的光纤放大器之间的能量耦合小于 0.1%。

14. 根据权利要求 1 所述的高峰值功率光纤放大器系统,其中所述光纤放大器阵列被设置在用于 EUV 或 X-射线生成的系统中。

15. 根据权利要求 14 所述的高峰值功率光纤放大器系统,其中所述用于 EUV 或 X-射线生成的系统被用作光学制版中的光源。

16. 根据权利要求 1 所述的高峰值功率光纤放大器系统,其中所述光纤放大器阵列被设置成用于参数放大的泵浦源。

17. 根据权利要求 1 所述的高峰值功率光纤放大器系统,其中所述光纤放大器包括由阶跃折射率光纤、光子晶体光纤或布拉格光纤构成的各光纤。

18. 根据权利要求 1 所述的高峰值功率光纤放大器系统,还包括用于放大器阵列的侧面泵浦元件。

19. 根据权利要求 1 所述的高峰值功率光纤放大器系统,其中所述放大器被构造成双程结构。

20. 根据权利要求 1 所述的高峰值功率光纤放大器系统,其中相位控制元件包括分节镜阵列的一部分。

21. 根据权利要求 1 所述的高峰值功率光纤放大器系统,其中相位控制元件包括 MEMs 阵列的一部分。

22. 一种高峰值功率光纤放大器系统,包括:

以多芯光纤的形式实现的光纤放大器阵列,所述光纤放大器的纤芯的空间间隔足够小到能提供将所述光纤放大器阵列的输出相位起伏限制在带宽小于 10kHz 的强耦合,但是足够大到能将所述光纤放大器阵列的光纤放大器之间的光学模式耦合限制在 0.1%或更小;

激光源,所述激光源用于向所述光纤放大器阵列注入种子并产生脉宽在飞秒范围或 1 皮秒至 1 微秒的范围内的脉冲;

多个相位控制元件,所述多个相位控制元件按空间关系设置并且光学连接至所述光纤放大器阵列的光纤放大器,所述元件改变至少一个光纤放大器输出的光学相位来响应相位控制信号;和

相位控制器,所述相位控制器生成所述相位控制信号并可操作地稳定所述光纤放大器阵列的光纤放大器的输出处的光学相位。

23. 根据权利要求 22 所述的光纤放大器系统,其中所述光纤放大器阵列围绕共同的中心设置并且距离所述中心是大致等距的。

24. 根据权利要求 22 所述的光纤放大器系统,其中所述相位控制器的控制带宽小于 10KHz。

25. 根据权利要求 22 所述的光纤放大器系统,其中所述光纤放大器阵列被设置在单个环上并且距离共同的中心是大致等距的。

26. 根据权利要求 22 所述的光纤放大器系统,其中所述相位控制元件形成集成相位调

制器的一部分。

大功率平行光纤阵列

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] [001] 本申请要求申请日为 2008 年 2 月 7 日、名称为“大功率平行光纤阵列”的美国申请号 61/026,952 的优先权。

背景技术

技术领域

[0003] [002] 本发明涉及超高峰值功率光纤激光系统。

[0004] [003] 光纤放大器中的高效率放大一般需要伸长的放大器光纤长度,这导致在高功率电平下使光纤大量受到非线性自聚焦。事实上,已经证实由于自聚焦,光纤放大器中的可获得峰值功率受限于约 5MW。

[0005] [004] 为了克服光纤的一般非线性限制,已经提出了多芯光纤设计 (D. Scifres, 美国专利 5,566,196, Cheo 等人,美国专利 7,107,795)。多芯光纤设计在大纤芯面积上分布信号强度,并因此减轻任何非线性效应。为了获得近衍射极限的输出光束,还提出了可以在各纤芯之间实现被动锁定 (Scifres '196 和 Cheo 美国专利 6,031,850 以及许多其它的文献)。所述被动锁相方案能够以多种方式实现,例如通过在限制的光腔内设定多芯光纤激光。衍射效应随后可用于使锁相腔超模对其它腔超模的损耗最小化 (例如, M. Wragge 等人, Opt. Lett., 26, 980 (2001); L. Michaille 等人, 'Phase locking and supermode selection in multicore photonic crystal fiber lasers with a large doped area', Opt. Lett., vol. 30, pp. 1668 (2005))。被动锁相还被采用光纤阵列进行说明,例如 Shakir 等人的美国专利 7,130,133 和 Ionov 等人的美国专利 6,882,781。这些方法通常是基于一些类型的模式选择,所述模式选择导致与其它所有模式相比某些超模具有优选的振荡。通常,这些被动相干耦合技术是基于 cw (连续波) 激光信号的。此外,被动锁相方法难于实施并且具有有限的可扩展性。在 Verdiehl 等人的 US 5,121,400 中,还提出基于利用光折变材料的非线性组束的被动锁相。不过,光折变材料具有明显的功率限制并因此不能用于大功率应用中。

[0006] [005] 作为对所述被动相耦合技术的替代,还提出了相位共轭镜,以便从光纤耦合器和多模光纤的复杂结构中获得近衍射极限的模式 (Betin 等人的美国专利 6,480,327)。不过,迄今为止尚未设计出利用相位共轭构造出大功率光纤激光器的可靠方法。

[0007] [006] 作为对多芯光纤或光纤阵列的被动锁相的替代,业已考虑使用光纤激光器的非相干和相干叠加,以便克服单芯光纤的非线性限制。非线性叠加通常通过波分复用方法利用光纤激光器的线性阵列来实施,其中每个光纤激光器被设计成在不同的波长工作,以便通过波长选择性光学元件实现波长组合 (参见例如, T. Y. Fan, "Laser Beam Combining for High-Power High-Radiance Sources", IEEE J. Sel. Top. in Quantum Electronic, vol. 11, pp. 567 (2005))。该技术的一个限制是它通常受限于非常小的信号带宽并因此优选通过单频光纤激光器进行实施。在相干叠加中,通常平铺和连续孔 (径) 方法是突出的,这也披露于 Fan 的 (T. Y. Fan, "Laser Beam Combining for High-Power High-Radiance

Sources”, IEEE J. Sel. Top. in Quantum Electronic, vol. 11, pp. 567 (2005)) 中。

[0008] [007] 多个单独光纤的相干叠加在技术上有提及并且非常昂贵,对于实际的商业应用潜力有限。所述光纤阵列(通常被称为光纤相控阵列(FPA))的相干叠加已由若干组说明(E. Bott 等人的美国专利 5,694,408;Rice 等人的美国专利 5,946,130);

[0009] [008] Brosnan 等人的美国专利 6,366,356;Johnson 等人的美国专利 6,233,085;M. Minden 的美国专利 6,400,871;Rice 等人的美国专利 6,597,836;Rice 等人的美国专利 6,678,288;M. Wickham 等人的美国专利 6,708,003;R. Rice 等人的美国专利 6,813,069;R. Rice 等人的美国专利 7,065,110;T. Shay 等人的美国专利 7,187,492;Rothenberg 等人的美国专利 7,120,175;Rice 等人的美国专利 7,221,499 和 S. August, ‘Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers’, Opt. Lett., vol. 29, pp. 474 (2004)。所有这些系统基于平铺孔(径)方法并且大量借鉴了为天文学所开发的相位控制技术,即 J. W. Hardy 等人的“Real-time atmospheric compensation”, J. Opt. Soc. Am., vol. 67, pp. 360 (1977) 和 T. R. O’Meara 的“The multidither principle in adaptive optics”, J. Opt. Soc. Am., vol. 67, pp. 360 (1977)。在天文学应用中,光学成像系统的大气相(位波)前扰动通过将大波阵面(相前, phase front)分成若干个独立的部分并利用自适应镜和外差式相位检测以稳定每个单独部分中的波阵面来进行补偿。通过商用自适应镜,可以对带宽达到 KHz 量级的大气起伏补偿相前扰动。不过,多颤振式相位控制技术有助于平铺孔(径)相干叠加,迄今为止上述文献中没有涉及连续孔(径)FPA。

[0010] [009] 连续孔(径)结构中的相干叠加已披露于 Fan 的(T. Y. Fan, “Laser Beam Combining for High-Power High-Radiance Sources”, IEEE J. Sel. Top. in Quantum Electronics, vol. 11, pp. 567 (2005)) 并随后也披露于 Rice 等人的美国专利申请 11/361,352 中。不过,352 的系统描述了 cw(连续波)放大器的相干叠加并依靠具有较大反馈环路带宽的外差式相位检测技术。

[0011] [010] 事实上,将天文学已知的相(位波)前校正技术用到 FPA 的相位控制迄今为止是不可能的,这是因为在通常的光纤放大器中观察到非常大带宽的相位起伏,在频率高达 10-100kHz 时可以产生显而易见的相位起伏(参见例如 S. Augst, ‘Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers’, Opt. Lett., vol. 29, pp. 474 (2004))。因此,FPA 中的相位控制一般通过具有 MHz 级反馈环路带宽的外差式相位检测技术的锁相环路实现,这导致需要昂贵的声光调频器,所述调频器需要整合入每个独立的细光束以确保适当的相位控制。

[0012] [011] 此外,大部分演示的 FPA 的相干叠加具有用窄带宽 cw(连续波)激光源注入的 cw(连续波)光纤放大器并且脉冲源的相干叠加具有许多限制。例如,在 Bott 等人的美国专利 5,694,408 的研究中,Bott 只考虑了平铺孔(径)系统并且没有提出在放大 fs(飞秒)脉冲时减小光纤放大器中非线性的建议。在 Palese 等人的美国专利申请 09/808,330 的研究中,具有宽光谱带宽的脉冲源在光谱上被分成线性阵列的通道,并且每个通道在光纤放大器阵列的单独部件中被放大。随后,被放大的光谱通道在色散光学元件中进行重新组合。该方法的一个限制是在光谱分裂和重新组合过程中可能存在的有限的光谱填充率。

[0013] [012] 在另一项研究中,(参见 E. Cheung 等人的 ‘Phase locking of a pulsed fiber amplifier’, Opt. Soc. Conf. on Advanced Solid State Photonics, paper#WA2,

(2008)), 调幅 cw(连续波)束以相干的方式锁至非调制 cw(连续波)束, 这限制了该方案的光谱带宽和可获得的脉冲宽度。

[0014] [013] 在另一个例子中, (Mourou 等人在国际公开号为 WO 2007/034317 的'Optical Pulse Amplifier with High Peak and High Average Power'), 提出了在光纤阵列中相干叠加脉冲, 不过并未提出脉冲光纤放大器的相位控制的可行方案。例如, 建议在介入相位控制的两个延时啁啾脉冲时使用观察到的差拍信号。不过, 所述差拍信号只在脉冲在时域上重叠并尤其是对于低重复率脉冲源时可观察到, 这大大地使相位检测变得复杂。

[0015] [014] 没有光谱带宽限制的相干叠加已披露于 Hartl 等人同时待审的美国专利申请序列号 11/546, 998 的基于各分离的光纤放大器阵列或多芯光纤的相干多路复用 FPA 中, 该专利申请受让于本发明的受让人。序列号 11/546, 998 的公开内容在此以全文形式被结合入本文引用。

[0016] [015] 作为对使用多芯光纤以克服光纤的功率限制的替代, 还提出了高度多模光纤。这些多模光纤具有非常大的模面积并因此与单模光纤相比可以用低得多的光强度传播大功率信号。对所述多模光纤使用自适应控制的输入模式, 利用例如输入控制的遗传算法激励单个主模是可行的 [H. Itoh 等人的'Femtosecond pulse delivery through long multi-mode fiber using adaptive pulse synthesis' J. J. Appl. Phys., 45, 5761 (2006); X. Shen 等人的'Compensation for multimode fiber dispersion by adaptive optics', Opt. Lett., 30, 2985 (2005)]。所述主模在一段更长的时间上即使对于 km 长度的光纤(在好几百个 ms 的范围内)是稳定的, 因此可以实现基于遗传算法的较慢的自适应控制, 以便找到主模并调整光纤注入模式以随时间变化跟踪给定的主模。虽然这些方案能够补偿多模光纤中的模态色散, 多模光纤中的主模一般不受衍射极限的限制并且在大功率激光应用中使用有限。

[0017] [016] 另一种扩展光纤技术的功率极限的方法是外部增强腔的实施, 它利用增强腔和光纤放大器之间的自适应相位控制可以增大来自光纤放大器的功率达 1000-10,000 倍 (I. Hartl 等人的美国专利申请序列号 11/546, 998)。该技术的缺陷是在在不严重影响可能的腔 Q 和所述腔的色散特性的前提下一般很难从增强腔中提取光功率。

[0018] [017] 另一种扩展光纤技术的峰值功率极限的方法是参数放大方案的实施, 如最近披露于 Imeshev 等人的美国专利申请序列号 11/091, 015。在所述方案中, 量子放大器被用作参数放大器的泵浦。一般, 在量子放大器前可以插入脉冲展宽器, 以避免量子放大器中的 B- 积分问题。在量子放大器中放大的展宽脉冲在被引导用于泵浦参数放大器之前还可以被压缩。为了最大化的在商业应用中使用 Imeshev 在'015 中所讨论的系统, 量子放大器还可以是基于光纤系统的。不过, 目前为止尚没有公开将多芯光纤用于泵浦参数放大器的系统结构。

发明内容

[0019] [018] 本发明涉及超紧凑、大功率、高能光脉冲源及其应用的设计。

[0020] [019] 在第一实施例中, 利用在相干合成阵列光纤放大器中的啁啾脉冲放大来生成近衍射极限的高能脉冲。

[0021] [020] 在第二实施例中,各光纤放大器的相干叠加通过以多芯光纤的形式实现放大器阵列而得以简化。利用多芯光纤各芯中折射率起伏的强耦合将光纤内任意相位起伏的带宽减小至用具有 kHz 级反馈带宽的自适应光学仪器可控的水平。光纤模式耦合和各纤芯之间所产生的功率交换通过利用具有最小空间重叠的完全分离的纤芯减到最小。

[0022] [021] 可以实现具有几十个单独部件的光纤阵列,使得所生成的脉冲具有的峰值功率比在平均功率高于 100W 范围的光纤自聚焦极限高 10-100 倍。

[0023] [022] 光纤阵列与包层和侧面泵浦方案完全相容,并因此与可获得输出功率成比例的功率只受散热考虑的限制。

[0024] [023] 可以实施基于保偏光纤的光纤阵列,或者可替换地可以实施法拉第旋转器(转子)双程(双通)方案,以使光纤阵列输出处的偏振起伏减到最小。

[0025] [024] 多芯光纤的使用极大地降低了光纤相位阵列的复杂性,这对于使它们在经济上适于一般性使用是需要的。

[0026] [025] 在第三实施例中,通过利用具有模限制的光纤经由空气孔或总体低折射率泄漏通道可以设计具有密集纤芯的多芯光纤阵列。可替换的,可以使用多光纤阵列,所述阵列在泵浦耦合端相互连接时可以在信号耦合端分裂,以便使泵浦耦合方案的光学复杂度减到最小。所述强耦合多光纤阵列还大大降低了对于相干叠加的带宽要求。

[0027] [026] 在第四实施例中,通过利用相干空间模转换技术将光信号有效耦合至光纤阵列进一步实现了复杂度的降低。在光纤相位阵列的输出处和对于连续孔(径)结构的相干组束利用相干空间模转换技术还使相干合成光纤阵列的斯特列尔比(Strehl ratio)最大化。

[0028] [027] 在第五实施例中,描述了根据上述实施例的光纤相位阵列的相位检测和控制方案。可以在不同结构中用外差式相位检测进行光相位控制。

[0029] [028] 例如,可以用参考臂被设置成干涉光纤相位阵列的单独元件来实施外差式相位检测。为了实现外差式相位检测,参考臂通常以一频率调相,所述频率高于相位阵列的各元件之间的随机相位起伏的带宽。光学干涉图随后通过检测器阵列进行检测并且相位检测电子器件被用于利用适当的传感器来控制每个阵列元件中的光程长度,所述传感器光学连接至相位阵列。

[0030] [029] 用于控制光程长度的适当传感器的不同选择是可行的,例如以反射工作的镜阵列。

[0031] [030] 另外,对于相位检测可以实施不同的选择。例如,为了控制低重复率脉冲的每个光纤阵列元件的光学相位,波长不同于光纤放大器阵列的工作波长的其它连续波激光可耦合至每个阵列元件,并且整个相位检测可以在连续波激光的波长下进行。同样地,结合在脉冲间的光学泄漏信号的相位可用于相位检测。

[0032] [031] 另外,可以实施适当传感器的光学抖动,以便调制每个单独阵列元件的光程长度。非调制参照臂和光纤阵列的输出之间的光学干涉图的相敏检测可随后被用于控制每个光纤阵列元件的光程长度。

[0033] [032] 还可以基于自适应光学方案进行光学相位控制。

[0034] [033] 还可以基于快速遗传算法实施光学相位控制,以便利用斯特列尔比(Strehl ratio)的最大化作为优化目标找到和追踪基于多芯光纤结构的光纤相位阵列的相位相干

超模。

[0035] [034] 自适应光学方案还可以与数字全息方案结合,以便利用空间光调制器补偿光纤之间的相位起伏,所述空间光调制器产生光纤内相位起伏的复共轭并将其加至信号传输路径。

[0036] [035] 本文所述的实施例可用于大功率加工应用,泵浦光学参数放大器以及用于等离子, VUV, EUV 和 X 射线产生,或一般在希望功率上升但又受到非线性效应或器件损坏限制的地方。

[0037] [036] 在第六实施例中,描述了通过脉冲相干合成多芯光纤或一般光纤相位阵列进行泵浦的参数放大器。

附图说明

[0038] [037] 本发明的各方面通过结合附图进行详细描述 of 示例性、非限制性实施例而变得更为显而易见。附图仅是为了说明性目的,并且不按比例进行绘制。

[0039] [038] 附图中:

[0040] [039] 图 1 是用于光纤相位阵列中高能脉冲的放大的通用方案的示意图。

[0041] [040] 图 2 是利用多芯光纤通过相干叠加产生近衍射极限的光束的通用方案的示意图。

[0042] [041] 图 3a 是剖视图,示意性地示出了包括基于阶跃折射率光纤的各纤芯的多芯光纤。

[0043] [042] 图 3b 是剖视图,示意性地示出了包括基于泄漏通道光纤的各纤芯的多芯光纤。

[0044] [043] 图 3c 是剖视图,示意性地示出了包括基于保偏泄漏通道光纤的各纤芯的多芯光纤。

[0045] [044] 图 4 是图表,示出了单模阶跃折射率光纤(点线)和通常泄漏通道光纤(虚线和点画线)的半径模态强度分布图;虚线对应于沿两个低折射率毛细管的强度分布,而点画线对应沿两个间隙的强度分布。

[0046] [045] 图 5 是多芯光纤的侧面泵浦方案的图。

[0047] [046] 图 5a 示意性地示出了同轴多芯光纤。

[0048] [047] 图 6a 是用于相干叠加来自于以反射工作的多芯光纤放大器的各光纤的输出的通用方案的示意图。

[0049] [048] 图 6b 是种子信号注入多芯光纤放大器的示例性示意图。相同的方案还可以用于当相干叠加连续孔径结构中的各纤芯时,从多芯光纤放大器提取信号。

[0050] [049] 图 7 是商用的镜阵列的示意图。

[0051] [050] 图 8 是用于相干叠加来自于以透射(传输)工作的多芯光纤放大器的各光纤的输出的通用方案的示意图。

[0052] [051] 图 9 是利用在信号发射端处的锥形注入多芯光纤的通用方案的示意图。

[0053] [052] 图 10a 是利用连续波激光进行相位控制的相位控制多芯光纤放大器。

[0054] [053] 图 10b 是通过调制参考光束利用外差相位检测的相位控制多芯光纤放大器的示意图。

[0055] [054] 图 10c 是通过调制每个单独纤芯的光束路径利用外差相位检测的相位控制多芯光纤放大器的示意图。

[0056] [055] 图 10d 是利用频率梳的相位控制多芯光纤放大器的示意图。

[0057] [056] 图 10e 是利用干涉测量互相关器阵列的相位控制多芯光纤放大器的示意图。

[0058] [057] 图 11 是利用用于脉冲调制和相位控制的声光调制器的相位控制多芯光纤放大器的示意图。

[0059] [058] 图 12a 是多芯光纤阵列的泵浦耦合方案的示意图。

[0060] [059] 图 12b 是几何捆束光纤阵列的各光纤的示意图。

[0061] [060] 图 13 是根据另一实施例的参数放大器的示意图。

具体实施方式

[0062] [061] 图 1 示出了根据第一实施例的设计示例。系统 100 包括用于生成大功率光脉冲的大功率光纤相位阵列系统。脉冲在种子源 101 中生成,所述种子源 101 可包括二极管、光纤或固态激光器。脉冲的脉宽可以从 fs(飞秒)范围到约 1 μs。这些还可以利用色散光学元件适时展宽。用于色散脉冲展宽的元件是公知的(来自于啁啾脉冲放大系统),并在此不进一步进行讨论。种子源 101 的光脉冲通过耦合器 102 被分成各光束路径。这里示出了具有光纤光耦合器 102 的结构,但是可替换的,也可以使用大量光束分离器或大量衍射元件来产生光束路径的阵列。相位控制元件,例如调制器 103-105,随后被插入光束路径以实现各光束路径的相位控制。在各光束路径中传播的脉冲随后被耦合至光纤放大器 106-108 的阵列。为了获得高输出功率,光纤放大器通常是双包层并且任何传统的泵浦耦合技术可用于将泵浦光耦合至这些放大器。光纤放大器的输出通过元件 109 光学结合,所述元件 109 可以包括透镜阵列以及透镜阵列和色散光学元件的组合。在系统的输出处产生近衍射极限的光束 110,其中经由调制器 103-105 实现的相位控制被用于优化输出光束 110 的斯特列尔比(Strehl ratio)。可以在光束 110 的下游结合入其它大量光学元件,用于色散的脉冲压缩。所述元件是公知的(来自于啁啾脉冲放大系统),并在此不再进一步进行讨论。

[0063] [062] 图 2 示出了根据第二实施例的设计示例。系统 200 包括多芯光纤形式的光纤相位阵列。种子源 201 通过光学元件 202 分成一定数量的单独光束。单独的光束穿过相位控制元件的阵列,(例如,调制器 203),所述相位控制元件允许对每个单独光束进行独立相位控制。调相光束随后耦合至多芯光纤放大器 204,所述放大器包括多个单独(纤)芯 205。在这里示出了 7 个(纤)芯 205,但是更多数量的芯是可能的。多芯放大器 204 通常是双包层的,允许用大功率半导体激光进行泵浦。任何传统的泵浦耦合技术可用于将泵浦光耦合至多芯放大器 204。多芯光纤放大器 204 的输出穿过光束成形元件 206,所述元件 206 可以包括透镜阵列和色散光学元件。在系统的输出处产生近衍射极限的光束 207,其中经由调制器 203 实现的相位控制被用于优化输出光束 207 的斯特列尔比(Strehl ratio)。可以在种子源 201 的上游和光束 207 的下游结合入其它大量光纤元件,用于色散的脉冲展宽和压缩。所述元件是公知的(来自于啁啾脉冲放大系统),并在此不再进一步进行讨论。

[0064] [063] 图 3a 示出了根据第三实施例的多芯光纤的截面的具体设计示例。它包括包层直径为 330 μm 的光纤棒和 19 个单模光纤的等距阵列。在本示例中光纤外径为 400 μm。

每个单独纤芯的纤芯直径为 30 μm 并且芯至芯间距为 60 μm 。可以实现不同的纤芯设计, 即, 传统的阶跃折射率光纤设计, 微结构光纤 (L. Michaille 等人的 'Phase locking and supermode selection in multicore photonic crystal fiber lasers with a large doped area', Opt. Lett., vol. 30, pp. 1668 (2005)), 以及泄漏通道光纤 (Dong 等人的美国申请序列号 11/134, 856) 和布拉格 (Bragg) 光纤。所有这些光纤设计在本领域中是公知的, 并且不在此进一步进行描述。在所有这些设计中, 掺杂 Yb (或另一稀土掺杂剂) 可易于在纤芯区域进行实施, 以实现信号放大。还可以实施用于泵浦导向的薄的低折射率包层材料。该光纤的组合纤芯面积约为 13400 μm^2 并且比传统大芯径光纤的最大可能纤芯面积大大约 3 倍。包层 / 纤芯面积比达到 6.4; 因此所述结构在低 Yb 掺杂水平下可以获得非常高的包层吸收, 这大大简化了该结构的制造并延长了光纤的使用期限。

[0065] [064] 图 3b 示出了基于泄漏通道光纤具有 19 个单独单模纤芯的多芯光纤的截面的示例。在这里, 阴影线圈代表纤芯区域, 所述纤芯区域用 Yb 掺杂, 而小的无阴影线圈代表具有减小的折射率的空气孔或玻璃区域。具有相应泄漏通道的每个单独纤芯的设计遵循 Dong 等人在同时待审的美国申请所披露的设计依据, 所述美国申请是: 序列号 11/134, 856, 序列号 60/975, 478, 序列号 61/086, 433 和 PCT 国际申请号 PCT/US/74668, 每个的发明名称为 "Glass Large-Core Optical Fibers (玻璃大芯径光纤)", 并转让给本发明的受让人。序列号 11/134, 856, 60/975, 478, 61/086, 433 和 PCT/US/74668 的公开内容在此以全文形式被结合入本文引用。

[0066] [065] 选择气孔尺寸或具有减小的折射率的区域尺寸以便提供基模的可接受损耗, 同时提供更高阶模的高损耗。在示例性实施例中, 折射率密切匹配熔融石英玻璃的折射率的镱掺杂棒按六边形与第二类型棒堆叠, 所述第二类型棒可具有相同的直径, 从而每个镱掺杂棒由 6 个第二类型棒环绕。镱掺杂棒可具有被熔融石英玻璃环绕的镱掺杂中心部分。第二类型棒具有较低折射率的中心部分, 例如, 氟掺杂石英, 还被熔融石英玻璃环绕。(镱元素棒直径)/(第二类型棒直径)的比率通常在 0.6 和 0.9 之间。六边形层叠通常插入石英玻璃管中, 所述石英玻璃管的内径稍大于六边形层叠的外径。在一个实施例中, 所得到的预制件在光纤拉丝塔上被拉制成适当的光纤直径, 其中外管的内部被抽真空。还可以在光纤上设置较低折射率的聚合物涂层, 以便泵浦光可以在光纤的玻璃区域导向。在另一个实施例中, 在层叠和石英管之间设置毛细管层, 以便泵浦可以在气孔层内引导。在另一可替换实施例中, 毛细管可用于代替具有氟掺杂中心部分的第二棒类型。在另一实施例中, 硼掺杂的石英棒可用在如图 3c 所示的结构中, 以便对于保偏应用使每个泄漏通道纤芯双折射。所述保偏、多芯、泄漏通道结构的示例将在下文进一步说明。

[0067] [066] 与传统的阶跃折射率多芯单模光纤相比, 使用多芯泄漏通道光纤允许更密集排列的纤芯, 具有更小的模式耦合, 这是由于每个单独模式的模态翼的最小化。这在图 4 中进一步示出, 其中传统单模光纤的模态强度分布与泄漏通道光纤的强度分布进行比较。显然, 泄漏通道光纤的强度分布的翼比传统阶跃折射率光纤减小到零要快得多。

[0068] [067] 在图 3b 和 3c 所示的示例中, 在两个相邻的稀土掺杂的纤芯区域之间设置有一个低折射率结构。为了进一步降低模式耦合, 可以增大纤芯分隔并且可以在两个掺杂纤芯区域之间设置多于一个的低折射率结构。

[0069] [068] 通过泄漏通道光纤, 可以获得具有单独纤芯之间最小耦合的纤芯直径 / 纤

芯分隔比 ~ 0.5 。当相干叠加所述基于泄漏通道的多芯光纤的所有发射图样时,在平铺孔径结构可以获得远场发射图样的斯特列尔比 > 0.4 ,而不需要使用任何相干模式修改元件(modifying element)如相位板。这里,我们记得斯特列尔比(Strehl ratio)是具有某一强度的光束的远场强度与在孔内硬边孔径光束的远场强度上的相位分布的比率。利用下文说明的连续孔径结构可以获得接近一致的斯特列尔比。即使在连续孔径结构中,多芯光纤中密集排列的单独纤芯是有益的,因为它使得整体光纤直径最小化并且与具有较大外径的光纤相比具有改进的散热。

[0070] [069] 多芯结构中任何密集排列的纤芯导致超模的形成和纤芯之间的模式耦合。通过不同的物理机制(例如应力或内置的折射率变化),可能造成多芯结构内的内在折射率起伏。结果,可大大抑制超模。光纤中的模式可被表示为各纤芯模式的简单线性组合,而可忽略模式之间的模式耦合。

[0071] [070] 为了使模式耦合可被忽略,优选光纤阵列元件之间的能量耦合小于约1%,并且更优选小于0.1%,或小于0.02%。在发明人的一个实验中,观察到约0.01%的耦合。

[0072] [071] 超模抑制对于大芯径光纤是最有效的,这里纤芯直径为 $> 30 \mu\text{m}$ 。与各大芯径光纤相比(其中折射率起伏限制可获得的模态尺寸),多模光纤中折射率起伏实际上是有益的,因为它们允许增大的纤芯堆叠密度(stacking density)和与各大芯径光纤相比更大的有效模态区域。

[0073] [072] 还能够以全保偏(PM)结构制造多芯光纤激光器。多芯PM光纤的示例性设计在图3c中示出。这里示出了泄漏通道光纤。所述光纤与图3b所示的结构非常相似,但是另外结合入应力产生区域,所述区域由图3c中与每个纤芯相对设置的小的阴影区域表示。在本示例中,应力产生区域对应直接环绕每个纤芯的六个结构中的两个。所述区域在纤芯中产生应力并导致保偏工作。PM单芯PM泄漏通道光纤在下述文献中有讨论:Dong等人的美国申请序列号11/134,856;美国临时申请60/975,478;序列号61/086,433;和PCT国际申请号PCT/US/74668,每个的发明名称为“Glass Large-Core Optical Fibers”。多芯PM泄漏通道光纤设计将这些保偏实施例按比例调至多芯并因此不再这里进一步讨论。

[0074] [073] 多芯光纤还可以如图5所示被进行侧面泵浦,图5示出了多芯光纤301的侧面泵浦结构300。多芯光纤阵列301包括较大直径固态玻璃棒。V形槽302和可选的303随后被切入多芯光纤的侧面。多芯光纤包括各纤芯304-306;只示出了三个纤芯但是更大数量的纤芯是可能的。V形槽302和303用于引导泵浦光进入多芯光纤结构,其中泵浦光用箭头307和308标示。该泵浦方案非常类似于下述文献中对于单芯光纤所述的方案,所述文献是:名称为‘Method for coupling light into cladding-pumped fiber sources using embedded mirror’的美国专利5,854,865,和名称为‘Method and apparatus for side pumping a fiber’的美国专利6,704,479。这些和各种其它泵浦结构对于单芯光纤泵浦是公知的,并因此在此处不再进一步描述。图5只作为侧面泵浦方案的一个示例;原则上还可以使用结合单芯双包层光纤所用的任何侧面泵浦方案。

[0075] [074] 对于长度为1m的Yb玻璃多芯光纤,输出功率为1kW的热负荷计算为约50-100W,其反过来在中央和周边纤芯区域之间产生约 10°C 的温度差。在满热负荷下中央和周边纤芯之间的对应光程长度差因此为约 $110 \mu\text{m}$,对应0.3ps的时间延迟。对于接近带宽极限的ns长度脉冲,该时间延迟不需要补偿,只要相干时间远远大于约1ps即可。对于

fs 或强啁啾 ps 和 ns 脉冲,热引起的光程长度差需要补偿。这可以通过在光纤之前或之后引入合适的相位延迟来实现。所述相位延迟可以,例如通过某一厚度的光学相位板来实现。对于小的热负荷,自适应光学补偿方案可以调节光程长度差。

[0076] [075] 另外,纤芯可以位于光纤外周(外缘)处的单个环上,如图 5a 所示示例。在不同的实施例中,所有纤芯具有大致相同的与光纤中心的径向间隔距离,并且所有纤芯之间的热引起的光程长度差大致相等。在下文中我们将此种结构称为同轴多芯光纤。另外,将所有纤芯设置在同轴多芯光纤的外缘上使得在超出传统玻璃棒的应力破裂极限的吸收级下同轴多芯光纤能更有效的冷却和工作。原因是,与相同热负荷/每米的传统玻璃棒相比,对于相同的热负荷在同轴多芯光纤的中心的温度升高明显较低。为了在非常大的热负荷级下工作,因此将泵浦光也限制在光纤外周处的环上是有益的。这可以例如通过对中心光纤区域使用低折射率材料(例如氟化玻璃)来实现。多种变形的同轴多芯光纤是可行的,其中纤芯绕光纤中心对称设置。在一些实施例中,纤芯可以设置在规则多边形的顶点,例如具有 6,8,12 或更多边的多边形。结构可以绕每个纤芯设置并可能包括空气孔或低折射率玻璃。在某些实施例中可以采用类似于图 3c 所示的保偏结构。

[0077] [076] 图 6a 示出了用于在所有各纤芯中进行同步相位控制的装置 400 中的第四实施例的多芯光纤放大器的示例性实施例。这里,使用如图 3a 和 3b 所示的多芯光纤。在一个基本实施例中,来自于种子激光器(laser seeder)401 的光学近衍射极限光束的前端经由相位板 402(或衍射光学元件)映到多芯光纤放大器 403 的前端面上。相位掩模板 402 用于将来自于种子激光器的单光束型在多芯光纤 403 的表面上转换成多光束型并且将前端系统的光集中至多芯放大器的每个单独纤芯的位置。在本示例中,种子光的一部分通过光束分离器(BS)404、406 和镜 405 被导向用于相位检测的检测器阵列 407。原则上,还可以实施具有相应多光束型的多于一个的种子激光器。为了使光束从种子经由相位板传送至多芯放大器能够稳定工作,任何多个种子光束需要相干。通过多个种子光束实现的系统是图 6a 的直接扩展,在此不再进一步讨论。

[0078] [077] 为了避免从多芯放大器的反馈,通常在种子(激光)器 401 后插入隔离器(未示出)。种子(激光)器光 401 在程放大器中的每个单独纤芯中被放大,其中包括法拉第(Faraday)旋转镜的双程(双通)结构用于使信号增益最大化和补偿组件内的任何偏振漂移。

[0079] [078] 在本示例中示出了端面泵浦结构。泵浦激光器 409 的泵浦光经由插入在信号发射端的二向色光束分离器 410 和偏振光束分离器 411 提供。这里,假设泵浦和种子光具有相反的偏振态。二向色光束分离器的适当光学(器件)上游还用于使泵浦和信号光束的耦合效率最大化。泵浦可从光束成形半导体激光器方便地获得(参见例如 Fermann 等人的美国专利 6,778,732 及其参考文献)并耦合至多芯光纤的泵浦包层。另外,可以实施结合图 5 所述的侧面泵浦方案,它进一步简化了组件。同样地,当结合入集成部件来代替本实施例中的大量光学部件时,可以进一步简化组件。

[0080] [079] 在第一次通过多芯光纤之后插入自适应镜或自适应镜阵列 412 以调制和控制各纤芯之间缓慢变化的相位。镜阵列可以例如由压电传感器以及 MEMs 阵列构成。还具有透镜对 413,414,以便将多芯光纤 403 的输出映到镜阵列 412 上。多芯光纤棒 403 的输出经由偏振光束分离器 411 被引导至与第一相位板 402 相似的第二相位板(未示出)上,用

于光束合成并随后导至应用。一小部分的输出光束经由光束分离器 406 被引导到检测器阵列 407 上。通过一部分种子信号与一部分多芯光纤 403 的输出进行干涉,可获得对应于多芯光纤中每个单独纤芯的光程的相位信息。

[0081] [080] 种子激光器的信号可能被适时色散拉伸并且可能包括其它大量色散脉冲压缩元件以进一步增大脉冲的峰值功率。

[0082] [081] 图 7 中示出了商用自适应镜阵列的示例。对于设计得很好的镜阵列,每个镜的位置可以在 100-1000Hz 的频率之间进行调整,这足以补偿多芯光纤阵列中的缓慢相位起伏,一旦光纤在恒定温度下工作,所述相位起伏在 1-100Hz 范围的带宽具有最大波幅。

[0083] [082] 在不同的实施例中,具有在空间上分隔的镜的阵列的商用 MEMs 器件可用于相位控制。MEMs 阵列的每个元件可以包括可控制沿光轴几微米长度(行程长度)上的镜,并能够提供倾斜(tip/tilt)控制。举例来说,可从 Iris AO 公司获得的 S37 系列包括 MEMs 可变形镜,包含具有 37 个元件的阵列,最大行程为 12 μm ,可控制高达约 2KHz,具有控制软件。

[0084] [083] 在不同的实施例中,利用天文学已知的标准技术进行所需的自适应镜电子驱动器控制,即,对每个镜施加一小的抖动信号并且利用在抖动频率下的外差检测来测量沿该臂的光学信号路径的相位。

[0085] [084] 通过该多芯光纤阵列,可以超过传统单模光纤的功率极限达 10-100 的量级,其中平均功率容量可在 kW 范围。

[0086] [085] 包括用于相干叠加的光学结构 500 的第四实施例的特定设计示例进一步在图 6b 进行讨论。为了简化起见,我们假设多芯光纤 501 是侧面泵浦的和保偏的。单模光纤的输出(未示出)通过合适的望远镜(telescope)(也未示出)放大,以便在点 P0 位置的平面 503 上产生光点直径为 100 μm 的输入光束 502。在波长为 1 μm 下相应的角散度因此为 0.73 度而相应的输入光束的数值孔径为 0.0064。焦距为 100mm 的第一透镜 L1 504 随后用于使来自点 P0 的光束准直。相位板 505 设置在与透镜 504 距离 100mm 的位置,以便将输入光束分成多个衍射光束。相位板上的光点直径由输入光束的散度计算为 1.3mm。通过选择在相位板上的调制周期为 $d = 0.4\text{mm}$,我们得到的衍射角为 $\sin(\alpha) = 1/400 = 0.0025$ 。通过将相位板设置在焦距为 40mm 的第二透镜 L2 506 的焦距上,单个光束转变成光束阵列,其中光点直径为 40 μm ,光束至光束的间隔为 100 μm 。

[0087] [086] 设计用于接收输入光束的适宜多芯光纤 501 可以是纤芯直径为 50 μm 并且芯至芯间隔为 100 μm 的损耗通道光纤(例如:泄漏通道光纤或另一不同设计的多芯光纤)。相同的结构还可进行反向工作,将多芯光纤的输出合成为单个光束,其中透镜 L1504 可被省略。同样,反向工作的图 6b 所示光学结构也可用于利用仅单次通过多芯光纤阵列 501 的连续孔径结构中的光束合成。用于控制单程(单通)结构中每个单独纤芯的相位的技术将在下文结合图 8 进行讨论。

[0088] [087] 通过利用点 P0 上游的隔离器可以将多芯光纤放大器 501 与种子光束隔离。另外,当以双程(双通)结构工作时,通过将法拉第(Faraday)旋转器和偏振光束分离器设置在点 P0 的上游可以提取输出。所述光学元件在本领域中是公知的,在此不再进一步讨论。

[0089] [088] 在图 6b 所示的结构中,多芯光纤的第二远端被映到镜阵列上,例如图 7 所示

的阵列。由于镜阵列的各面通常在直径为 mm 的量级,可以实施适当的放大光学器件,以便在镜阵列上增大多芯光纤的各细光束的间隔。用于镜像放大的光学器件在本领域中是公知的,在此不再进一步讨论。

[0090] [089] 在第四实施例的变形中,除了双程(双通)结构外,还可以实施单程(单通)结构。不过,单程(单通)结构稍更复杂并且不能自动对放大器内的任何偏振漂移进行补偿。因此,对于单程(单通)结构,使用如图 3c 所示的保偏多芯光纤阵列是合宜的。利用保偏多芯光纤 601 的示例性单程(单通)结构 600 在图 8 中示出。这里,示出了在尺寸上与最终功率放大器 601 匹配的多芯光纤前置放大器 602,所述前置放大器用于在空间上预先准备信号光束,以便将镜阵列的输出最佳耦合至最终功率放大器。同样,使用侧面泵浦方案进一步简化了光学组件。通过用如图 9 所示具有单光束输入的锥形多芯光纤来代替前置放大器多芯光纤,可以进一步简化光学结构。这里,多芯光纤 700 在信号输入端 701 渐缩成小直径。所述多芯光纤等同于星形耦合器,在光纤的扩展区域中将输入信号大致相等地分成所有的各单独纤芯。锥形光纤区域上游的另一耦合器还可用于为检测器阵列提供参考信号。另外,图 8 中的镜阵列 603 可以用以透射(传输)工作的空间光束调制器来补充或取代。空间光束调制器,例如空间光调制器(SLM),可以例如插在前置放大器 602 和功率放大器 601 之间。所述空间光调制器在本技术领域是公知的,在此不再进一步讨论。所述空间调制器的使用大大简化了图 8 所示的组件。相位板(未示出)可以插入在多芯光纤放大器的输出处,用于使输出光束的斯特列尔比(Strehl ratio)最大化。

[0091] [090] 参考信号和多芯光纤 601 的输出的干涉还可用于向空间光调制器提供反馈,以产生对应于所有同相位纤芯的希望干涉图。所希望的干涉图可以通过遗传算法进行确定。为了获得向空间光调制器进行反馈的合适的代价函数,可以计算希望和实际干涉图之间的差值。为了更快的相位控制,可以实施数字全息技术。数字全息的原理披露于 Stappaerts 等人的美国专利 5,378,888 和 C. Bellanger 等人的'Coherent fiber combining by digital holography', Opt. Lett., vol. 33, no. 24, pp. 2937, Dec. 2008 中。为了实现用于相位控制的数字全息,一小测试光束需要反向通过多芯光纤阵列并在另一检测器阵列(未示出)上与参考光束干涉。这可以通过适当排列光束分离器、镜、和/或其它光学元件以便在空间上分割或引导光束来实现。主光束被设置成如前一样通过空间光调制器。通过将测试和参考光束之间的干涉图反馈回到空间光调制器,所述空间光调制器随后可被设置成在主光束通过时产生复共轭的干涉图。因此,多芯光纤阵列内的相位起伏可得到补偿。为了使相位补偿技术工作地最好,测试光束和主光束会具有相似的波长。优选的,测试光束具有小的光谱带宽并且具有的波长在主光束的光谱带宽中居中。数字全息技术与本文所讨论的任何光纤相位阵列结构相容。数字全息技术在本领域是公知的,并因此在此不再进一步讨论。由于在多芯光纤阵列中低频的相位起伏,数字全息技术在所述结构中对相位起伏进行补偿是非常有效的。

[0092] [091] 在第五实施例中,可以实施若干个其它的方案用于相位检测。

[0093] [092] 图 10 示出了一个优选实施例。利用相位板作衍射元件 801 以及中继透镜 802 和 803,脉冲种子“信号”光源 800 被映到多芯放大器光纤 806 的纤芯上。在光纤端面,利用中继透镜 804 和 805 将纤芯映在分节镜阵列上,使得从单芯发出的光通过单个镜部分(镜节)反射回相同的纤芯。每个镜部分(镜节)可以通过与光传播方向平行的驱动器平

移。法拉第 (Faraday) 旋转器是双程 (双通) 的, 以确保抵御放大器光纤纤芯中偏振旋转的环境稳定性。在第二次反向通过放大器纤芯之后, 光被偏振光束分离器 809 从发射光中分离。多芯放大器光纤 806 通过泵浦源 810 进行包层泵浦。

[0094] [093] 窄线宽连续波“稳定”激光器 811 的光通过各掺杂的纤芯被共同传播并用于相位检测。光源的波长被选定为具有通过光纤的高透射 (传输) 性。优选的, 选择连续波光源的波长不同于种子源 800 的信号波长并且在放大器纤芯的最大增益带宽之外。这确保了通过共同传播 cw (连续波) 光几乎没有或没有获得增益并且 cw (连续波) 光没有明显耗尽放大器增益。优选的, 选择的 cw (连续波) 光源的波长尽量接近信号波长, 以便不受到中继透镜 803, 804 和 805 的色差, 并且从而衍射元件 801 处的衍射角接近信号波长的衍射角。

[0095] [094] 连续波光的一部分绕过有源光纤并用作参考光束。该部分利用声光调制器 (AOM) 812 通过本地振荡器 813 的频率被移频并照射光检测器阵列的元件。与信号光共同传播的 cw (连续波) 光在光束分离器 814 处与信号光结合。透镜 816 连同透镜 803 一起用于将每个纤芯映在光电二极管阵列 817 的单个光电二极管上。如果连续波激光器的波长与种子激光器不同, 光带通滤光器例如干涉滤光器 (IF) 815 和光束分离器 814 上的涂层可用于阻止连续波激光器波长之外的光充满检测器。

[0096] [095] 在检测器阵列元件, 检测到共同传播的连续波光 and 信号光干涉及外差差拍信号的参考光。参考光束中可以插入光学波板、衍射元件和另外的透镜, 以使差拍信号最大化。有源光纤纤芯的光程长度的任何变化导致共同传播的连续波光的多普勒 (Doppler) 频移并因此导致差拍信号的频移。该差拍信号因此可用于将所有纤芯的光程长度稳定在恒定值。该方法通常用于结合 CW 激光器并披露于例如 S. J. Augst 等人的 Opt. Lett. 29, 474 (2004) 中。在这里所述的实施例中, 不过连续波激光器是用于各单独纤芯的光程长度稳定并且不同于放大的光。本实施例可用于种子源的所有重复频率。对于光程长度稳定, 外差信号可选的通过带通滤光器 818 进行过滤。相位检测器 (PD) 820 用于检测外差差拍信号和参考振荡器之间的相对相位。所述相位检测器为反馈稳定环路提供误差信号, 所述反馈稳定环路由控制镜驱动器的环路滤波器 821 闭合。光学前置分频器 (pre-scaler, PS) 819, 例如 16 分频电路, 可用于增大反馈环路的锁定范围。

[0097] [096] 反馈环路的动态由环路滤波器和驱动器元件的频率响应来确定。环路滤波器和驱动器的最快响应时间是在 $10\ \mu\text{s}$ 时间量程上, 这明显长于种子脉冲长度。因此, 连续波激光中的快速相位变化, 例如由于连续波激光与放大信号光的交叉相位调制而发生, 不干涉相位补偿反馈环路。

[0098] [097] 在相位检测的第二实施例中, 种子光本身可用作参考, 如图 10b 所示。因为本地振荡器的频率需要低于脉冲重复频率但要高到足以允许高效的外差检测, 本实施例优选用于脉冲重复频率高于 1MHz 的情况。对于低频, 基于 RF 混频器的相位检测器可由模拟至数字转换器 (ADC) 和数字信号处理器代替。在这里, 反馈环路的频率带宽优选地选定为小于脉冲重复频率的十分之一。

[0099] [098] 图 11 示出了在低重复频率下相位检测的另一实施例。这里, 高重复频率 ($> 10\text{MHz}$) 锁模振荡器 900 被用作种子源。声光调制器 902 用于调制种子激光器的光脉冲的强度。这通过对调制器 902 施加射频 (RF) 激励频率并设置光学系统传播所得到的一阶衍射光束来进行。零阶非衍射光束 (未示出) 被阻挡以便阻止能量通过光学系统传播。这些

技术经常用于声光调制器和偏转器系统的设计中,在此不再进一步讨论。利用 RF 参考振荡器 904 和具有用于幅度调制的输入的 RF 放大器 903 生成调制器的 RF(射频)驱动场。射频放大器现在以下述方式调制:大功率 RF 脉冲在显著低于锁模光学振荡器的重复频率下生成但是与每个 n 阶振荡器脉冲同步并在其它时间明显较低但不是零。以这种方式,光学脉冲串以下述方式进行调制:每个 n 阶脉冲具有高强度并且其它脉冲具有明显较低但是非零的强度。这使得对于外差差拍检测在振荡器重复频率下能够使用频移的衍射的脉冲串,其中振荡器光的部分由光束分离器 901 采样。两个强度以下述方式进行选择:存储的放大器能量主要由高强度种子脉冲耗尽并且在放大器输出处高和低强度脉冲之间的强度对比是明显的。为了防止相位检测电子器件被高强度光脉冲充满,可以提供限制电路或快速电子开关。在这里,反馈环路的频率带宽优选地选定为比脉冲重复频率高十倍。

[0100] [099] 在图 10c 所示的相位检测的第三实施例中,源自本地振荡器的小调制或抖动信号被施加至镜驱动器阵列的每个元件上。来自检测器阵列的信号是相敏检测的。在低通滤波后,相位误差与小调制信号结合并用作至驱动器阵列的反馈信号。低通滤波器的截止频率低于抖动频率。

[0101] [100] 在图 10d 所示的相位检测的第四实施例中,参考光束在波长上没有偏移并且种子的脉冲重复频率被用作本地振荡器。该方法利用种子激光器的频率梳结构并详细披露于 Yi-Fei Chen 等人的“Remote distribution of a mode-locked pulse train with sub 40-as jitter”中。不过,Chen 等人所述的研究成果只稳定没有增益的单光纤的光程长度。在图 10d 的实施例中,多个光纤被稳定至相等的光程长度并且存在光学增益。

[0102] [101] 在图 10e 所示的相位检测的第五实施例中,检测器阵列被干涉测量的互相关器的阵列取代。检测到干涉测量信号的干涉图并且实施基于软件的低带宽反馈稳定。在本实施例的一个改进中,来自于一个有源纤芯的信号被用作参考光束。

[0103] [102] 上述示例实施例的变形的许多组合是可行的。

[0104] [103] 作为对由干涉测量的互相关器生成的干涉图的替换,放大信号脉冲和参考光束之间的光谱干涉的干涉图也可用于反馈稳定。

[0105] [104] 在某些实施例中,作为对用于相位控制的外差检测技术的替代,还可以实施遗传自适应光学算法,以便使多芯光纤阵列的波前误差最小化。因为遗传算法通常比外差检测要慢得多,所述算法可适用于强热耦合多芯光纤。在某些实施例中,优化算法和专用硬件根据遗传算法能够为系统提供增大的控制带宽。遗传算法的使用消除了对相前和参考臂的干涉测量检测的需要。因此基于使用用于相位控制的遗传算法的多芯光纤放大器被构造成非常相似于图 6a 所示的设计,其中去除了参考臂。为了获得反馈至镜阵列的合适的代价函数,对输出光束的一部分使用了倍频级。倍频的功率随后可通过单个检测器进行测量并通过镜阵列的适当绝热调整进行优化。另外,可以实施检测器阵列,在若干个位置采样倍频光束;合适的代价函数随后使中心光束部分的功率最大化并使光束的周边部分的功率最小化。显然,基于遗传算法的具有自适应模态控制的侧向耦合多芯放大器是高度紧凑的并且不需要很多部件,这对于商用系统是理想的。

[0106] [105] 作为对多芯光纤的替代,更多传统的光纤相位阵列也可用于相干叠加。所述结构在本领域中是公知的,并且用于光学信号的系统实施例披露于美国专利申请序列号 11/546,998 中,在此不再进一步讨论。传统的光纤阵列可以对每个阵列元件使用单独的泵

浦二极管,这增大了相位起伏的噪声带宽。因此,对每个阵列元件使用声光相位调制器也是有益的。由于在这里相位噪声带宽为 10-100kHz,脉冲重复率必须在 100kHz-1MHz 的范围内,以便允许相位控制而不需要单独的连续波控制激光。对于较低重复频率信号,如上文结合图 10b 所述的脉冲调制器之间的泄漏可用于相位调制。

[0107] [106] 另外,对于脉冲重复频率低于 100kHz 的情况,连续波参考信号可用于顾及对相位控制的适当(足够)带宽,如结合图 10a 所已经解释的。所述连续波激光选择在高透射(传输)通过放大器光纤的波长(即,对于 Yb 放大器为 1300nm)下并且可耦合至每个阵列元件以便使每个阵列臂的相位相等。不过,连续波激光增大了系统的复杂性。

[0108] [107] 由于在不使用泄漏信号的情况下通过增大的带宽能够控制相位起伏,脉冲重复频率 > 1MHz 的相干叠加变得逐渐简单。

[0109] [108] 当在相干叠加中利用用于各光束路径的相位控制的调制器阵列,通过利用一个泵浦光束可以实现元件数量的减少。这种示例性实施例在图 12a 和 12b 中示出。图 12a 示出了当使用一个泵浦光束时用于光纤放大器的相干叠加的组件 1000。这里,多芯光纤 1001 由单独的光纤 1002,1003,1004 的阵列组成,在单独光纤的边界松散地熔合。所述松散熔合的光纤阵列的剖视图在图 12b 中示出。由于光纤是松散熔合的,它们可在信号注入端被分成单独的光纤,允许各信号光束 1005,1006,1007 耦合至每个光纤,如图 12a 所示。在泵浦耦合端 1008,光纤端可以进一步被熔合,以允许来自泵浦 1010 的泵浦光束 1009 经由光束分离器 1011 和透镜 1012 有效耦合至光纤阵列 1001。

[0110] [109] 输出光束的斯特列尔比 (Strehl ratio) 可同样通过使用如结合图 6a 和 6b 所讨论的连续孔径结构中的相位板被最大化。

[0111] [110] 上述实施例是基于主要是透射光学元件(例如透镜和透射相位板)示出的。本文所述的不同实施例涉及大功率激光系统的设计,包括高峰值和平均功率。在高于 100W 的功率电平,通过使用反射光学器件(例如以反射工作的镜和衍射元件)可以大大有益于热量管理。用镜替代透镜和用反射性衍射元件替代透射性衍射元件是直截了当(易懂)的,在此不再进一步讨论。

[0112] [111] 本文所述的脉冲的、相干结合的光纤激光源作为用于光学参数放大器以及用于大功率 EUV, X- 射线和等离子生成的泵浦源是理想的。对于 EUV 和 X- 射线生成,通常使用激光引发的等离子体,其中等离子体通过将相干组合的脉冲引导到固态或液态金属靶上而产生。相干组合的脉冲的光纤激光源的增大峰值功率与单芯光纤相比大大改进了 EUV 和 X- 射线生成的转换效率。在先进的平板印刷术应用和高分辨率成像领域大功率 EUV 和 X- 射线源是非常令人感兴趣的,并且大功率 EUV 和 X- 射线源通过实施本文所讨论的基于紧凑大功率相干组合光纤的源会受益很大。

[0113] [112] 美国专利申请序列号 11,091,015 中讨论了紧凑大功率参数放大器,在此不再进一步讨论。用多芯光纤放大器作为参数泵浦源的实施是非常有吸引力的,因为与用单芯光纤放大器进行泵浦相比它们增大了可从所述系统获得的脉冲能量。

[0114] [113] 根据第六实施例,图 13 示出了用相干组合光纤激光泵浦的参数放大器 1100 的示例。在这里为方便起见可以使用单种子振荡器 1101。种子振荡器是基于 Yb 的并且注入多芯光纤放大器 1102 以产生能量在 10-1000mJ 范围内的泵浦脉冲。种子振荡器通过如 '015 中所讨论的被动频率转换元件方便地进行频移,以便注入参数放大器晶体 1103。通过

在时域上重叠参数种子信号和多芯光纤放大器的输出,可以获得参数放大器晶体中的有效放大。通过啁啾脉冲放大方案的实施,可以进一步使多芯光纤放大器中的B积分最小化。为了实施啁啾脉冲放大,在种子振荡器之后并在信号注入多芯(或多元件)光纤放大器之前可以提供脉冲展宽级。在多芯(或多元件)光纤放大器的各细光束相干组合后,提供脉冲压缩级。所述脉冲压缩级例如合宜地基于大量衍射光栅。在脉冲压缩后,泵浦脉冲进一步被引导向参数放大器,在这里它们被用于放大种子信号。通过多芯(或多元件)光纤放大器,可以生成产生的脉冲能量超过 10mJ 的高平均功率参数放大器。

[0115] [114] 因此,发明人描述了具有至少一个光纤放大器阵列的高峰值功率光纤放大器系统,并且尤其适于激光脉冲的相干组合。所述放大器系统可应用于高峰值功率、短脉冲应用。例如,可以产生至少 1MW 量级的峰值功率。所述系统可用于 EUV 或 x- 射线生成,光学制版,激光雷达或类似的应用。

[0116] [115] 至少一个实施例包括高峰值功率光纤放大器系统。所述系统包括光纤放大器的阵列。所述放大器阵列设置如下:放大器的热起伏充分匹配并限制放大器输出处相对相位起伏在低带宽,例如小于约 10KHz。放大器设置在足够的相对距离,使得任何放大器之间的能量耦合可以忽略。所述系统包括用于注入放大器阵列的装置,包括激光源。种子脉冲和/或放大的脉冲包括飞秒-约 1 微秒范围内的脉冲宽度。光束分配器设置在激光源和阵列之间以分配来自所述源的脉冲,或分配来自用于注入的装置的脉冲。脉冲被分配成入射到相应的阵列放大器上的多个光束路径。光束的空间分配基本上类似于脉冲的空间分配。包括至少一个泵浦源,用于光学泵浦光纤放大器阵列。按空间关系排列的多个相位控制元件光学连接至阵列的光纤放大器。相位控制元件改变至少一个光纤放大器输出的光学相位来响应相位控制信号。所述系统还包括用于产生施加至相位控制元件的多个相位控制信号的装置,以便在大多数光纤放大器的输出处控制光学相位。所述控制信号和相位控制元件被设置成稳定阵列的大多数的各光纤放大器之间的光学相位。

[0117] [116] 至少一个实施例包括高峰值功率光纤放大器系统,所述系统包括光纤放大器的阵列。所述阵列被设置成放大器的纤芯的空间间隔足够小到提供强热耦合,将阵列的输出相位起伏限制在低带宽,例如小于约 10KHz。光纤放大器之间的足够大的空间间隔还限制了阵列的放大器之间的光能耦合,例如限制到约 0.1%或更小。多个相位控制元件按空间关系设置并且光学连接至阵列的光纤放大器。相位控制元件改变至少一个光纤放大器输出的光学相位来响应相位控制信号。所述系统还包括产生相位控制信号的相位控制器,并且可操作以稳定阵列的放大器输出处的光学相位。

[0118] [117] 至少一个实施例包括用于激光脉冲的相干组合的放大器系统。所述实施例包括光纤放大器的阵列,例如多个单独光纤放大器,并且至少一个泵浦源被设置成光学泵浦光纤放大器阵列。脉冲的主振荡器向光纤放大器阵列注入种子。按空间关系设置的多个相位控制元件被光学连接至阵列的光纤放大器。相位控制元件改变至少一个光纤放大器输出的光学相位来响应相位控制信号。用于产生施加至相位控制元件的多个控制信号的装置控制大多数光纤放大器的输出处的光学相位。所述控制信号和相位控制元件稳定大多数的各单独光纤放大器之间的光学相位。

[0119] [118] 至少一个实施例包括用于激光脉冲(例如亚纳秒脉冲)的相干组合的放大器系统。所述实施例包括光纤放大器的阵列,例如多个单独光纤放大器,并且至少一个泵浦

源被设置成光学泵浦光纤放大器阵列。脉冲的主振荡器向光纤放大器阵列注入种子。主振荡器的输出的一部分被用于参考臂,并被设置成与光纤阵列的输出的一部分光学干涉。光学干涉用检测器阵列进行检测。参考臂被进一步相位调制以允许用检测器阵列进行光纤阵列的大多数元件的光学相位的外差相位检测。按空间关系设置的多个相位控制元件被光学连接至阵列的光纤放大器。相位控制元件改变至少一个光纤放大器输出的光学相位来响应相位控制信号。外差相位检测器和相位控制元件稳定光纤阵列的大多数单独元件之间的光学输出相位。

[0120] [119] 至少一个实施例包括用于激光脉冲(例如亚纳秒脉冲)的相干组合的放大器系统。所述实施例包括光纤放大器的阵列,例如多个单独光纤放大器,和至少一个泵浦源,所述泵浦源被设置成光学泵浦光纤放大器阵列。脉冲的主振荡器向光纤放大器阵列注入种子。主振荡器的一部分输出可用于参考臂,并被设置成与光纤阵列的一部分输出光学干涉。用检测器阵列检测光学干涉。光纤放大器阵列的元件的光学相位在源自本地振荡器的频率下抖动,允许用检测器阵列进行光纤阵列的大多数元件的光学相位的外差相位检测。外差相位检测器被设置成稳定光纤阵列的大多数单独元件之间的光学输出相位。

[0121] [120] 在不同的实施例中:

[0122] [121]- 放大器可被设置成使得放大器的增益介质的折射率的热起伏充分匹配以便放大器输出处的相对相位起伏限制在低带宽,例如小于约 10KHz。

[0123] [122]- 控制信号和相位调制器可被设置成使光纤阵列的输出的斯特列尔比 (Strehl ratio) 最大化。

[0124] [123]- 脉冲重复频率可大于约 100KHz。

[0125] [124]- 控制信号的频率可以在小于约 1/10 的脉冲重复频率。

[0126] [125]- 脉冲重复频率可以小于约 100kHz。控制信号可以由泄漏信号(例如阵列的各光纤中的脉冲之间)产生。

[0127] [126]- 放大器阵列可包括多芯光纤放大器。

[0128] [127]- 放大器阵列可包括多个多芯光纤放大器。

[0129] [128]- 多芯光纤放大器可包括由阶跃折射率光纤,泄漏通道光纤,光子晶体光纤或布拉格 (Bragg) 光纤构成的各单独元件。

[0130] [129]- 各单独的光纤放大器可以是保偏的。

[0131] [130]- 相位板可被插入在主振荡器和光纤放大器阵列之间,以便使主振荡器至光纤放大器阵列的每个放大器的耦合效率最大化。

[0132] [131]- 可以包括插入在放大器阵列输出下游的相位板,以便使光纤输出的斯特列尔 (Strehl) 比最大化。

[0133] [132]- 系统可以包括用于侧面泵浦放大器阵列的装置。

[0134] [133]- 放大器可被构造成双程(双通)结构,并且可包括插入在第一程之后的法拉第 (Faraday) 旋转器。

[0135] [134]- 放大器可被构造成单程(单通)结构。

[0136] [135]- 相位控制元件可形成为元件的集成阵列,例如 MEMs 或 SLM。

[0137] [136]- 相位控制元件可包括镜阵列的部分。

[0138] [137]- 相位控制元件可包括 MEMs 阵列的部分。

- [0139] [138]– 相位控制元件可包括液晶空间光束调制器的部分。
- [0140] [139]– 可以包括相位前置放大器阵列,并且与放大器阵列在光学尺寸上匹配。
- [0141] [140]– 前置放大器阵列可在其输入端成锥形,以便简化主振荡器至前置放大器阵列的耦合。
- [0142] [141]– 光纤放大器阵列可在其输入处空间分隔成各单独元件并在其输出端光学接触,以便简化主振荡器耦合至放大器阵列。
- [0143] [142]– 可以用单个泵浦源在放大器阵列的光学接触端注入来光学泵浦光纤放大器阵列。
- [0144] [143]– 系统可包括信号参考臂,并且所述参考臂被设置成干涉光纤阵列的输出光束的一部分,以便于检测每个单独光纤放大器输出的光学相位。
- [0145] [144]– 固定的抖动频率可用于控制多个相位控制元件,例如相位调制器。
- [0146] [145]– 不同的抖动频率可用于控制多个相位控制元件。
- [0147] [146]– 参考臂的相位可以在固定频率下进行调制。
- [0148] [147]– 系统可包括一个或多个检测器,例如检测器阵列。
- [0149] [148]– 系统可包括耦合并透射过阵列的每个单独光纤放大器的连续波激光,并被设置成用于外差相位检测和稳定阵列的每个光纤放大器的光学相位。
- [0150] [149]– 控制信号可源自遗传算法,所述遗传算法被设计成使光纤阵列的输出的斯特列尔 (Strehl) 比最大化。
- [0151] [150]– 光纤放大器阵列可用于 EUV 或 X- 射线生成。
- [0152] [151]– 光纤放大器阵列可用作光学制版中的光源。
- [0153] [152]– 光纤放大器阵列可用作参数放大的泵浦源。
- [0154] [153]– 激光源可包括锁模振荡器。
- [0155] [154]– 系统可包括在主振荡器之后的脉冲展宽级,而脉冲压缩级插入在光纤放大器阵列的下游。
- [0156] [155]– 外差相位检测器和多个相位控制元件可被设置用于使光纤阵列的输出的斯特列尔 (Strehl) 比最大化。
- [0157] [156]– 参考臂可源自光纤阵列的单独元件。
- [0158] [157]– 调制器阵列可被设置用于在不同频率下调制各放大器的光学相位。
- [0159] [158]– 外差相位检测器可被设置成使光纤阵列的输出的斯特列尔比最大化。
- [0160] [159]– 一个或多个脉冲的空间分配可以是近衍射极限的。
- [0161] [160]– 光纤阵列元件之间的光能耦合可以小于约 1%。
- [0162] [161]– 阵列元件的相对起伏可以限制在小于约 1KHz。
- [0163] [162]– 用于产生多个控制信号的装置可包括检测器阵列和用于处理从检测器获得的相位信息的自适应算法。
- [0164] [163]– 自适应算法可包括遗传算法。
- [0165] [164]– 用于注入(种子)的装置可包括锁模光纤振荡器。
- [0166] [165]– 用于注入(种子)的装置可包括用于增大从锁模激光器或其它源发射的脉冲的脉宽的脉冲展宽器。
- [0167] [166]– 激光源可包括半导体激光二极管,并且可产生在皮秒 – 约 1 微秒范围内的

脉宽。

[0168] [167]– 光纤阵列可包括多芯光纤。

[0169] [168]– 多芯光纤可包括泄漏通道光纤。

[0170] [169]– 泄漏通道光纤可以是保偏的。

[0171] [170]– 控制信号可适用比脉冲重复频率高大致十倍的频率。

[0172] [171]– 系统可包括信号参考臂和用于相位补偿的装置,被设置成干涉反向通过光纤阵列的光束的一部分,并允许通过用于相位补偿的装置对正向通过所述光纤阵列的光束进行每个单独阵列元件的光学相位的补偿。

[0173] [172]– 用于相位补偿的装置包括空间光束调制器,例如商用的空间光调制器(SLM)。

[0174] [173]– 光纤阵列元件之间的能量耦合可以小于约 .1%。

[0175] [174]– 相位控制元件可被设置成调制所述放大器的相位。

[0176] [175]– 相位控制元件可包括相位调制器。

[0177] [176]– 放大器系统可包括多芯泄漏通道光纤(LCF)。

[0178] [177]– 放大器的阵列可绕共同的中心设置并且从所述中心大致是等距的。

[0179] [178]– 相位控制器的控制带宽可小于约 10KHz。

[0180] [179]– 放大器系统可包括多芯光纤。放大器的阵列可设置在所述多芯光纤的近周边的单个环上。

[0181] [180]– 相位控制元件可形成集成相位调制器的一部分。

[0182] [181]– 紧凑系统结构作为光纤输出的低带宽相位起伏的一个结果可获得。例如,相位控制元件可包括 MEMs, SLMs, 微镜阵列, 或其它集成器件和 / 或组件。

[0183] [182]– 脉宽大于约 10fs 的近衍射极限的输出作为相位补偿的一个结果,并作为阵列的光纤放大器之间有限模耦合的一个结果可获得。

[0184] [183]– 输出脉宽可以在约 100fs–1ns, 100fs–10ps, 1ps–1ns, 或约 100ps–50ns 的范围内。

[0185] [184] 上述优选实施例的描述通过示例的方式给出。通过给出的公开内容,本领域的技术人员不仅能够理解本发明及其所伴随的优势,而且还能够发现对所披露结构和方法的明显的不同改变和改动。因此,寻求使所有这些改变和改动落入由所附权利要求书及其等同所限定的本发明的精神和范围内。

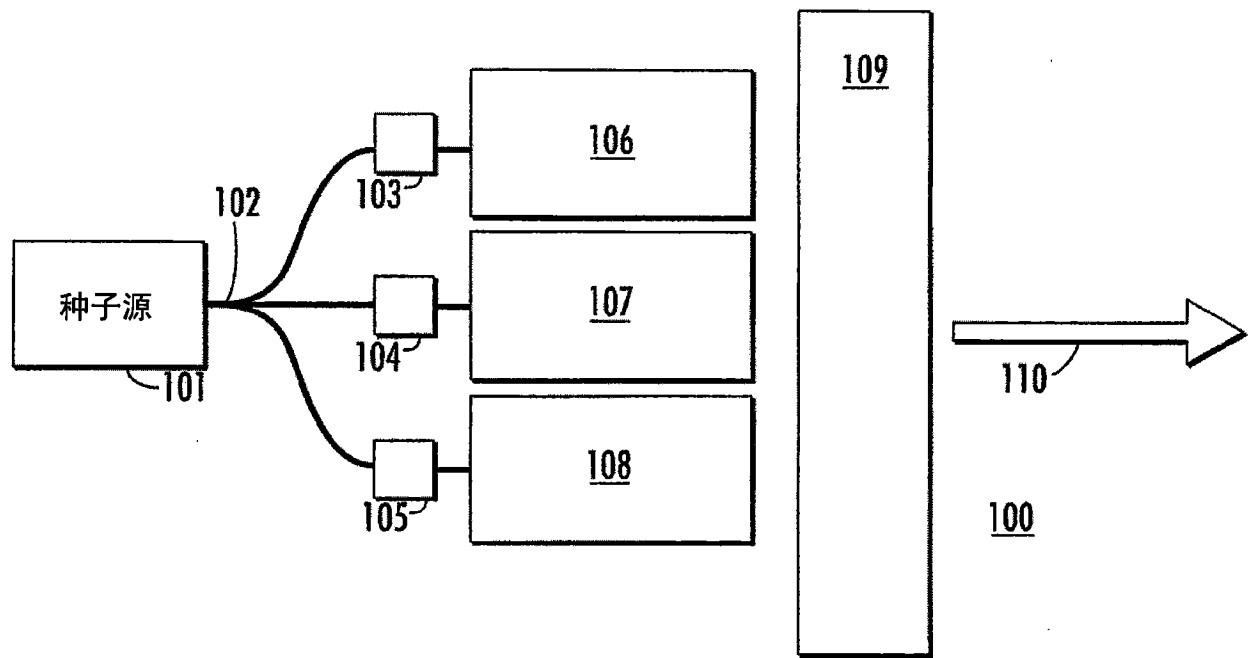


图 1

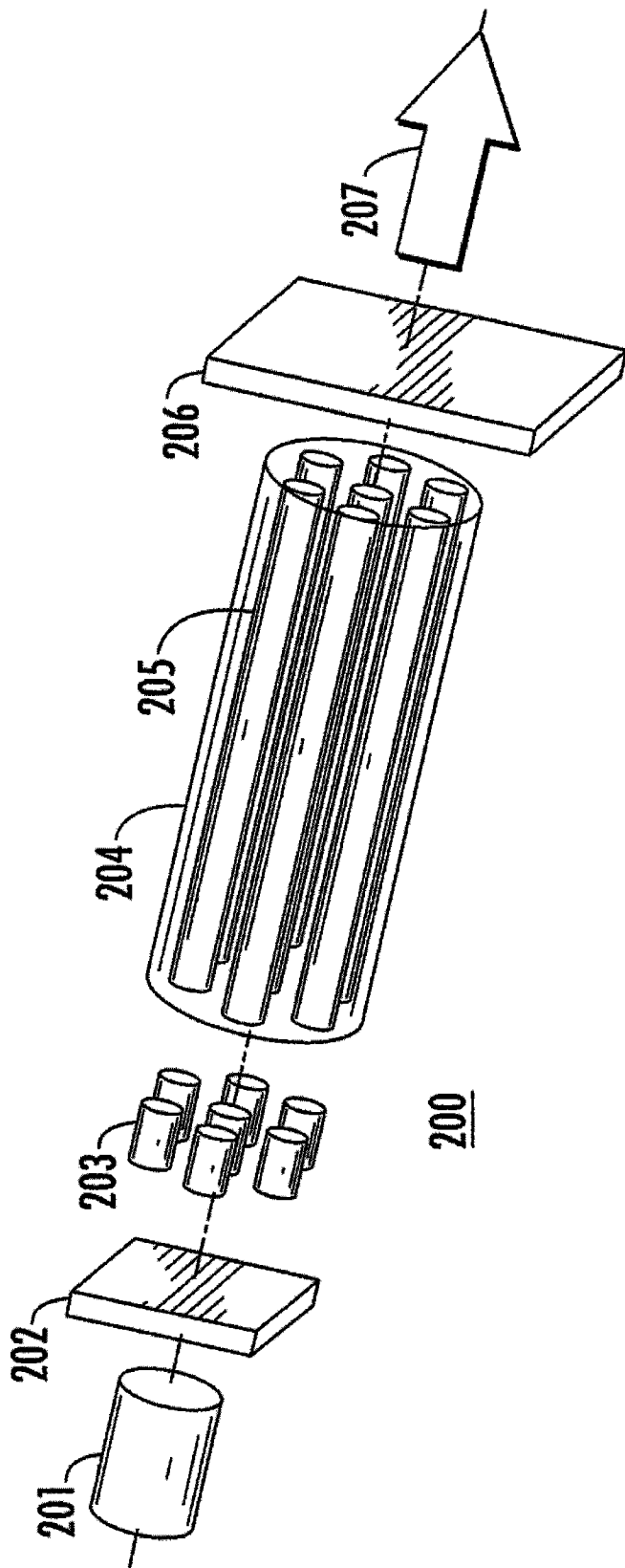


图 2

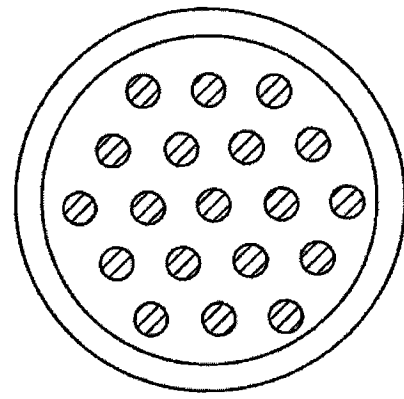


图 3A

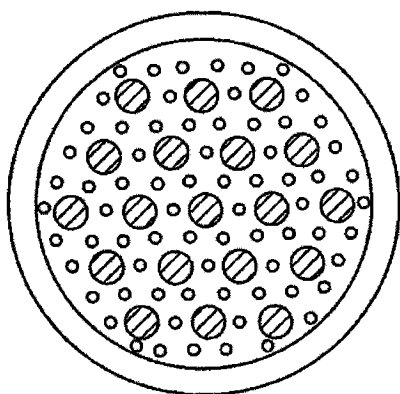


图 3B

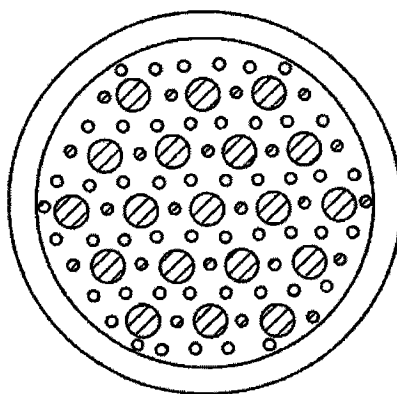


图 3C

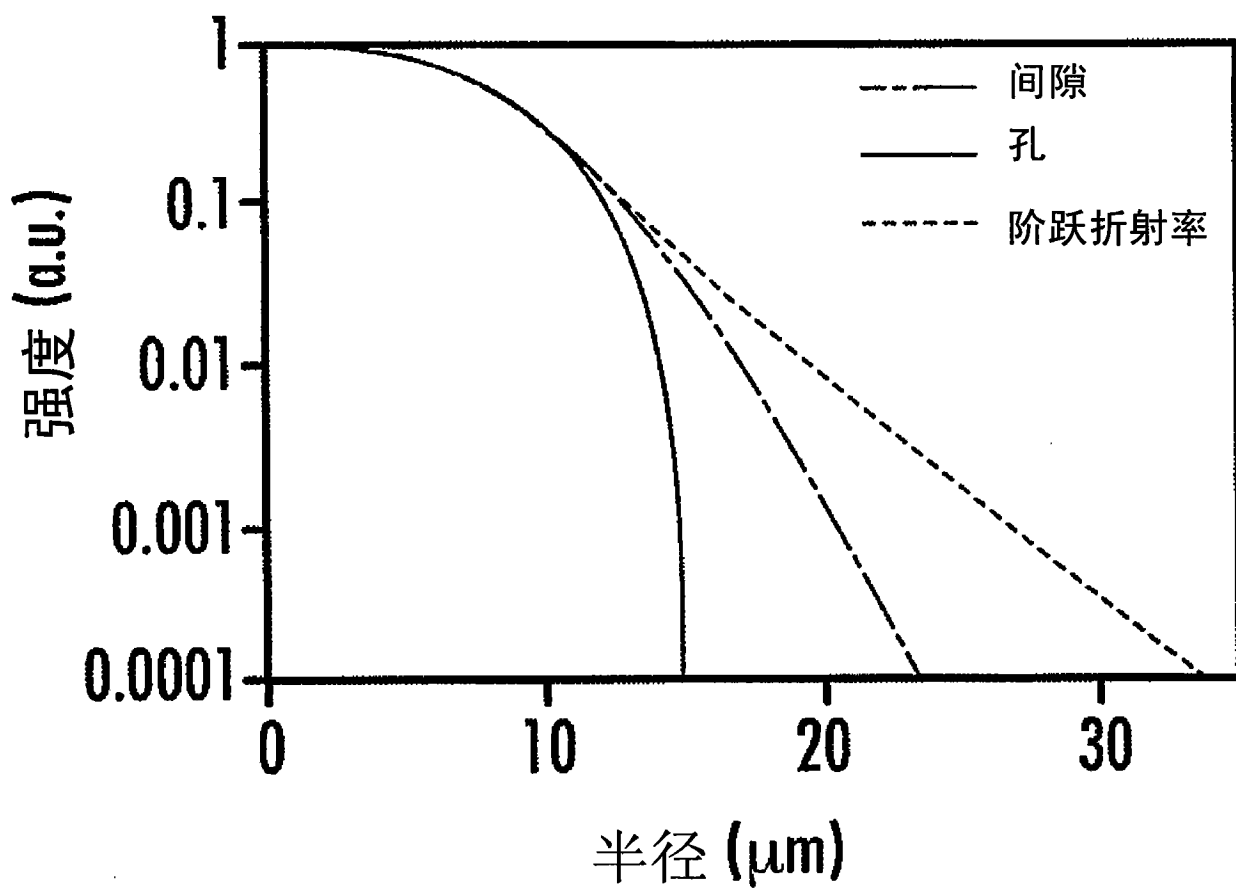


图 4

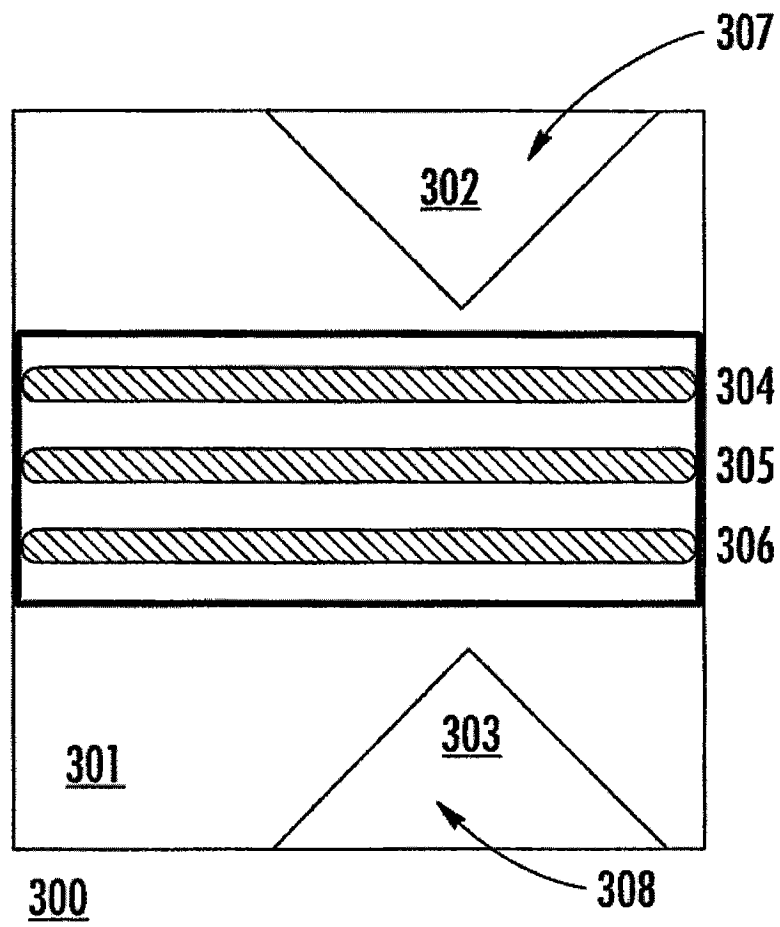


图 5

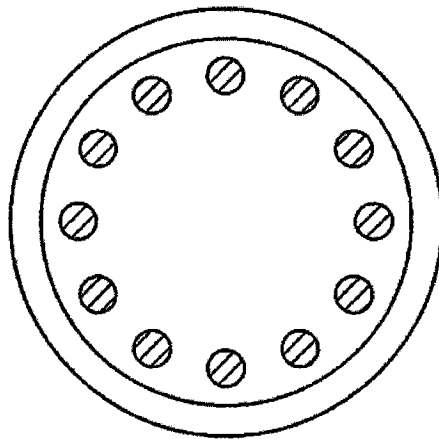


图 5A

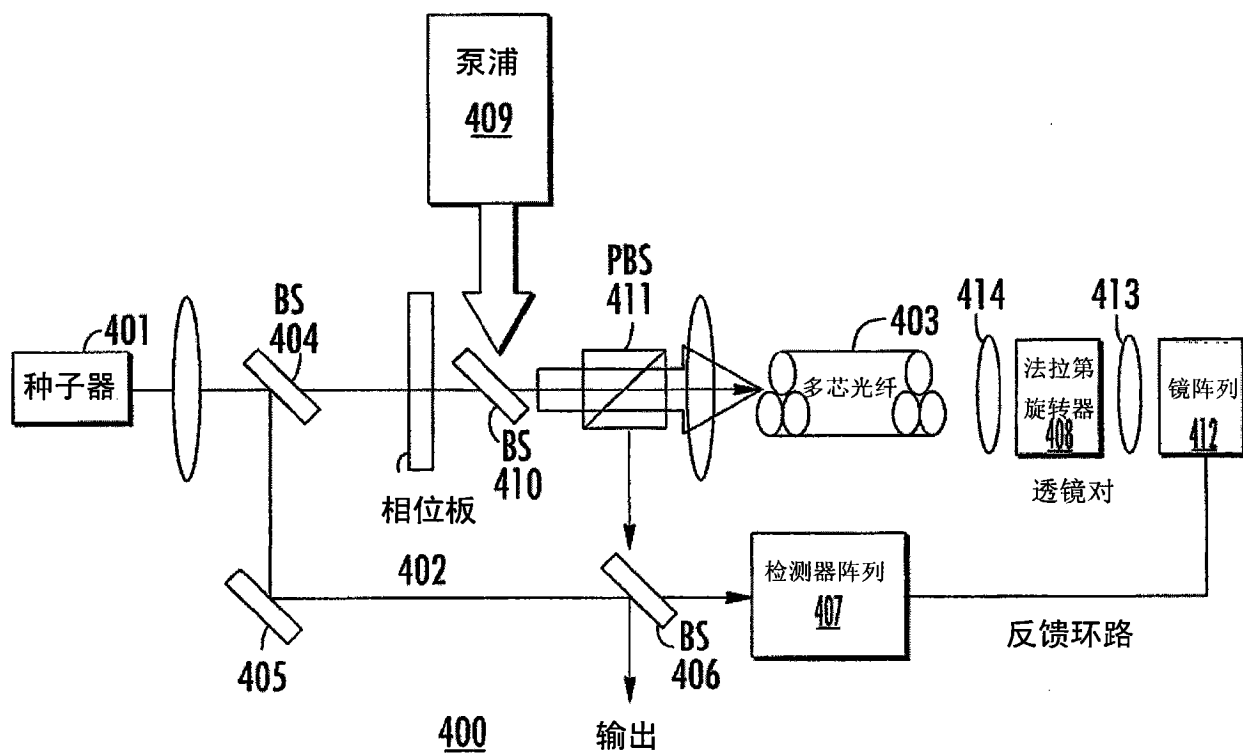


图 6A

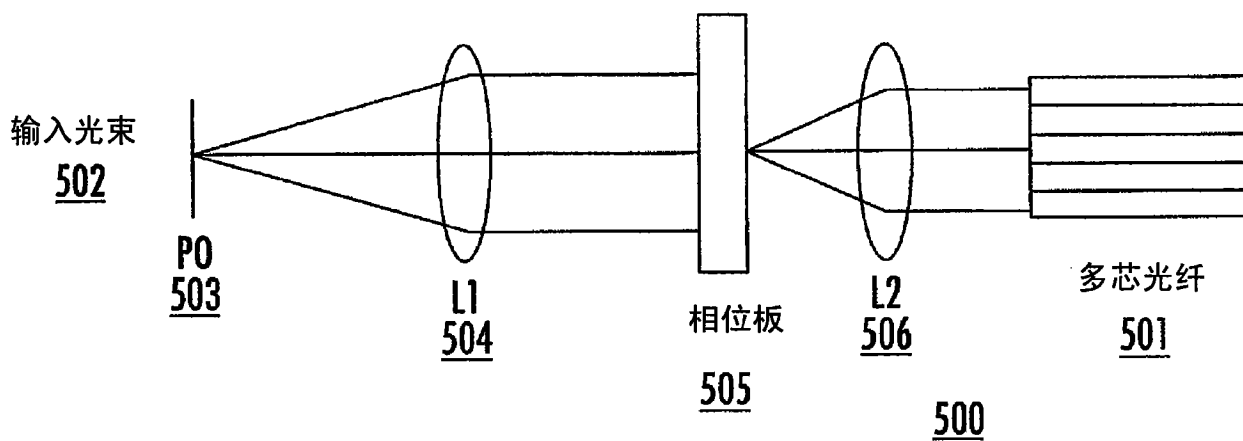


图 6B

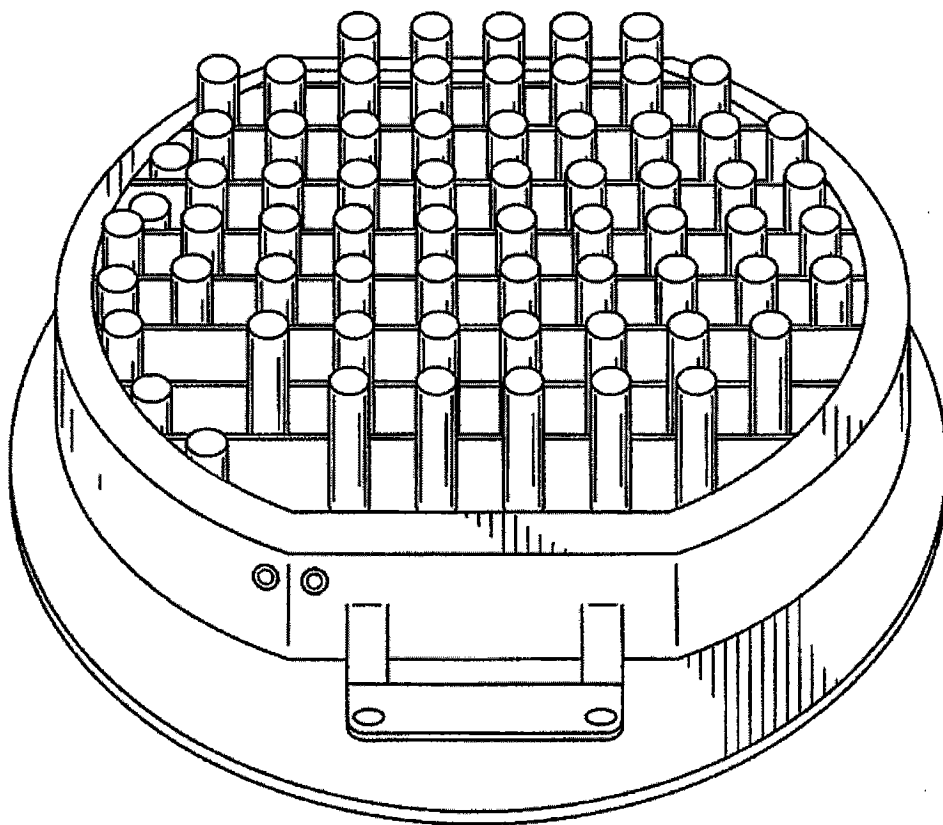


图 7

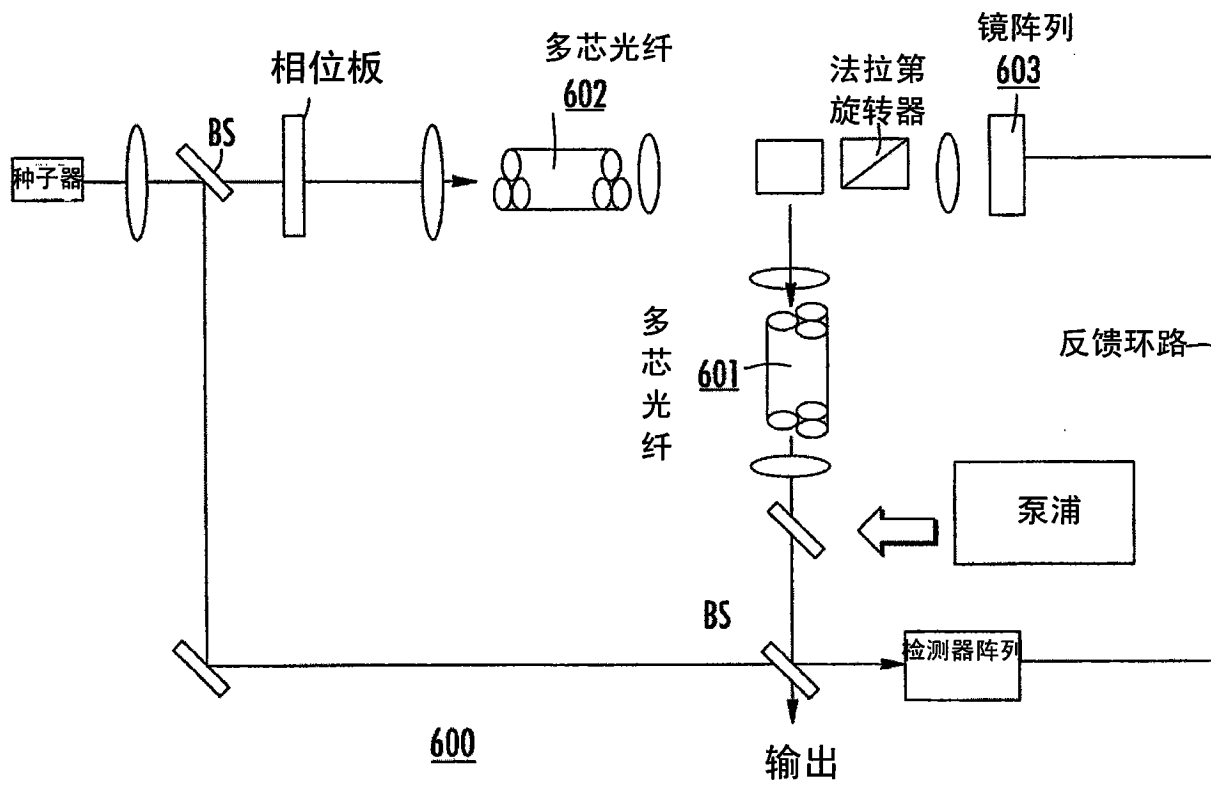


图 8

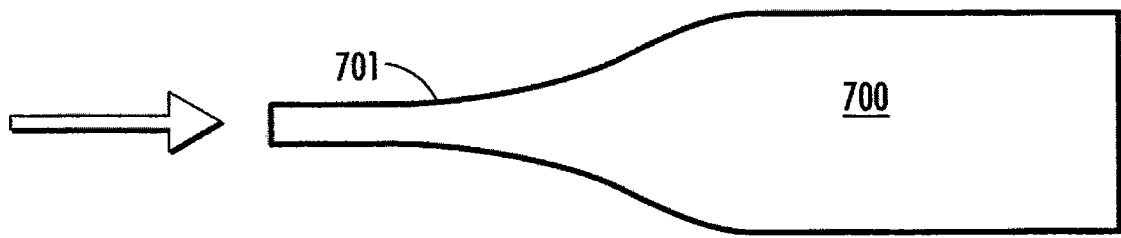


图 9

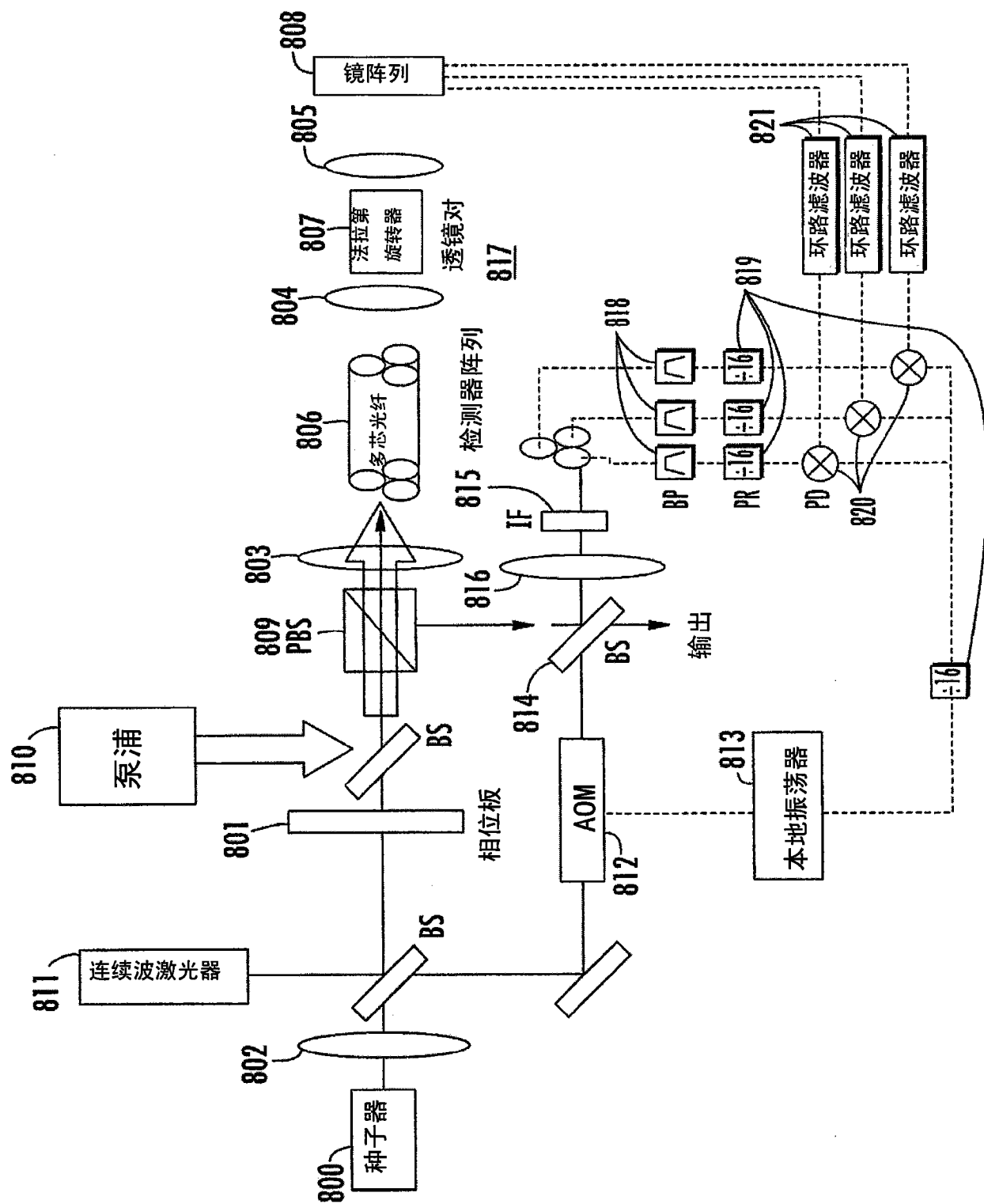


图 10A

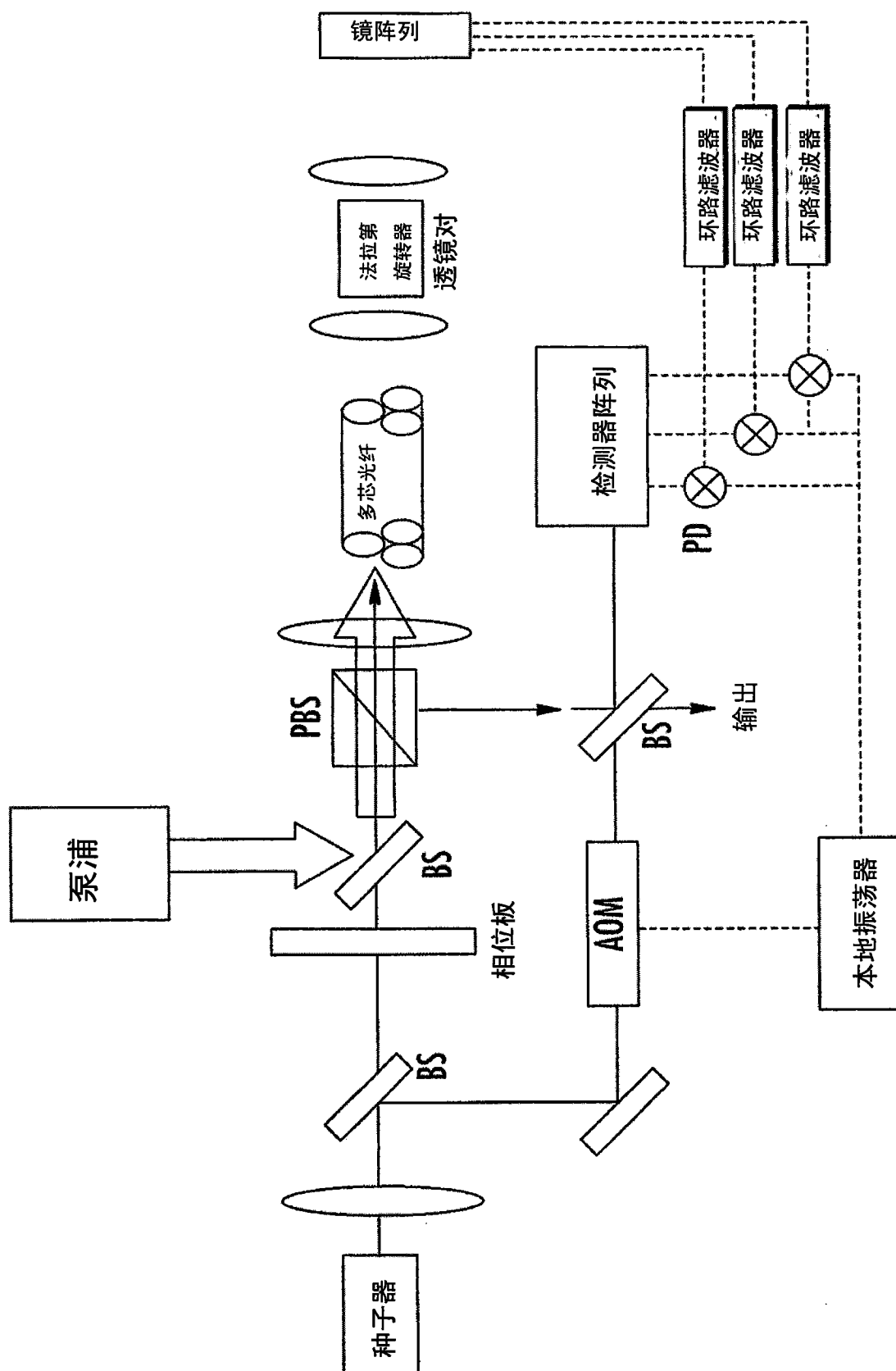


图 10B

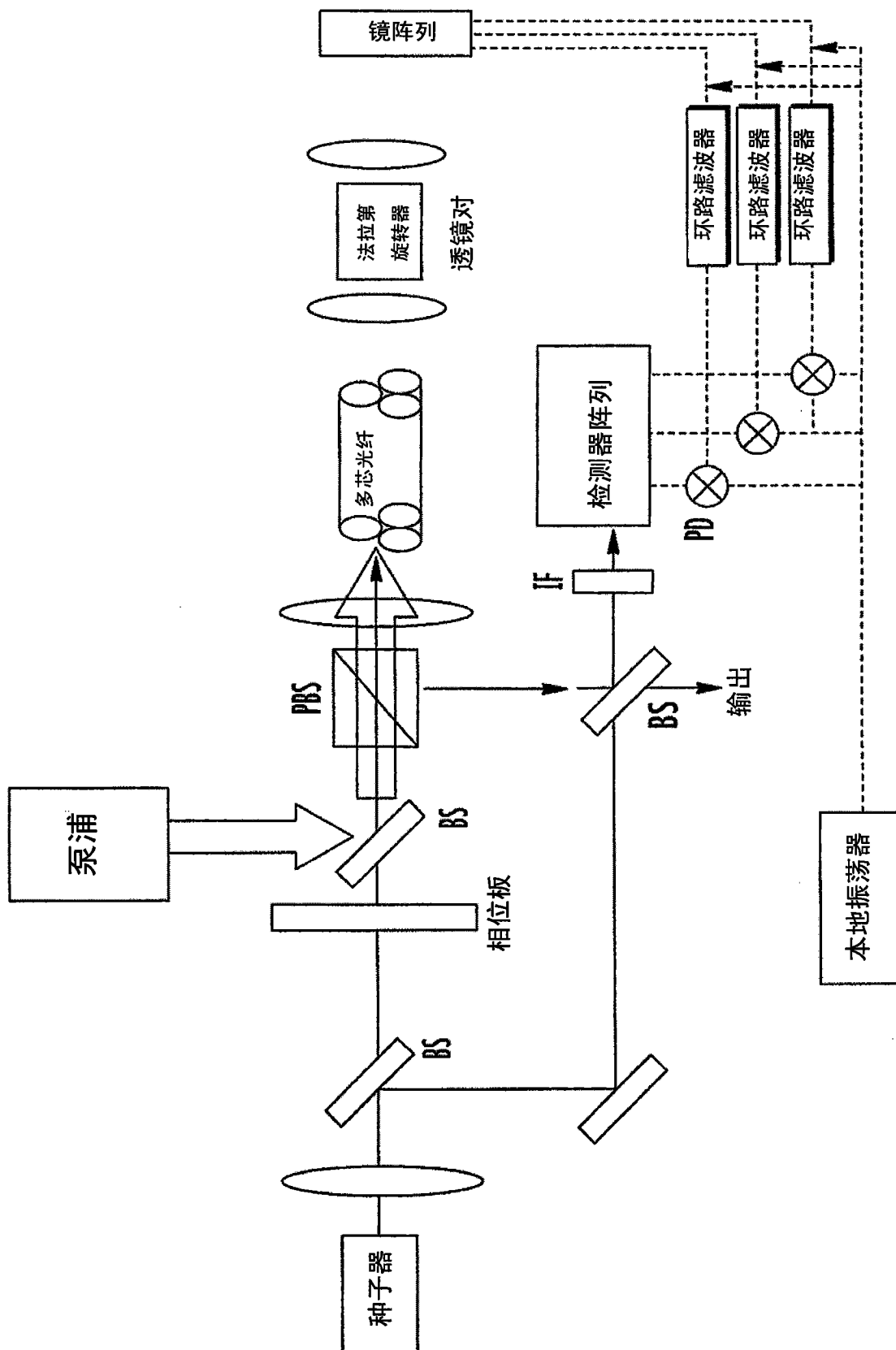


图 10C

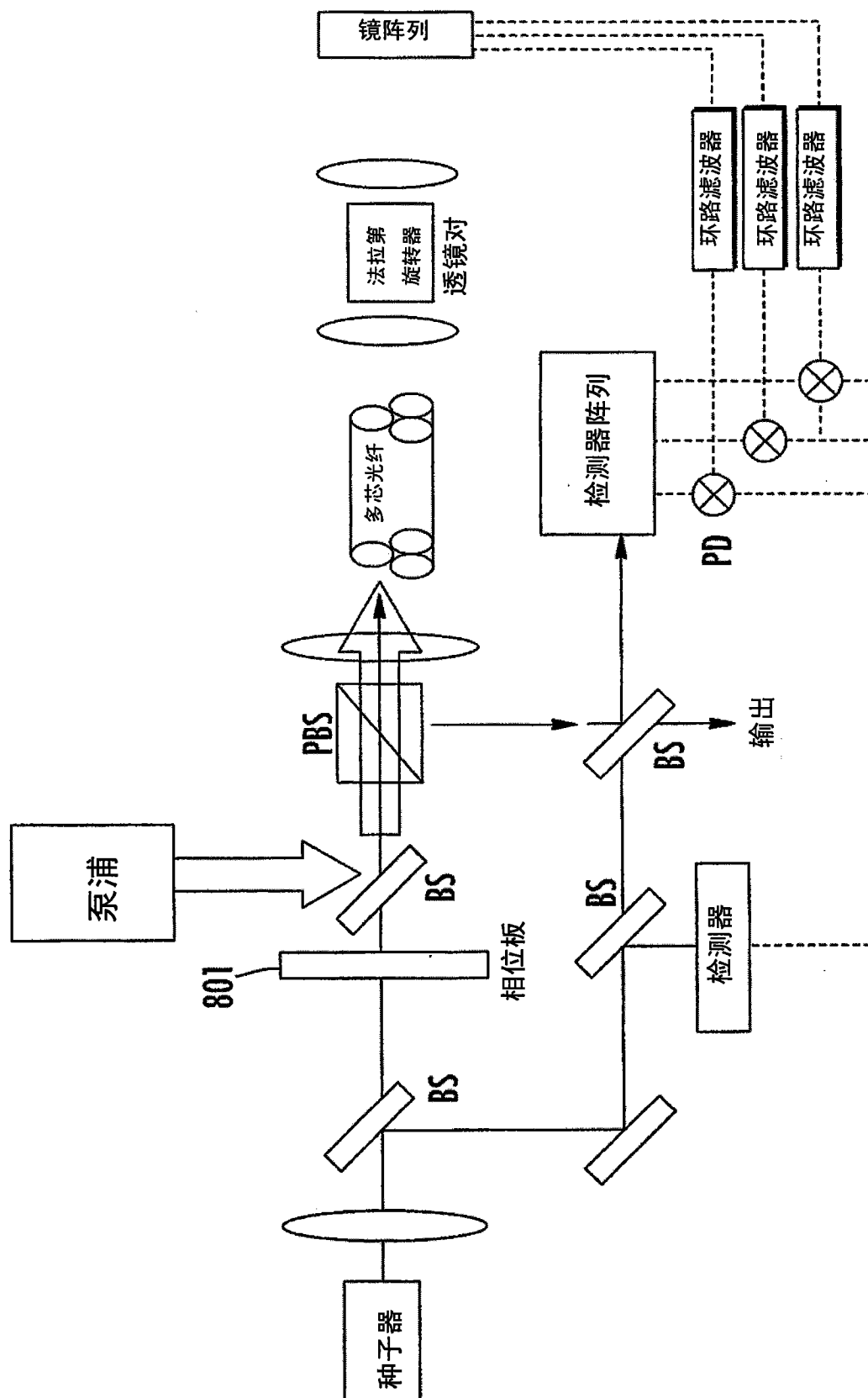


图 10D

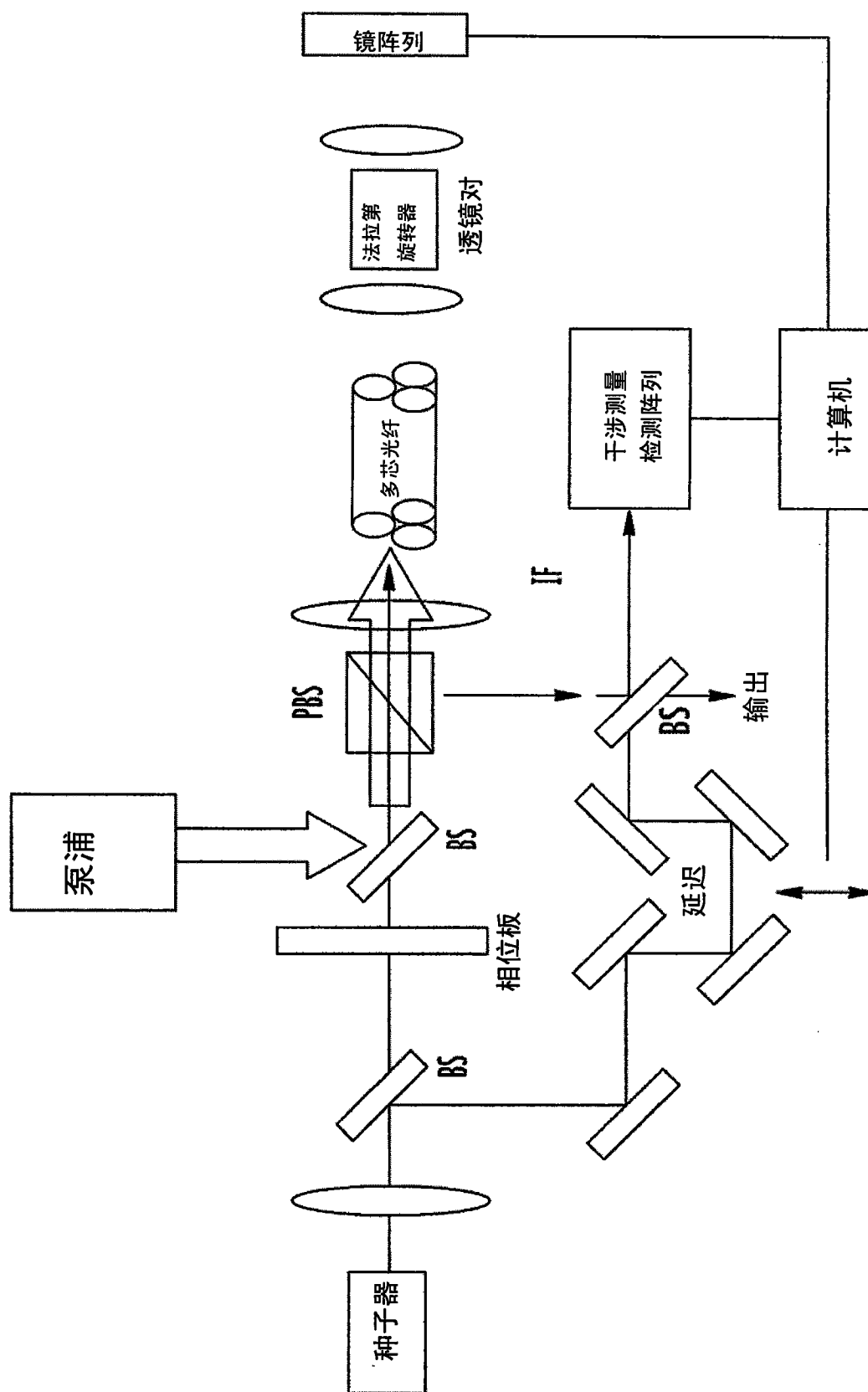


图 10E

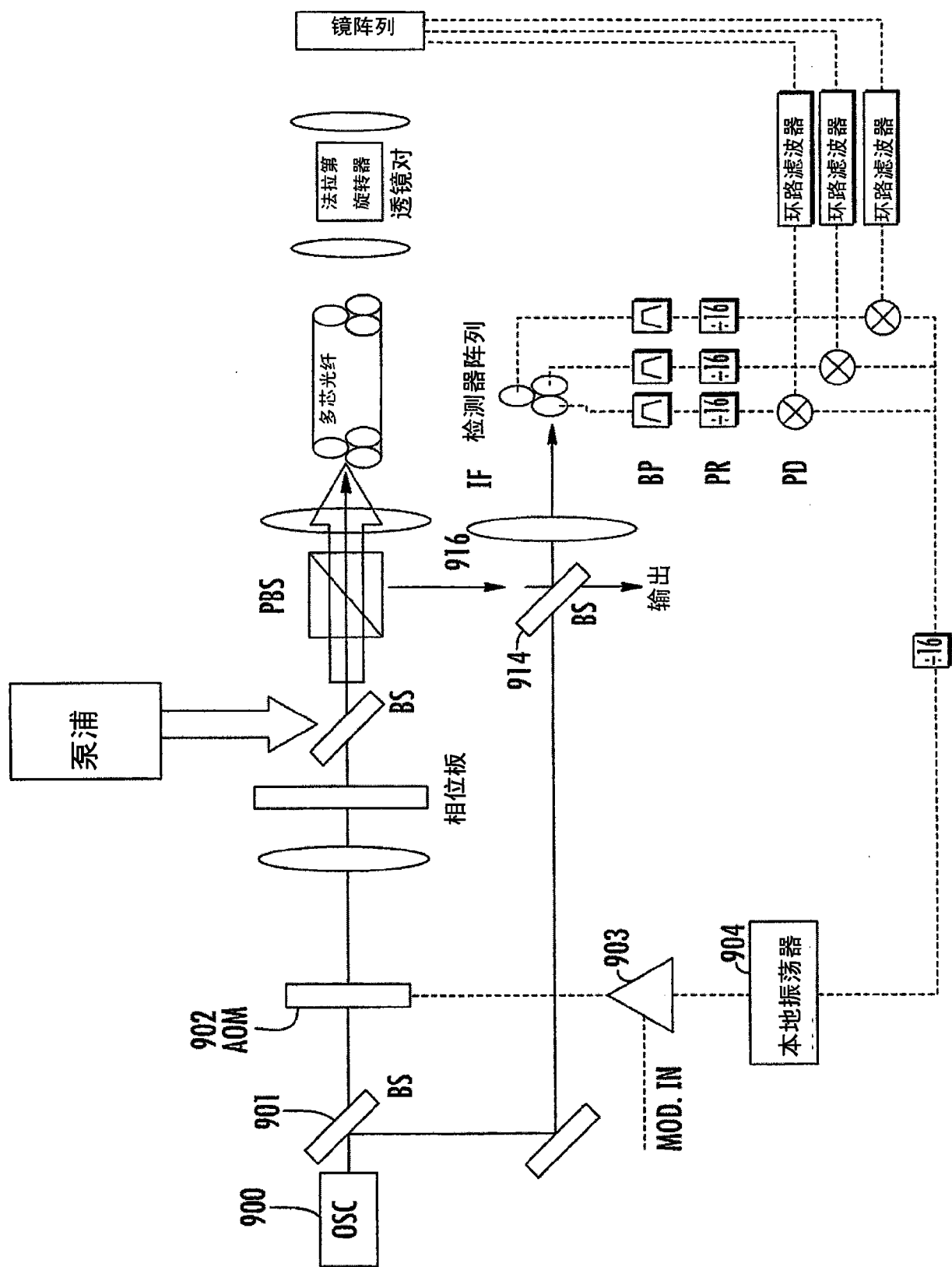


图 11

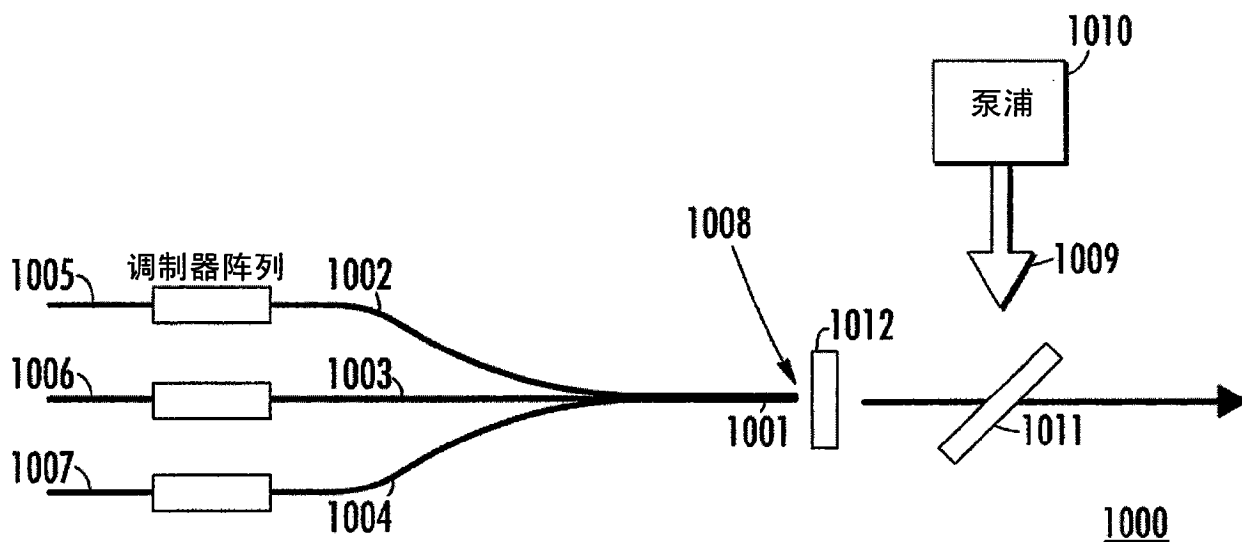


图 12A

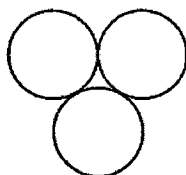


图 12B

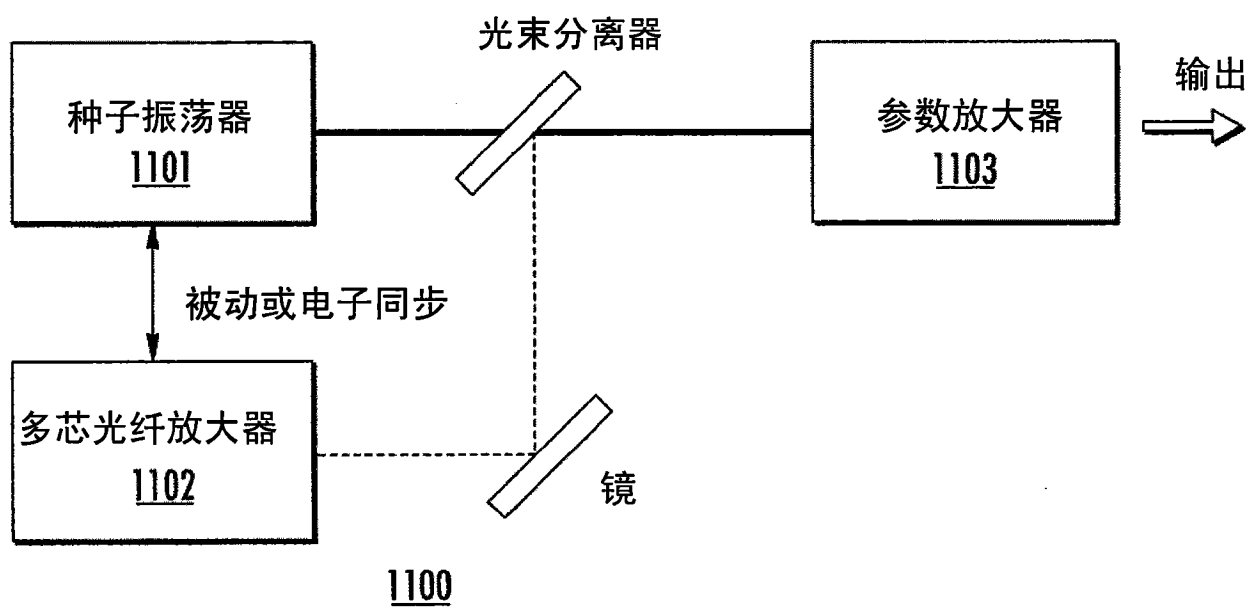


图 13