



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104022433 A

(43) 申请公布日 2014. 09. 03

(21) 申请号 201410065772. 3

(22) 申请日 2014. 02. 26

(30) 优先权数据

13/783, 172 2013. 03. 01 US

(71) 申请人 普林斯顿光电子学公司

地址 美国新泽西

(72) 发明人 J-F·塞伦 王清 L·瓦金斯

C·L·戈施

(74) 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专

利商标事务所 11038

代理人 冯玉清

(51) Int. Cl.

H01S 3/094 (2006. 01)

H01S 3/067 (2006. 01)

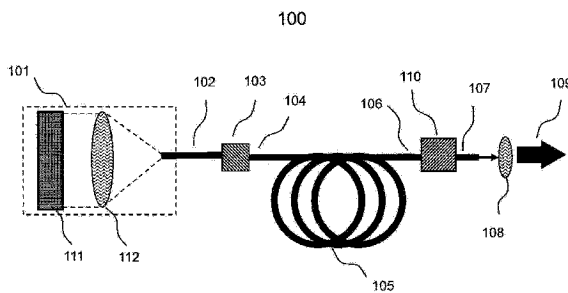
权利要求书5页 说明书19页 附图16页

(54) 发明名称

垂直腔面发射激光器泵浦的光纤增益系统

(57) 摘要

本公开涉及垂直腔面发射激光器泵浦的光纤增益系统。包括 VCSEL 和 VCSEL 阵列器件的光学泵模块提供高光功率用于配置诸如光纤激光器和放大器之类的光纤增益系统。泵模块可使用两或三反射器 VCSEL 器件来构建, 可选地集成有微透镜阵列和其他光学组件以将泵光束耦合到光纤输出端口。具有光纤输出端口的泵模块适于将光耦合到双包层光纤的内包层。泵模块能以 CW、QCW 和脉冲模式操作, 以配置使用单端、双端和再生光学泵浦模式的光纤激光器和放大器。可组合多个泵从而以模块方式提高泵功率, 而不会对信号尤其是短脉冲操作造成显著失真。



1. 一种光纤泵模块,包括:

光学发射器,包括一个或多个 VCSEL 器件,所述光学发射器被支承在散热安装台上,一个或多个光学组件,所述光学组件设置在跟随在所述发射器后面的预定距离处以准直从所述一个或多个 VCSEL 器件发射的相应光束,使得组合光束具有基本均匀的强度;以及

光纤,固定在光纤对准壳体中,使得固定在所述对准壳体中的所述光纤的输入端与所述组合光束共轴对准,所述光纤的所述输入端位于跟随在所述一个或多个光学组件后面的预定距离处,使得所述组合光束的具有最大强度的输出泵光束产生在所述光纤的输出端处。

2. 如权利要求 1 所述的光纤泵模块,其中,所述一个或多个 VCSEL 器件包括两反射器 VCSEL 器件或三反射器 VCSEL 器件。

3. 如权利要求 1 所述的光纤泵模块,其中,所述一个或多个 VCSEL 器件以配置成集体发射的线性或二维平面阵列布置。

4. 如权利要求 1 所述的光纤泵模块,其中,所述一个或多个光学组件包括一个或多个微透镜,其与所述一个或多个 VCSEL 器件中对应的一个基本对准,并且其中所述一个或多个微透镜设置在预定距离处,使得集体发射是基本具有均匀强度的准直输出光束。

5. 如权利要求 1 所述的光纤泵模块,还包括设置在所述一个或多个光学组件与所述光纤的输入端之间的光学耦合器件,使得所述组合光束的最大强度被基本聚焦在所述光纤的输入端上以用于有效耦合。

6. 如权利要求 5 所述的光纤泵模块,还包括:

外部壳体,所述壳体具有与所述光学发射器热接触的导热基板,其中所述光学发射器、所述一个或多个光学组件、所述光学耦合器件以及所述光纤对准壳体共轴地固定在所述基板上;以及

外部隆起罩,所述罩封围所述基板上的所述光纤泵模块,其中所述罩还包括在一端的光纤对准引导件和弯曲半径限制器以支承和固定离开所述外部壳体的所述光纤,其中所述外部壳体适用于与所述基板热接触地安置的使用循环流体的外部冷却器件,所述循环流体是选自包括气体、液体和它们的组合的组的一种。

7. 如权利要求 1 所述的光纤泵模块,其中,所述光纤是单包层光纤,其中来自所述发射器的所述组合光束被耦合到所述光纤的芯部。

8. 如权利要求 1 所述的光纤泵模块,其中,所述光纤是双包层光纤,其中来自所述发射器的所述组合光束被耦合到芯、内包层、或它们的组合。

9. 如权利要求 5 所述的光纤泵模块,其中,所述光学耦合器件是选自包括透镜、光锥组件、或它们的组合的组的一种。

10. 如权利要求 1 所述的光纤泵模块,还耦合到具有输入端和输出端以及掺杂有光学活性离子的芯部的光纤增益元件,其中所述增益元件的输入端连接到所述光纤的输出端,以将所述输出泵光束耦合到所述增益元件,使得在从所述输出泵光束吸收能量后,所述光学活性离子转变到更高能态以用于提供光学增益。

11. 如权利要求 10 所述的光纤泵模块,其中,所述增益元件包括单包层光纤,并且所述组合泵光束被耦合到所述增益元件光纤的芯部。

12. 如权利要求 10 所述的光纤泵模块,其中,所述增益元件包括双包层光纤,并且其中组合泵光束在芯部、内包层、或它们的组合中被耦合到所述增益元件光纤。

13. 一种光纤激光器,包括:

光学泵模块,包括:

支承在散热安装台上的光学发射器,所述光学发射器包括一个或多个 VCSEL 器件,

一个或多个光学组件,所述光学组件设置在跟随在所述发射器后面的预定距离处以准直从所述一个或多个 VCSEL 器件发射的相应光束,使得组合光束具有基本均匀的强度,以及

光纤,固定在光纤对准壳体中,使得固定在所述对准壳体中的所述光纤的输入端与所述组合光束共轴对准,所述光纤的所述输入端位于跟随在所述一个或多个光学组件后面的预定距离处,使得所述组合光束的具有最大强度的输出泵光束产生在所述光纤的输出端处;

光纤增益元件,包括具有输入端和输出端以及掺杂有光学活性离子的芯部的双包层光纤;以及

至少两个反射器,其中,第一反射器置于所述泵模块和所述增益元件之间,位于所述增益元件的输入端处,具有比所述第一反射器的反射率实质上更低的反射率的第二反射器置于所述增益元件的输出端处,使得设置在所述第一反射器和第二反射器之间的所述增益元件向从所述第二反射器发出的激光器输出选择性地提供光学反馈。

14. 如权利要求 13 所述的光纤激光器,其中,所述第一反射器和第二反射器是构建在所述增益元件光纤的芯区域中的光纤布拉格光栅,其中第一和第二光栅分别具有高反射率芯和低反射率芯。

15. 如权利要求 13 所述的光纤激光器,其中,所述输出泵光束被耦合到所述增益元件的内包层和芯部,产生在所述增益元件的芯部中的激光发射传播通过所述增益元件的芯部。

16. 如权利要求 13 所述的光纤激光器,其中,所述增益元件的劈开输出端形成所述第二反射器。

17. 如权利要求 16 所述的光纤激光器,还包括附加的一个或多个光学泵模块,其具有一个或多个 VCSEL 器件,所述光学泵定位于所述增益元件的劈开末端周围,从所述劈开末端以光学方式泵浦所述增益元件,其中包括一个以上 VCSEL 器件的所述附加的光学泵模块具有以线性或二维阵列布置的所述一个或多个 VCSEL 器件。

18. 如权利要求 16 所述的光纤激光器,还包括在所述劈开末端准直来自附加的一个或多个光学泵的泵辐射的聚焦器件。

19. 如权利要求 13 所述的光纤激光器,还包括一个或多个隔离器,其中至少一个隔离器跟随在所述第二反射器之后。

20. 如权利要求 13 所述的光纤激光器,还包括输出耦合器,用于将所述激光器输出与所述泵光束隔离开,并且在所述输出耦合器的输出光纤的芯中传输所述激光器输出。

21. 如权利要求 13 所述的光纤激光器,还包括开关器件,其设置在所述增益元件和所述第二反射器之间,使得所述光纤激光器以与脉冲模式操作所述泵模块的信号发生器同步的 Q 开关模式操作。

22. 如权利要求 21 所述的光纤激光器,其中,所述开关器件包括可饱和吸收器光纤组件、光纤耦合声光开关、或受激布里渊散射 SBS 非线性光纤组件。

23. 如权利要求 13 所述的光纤激光器,其中,所述光学泵模块中的一个或多个 VCSEL 器件包括两反射器 VCSEL 器件或三反射器 VCSEL 器件,其布置成线性或二维平面阵列,配置成集体发射。

24. 如权利要求 13 所述的光纤激光器,其中,所述光学泵模块中的一个或多个光学组件包括一个或多个微透镜,其与所述一个或多个 VCSEL 器件中对应的一个基本对准,其中所述一个或多个微透镜设置在预定距离处,使得集体发射是基本具有均匀强度的准直输出光束。

25. 如权利要求 13 所述的光纤激光器,其中,所述泵模块还包括设置在所述一个或多个光学组件与所述光纤的输入端之间的光学耦合器件,使得所述组合光束的最大强度基本聚焦在所述光纤的输入端上以用于有效耦合。

26. 如权利要求 25 所述的光纤激光器,其中,所述光学耦合器件是选自包括透镜、光学锥形组件、或它们的组合的组的一种。

27. 如权利要求 25 所述的光纤激光器,其中,所述光学泵模块还包括:

外部壳体,所述壳体具有与所述光学发射器热接触的导热基板,其中所述光学发射器、所述一个或多个光学组件、所述光学耦合器件以及所述光纤对准壳体共轴地固定在所述基板上;以及

外部隆起罩,所述罩封围所述基板上的所述光纤泵模块,其中所述罩还包括在一端的光纤对准引导件和弯曲半径限制器以支承和固定离开所述外部壳体的所述光纤,其中所述外部壳体适用于与所述基板热接触地安置的使用循环流体的外部冷却器件,所述循环流体是选自包括气体、液体和它们的组合的组的一种。

28. 如权利要求 13 所述的光纤激光器,其中,所述光学泵模块的输出光纤是单包层光纤,其中来自所述发射器的组合光束被耦合到所述光纤的芯部。

29. 如权利要求 13 所述的光纤激光器,其中,所述光学泵模块的输出光纤是双包层光纤,其中来自所述发射器的组合光束被耦合到芯部、内包层或它们的组合。

30. 如权利要求 19 所述的光纤激光器,其中,所述一个或多个隔离器包括双包层光纤,所述双包层光纤的芯部和内包层被匹配到所述增益元件的芯部和内包层。

31. 如权利要求 13 所述的光纤激光器,还包括至少一个附加泵模块,其包括一个或多个 VCSEL 器件,其中来自所述泵模块和所述至少一个附加泵模块的泵光束在具有一个输出光纤和多个输入光纤的双包层光纤组合器中组合,其中至少一个输入光纤的芯区域连接到所述组合器的输出光纤的芯区域,使得在每个输入光纤的内包层中传播的泵光束被组合以在所述输出光纤的内包层和芯区域中传播。

32. 一种光纤放大器,包括:

光学泵模块,包括:

支承在散热安装台上的光学发射器,所述光学发射器包括一个或多个 VCSEL 器件,

一个或多个光学组件,所述光学组件设置在跟随在所述发射器后面的预定距离处以准直从所述一个或多个 VCSEL 器件发射的相应光束,使得组合光束具有基本均匀的强度,以及

光纤,固定在光纤对准壳体中,使得固定在所述对准壳体中的所述光纤的输入端与所述组合光束共轴对准,所述光纤的所述输入端位于跟随在所述一个或多个光学组件后面的预定距离处,使得所述组合光束的具有最大强度的输出泵光束产生在所述光纤

的输出端处;

光纤增益元件,包括具有输入端和输出端以及掺杂有光学活性离子的芯部的双包层光纤;以及

具有输入端和输出端的输入光学耦合器,所述输入光学耦合器将输入信号组合到所述输出泵光束,以配置所述增益系统用于放大所述输入信号。

33. 如权利要求 32 所述的光纤放大器,其中

所述输入光学耦合器包括具有芯部、内包层和外包层的双包层光纤,并且具有输入端和输出端,且

所述泵光束和所述信号在所述耦合器的输入端处分别耦合到所述耦合器的内包层和芯部,使得所述泵光束和所述信号分别耦合到所述增益元件的内包层区域和芯部。

34. 如权利要求 32 所述的光纤放大器,还包括输出耦合器,其中,所述输出耦合器将已放大信号与所述泵光束分离,并且在所述输出耦合器的输出光纤的芯部中传输所述已放大信号。

35. 如权利要求 32 所述的光纤放大器,还包括一个或多个隔离器,其中,至少一个隔离器在所述增益元件之前,至少一个隔离器跟随在所述增益元件之后,其中跟随在所述增益元件之后的所述至少一个隔离器的输出端形成所述光纤放大器的输出端口。

36. 如权利要求 35 所述的光纤放大器,其中,所述一个或多个隔离器包括双包层光纤,所述双包层光纤的芯和内包层被匹配到所述增益元件的芯和内包层。

37. 如权利要求 32 所述的光纤放大器,还包括至少一个附加泵模块,其包括一个或多个 VCSEL 器件,其中来自所述泵模块和所述至少一个附加泵模块的泵光束在具有一个输出光纤和多个输入光纤的双包层光纤组合器中组合,其中至少一个输入光纤的芯区域连接到所述组合器的输出光纤的芯区域,使得在每个输入光纤的内包层中传播的泵光束被组合以在所述输出光纤的内包层和芯区域中传播。

38. 如权利要求 37 所述的光纤放大器,其中,所述至少一个附加泵模块中的一个或多个 VCSEL 器件以线性或二维阵列布置。

39. 如权利要求 32 所述的光纤放大器,其中,所述光学泵模块中的一个或多个 VCSEL 器件包括两反射器 VCSEL 器件或三反射器 VCSEL 器件,其布置成线性或二维平面阵列,配置成集体发射。

40. 如权利要求 32 所述的光纤放大器,其中,所述光学泵模块中的一个或多个光学组件包括一个或多个微透镜,其与所述一个或多个 VCSEL 器件中对应的一个基本对准,其中所述一个或多个微透镜设置在预定距离处,使得集体发射是基本具有均匀强度的准直输出光束。

41. 如权利要求 32 所述的光纤放大器,其中,所述泵模块还包括设置在所述一个或多个光学组件与所述光纤的输入端之间的光学耦合器件,使得所述组合光束的最大强度基本聚焦在所述光纤的输入端上以用于有效耦合。

42. 如权利要求 41 所述的光纤放大器,其中,所述光学泵模块中的光学耦合器件是选

自包括透镜、光学锥形组件、或它们的组合的组的一种。

43. 如权利要求 41 所述的光纤放大器,其中,所述光学泵模块还包括:

外部壳体,所述壳体具有与所述光学发射器热接触的导热基板,其中所述光学发射器、所述一个或多个光学组件、所述光学耦合器件以及所述光纤对准壳体共轴地固定在所述基板上;以及

外部隆起罩,所述罩封围所述基板上的所述光纤泵模块,其中所述罩还包括在一端的光纤对准引导件和弯曲半径限制器以支承和固定离开所述外部壳体的所述光纤,其中所述外部壳体适用于与所述基板热接触地安置的使用循环流体的外部冷却器件,所述循环流体是选自包括气体、液体和它们的组合的组的一种。

44. 如权利要求 32 所述的光纤放大器,其中,所述光学泵模块的输出光纤是单包层光纤,其中来自所述发射器的组合光束被耦合到所述光纤的芯部。

45. 如权利要求 32 所述的光纤放大器,其中,所述光学泵模块的输出光纤是双包层光纤,其中来自所述发射器的组合光束被耦合到芯部、内包层或它们的组合。

垂直腔面发射激光器泵浦的光纤增益系统

技术领域

[0001] 本发明涉及光纤增益系统,更特别地,涉及包括垂直腔面发射激光器(VCSEL)光学泵浦的光纤激光器和放大器。

背景技术

[0002] 光纤激光器和放大器(以下分别称为光纤激光器和光纤放大器)由于它们极好的转换效率、光束质量、体积小、重量轻以及成本低而为大家所熟知。主要是,光纤激光器和光纤放大器具有光学增益介质,通常包括在由包层区域包围的芯区域掺杂了光学活性离子的光纤。例如,芯可以掺杂有选择性稀土离子,其在从诸如高功率光学泵之类的强光源吸收光功率时被激励到高能态,当受激离子返回到其基态时,它们提供光学增益或放大。在掺杂光纤中生成的光被反射回到腔中供共振放大。

[0003] 低功率激光器和放大器(例如在 10-100mW (毫瓦) 范围内)的主要应用是在电信中放大光学信号。对于激光器的非常不同的其他工业和军事应用,例如切割、焊接、做标记等,则需要高输出功率。输出可以是多模或单模的,并且在聚焦光束中导致非常高的功率密度。另外,还可以生成光纤激光器或放大器输出以在连续模式下进行操作,或利用各种脉冲宽度和重复频率来进行脉冲操作。在最近的题为“110W Fiber Laser”的非专利文献公开 Conference on Laser and Electro Optics(paper CPD11-1, at CLEO'99, 23-28May1999, Baltimore, MD), Dominic et al. 中描述了一种高功率光纤激光器,其使用 Yb (镱) 掺杂的双包层光纤,专门设计为具有矩形横截面包层和单模芯部。在其中描述的配置中,双包层光纤通过偏振组合两个激光二极管条封装而在两端被泵浦,每个封装具有 45W 的输出功率,以实现总共 180W 的光学泵功率。

[0004] 大多数现有技术的光纤激光器和放大器专注于优化光纤设计,特别是光纤芯部的设计,以便最佳地耦合泵辐射。芯区域设计的进步在耦合使用不同类型的高功率光源(包括边缘发射激光二极管条、拉曼泵、钕掺杂光纤放大器(EDFA)泵和垂直腔面发射激光器(VCSEL)(特别是单 VCSEL 或 VCSEL 的线性阵列)等)的泵浦光方面作出了显著的改善。在实现光纤激光器和放大器中的高功率方面的显著进步可以归因于新型光纤(特别是双包层光纤)的进展。在双包层光纤中,内包层用作泵浦腔,外包层防止泵辐射泄漏。更具体而言,泵辐射耦合到内包层中,随着它沿光纤传播,它进出芯区域传播,但是始终限制在内包层与外包层的边界以内。

[0005] 在若干现有技术光纤激光器中,构建了具有不同形状的内包层以用于将泵辐射最佳地耦合到芯区域。例如,在 1989 年 3 月 21 日颁发给 Snitzer 等人的美国专利 No. 4815079 中,从具有相对于多模内包层和外包层偏离中心地设置的单模芯部的双包层光纤构建光纤激光器和放大器。泵辐射在内包层中启动。另外,光纤被配置成稍微弯曲,以便通常将不会与单模芯部耦合的模将会把泵功率耦合到芯部,以确保泵功率的有效耦合。

[0006] 在分别于 1999 年 9 月 7 日和 1999 年 10 月 12 日颁发给 DiGiovanni 的美国专利 No. 5949941 和 No. 5966491 中描述了用于将泵功率有效耦合到双包层光纤的不同配置。在

此设计中,内包层区域包括在芯部周围的不对称的应力诱发区域,接下来是第二包层。应力诱发区域用于生成折射率调制以提高泵辐射模多样性,从而提高通过芯区域的泵辐射传播。在 2002 年 11 月 5 日颁发给 Tankala 等人的另一美国专利 No. 6477307 中也描述了类似的设计,具有带多个部分的内包层区域,其被设计来提高芯区域中的泵辐射传播量。

[0007] 光纤激光器或放大器中的输出功率由来自泵源的输入功率以及与芯区域中的活性离子的吸收带线宽对准的波长带的比例来确定。在 2009 年 9 月 9 日颁发给 Gapontsev 等人的美国专利 No. 7593435 中,描述了能够在单模光束中传输 20kW 输出功率的光纤激光器。然而,这是非常复杂的布局,其中使用拉曼泵的多个单模 Er 掺杂光纤放大器被用作泵源。多个光纤放大器以单模组合到多模光纤组合器,以生成高功率泵源。接近于发射波长的窄波长带准确地对准掺杂芯部光纤的吸收线,由于高功率、窄线宽和低的光子缺陷,导致非常有效率的光学泵浦。

[0008] 作为替选,通常使用以与光纤芯部中的掺杂离子的吸收波长对应的波长进行发射的边缘发射半导体激光器、多个这种激光器的线性阵列(或激光器条)和扩展发射器激光二极管(或阵列)作为泵源。在 1989 年 5 月 9 日颁发给 Kafka 的美国专利 No. 4829529 中描述了一种这样的泵配置。更具体而言,单模光纤嵌入在多模包层和外包层中以形成泵浦腔,以便来自泵源的光通过全内反射被限制在泵浦腔内。至芯部的泵辐射沿光纤长度被耦合。

[0009] 在 2004 年 10 月 5 日颁发给 Snell 等人的美国专利 No. 6801550 中描述了泵浦内包层的另一变体。在该器件中,双包层光纤中的包层包括 V 形槽,以使用沿掺杂光纤的长度放置的多个发射器,有效率地将泵辐射耦合到芯。然而,此配置的一个缺点是 V 形槽设计为与包层一体,对于特定泵波长工作良好。

[0010] 虽然使用边缘发射器激光器的泵对于泵浦光纤激光器和放大器的掺杂芯部是有用的,但是边缘发射器激光器具有较宽的线宽,由泵激光器发出的所有光对激励只在窄波长带中进行吸收的掺杂离子没有贡献。此外,边缘发射器激光器的波长显著地随操作温度而变化,导致泵波长和掺杂离子的吸收线未对准。因此,条(bar)中的每一个边缘发射激光器都需要温度控制器机构来稳定相应的操作波长。

[0011] 近年来,已经使用 VCSEL 器件配置了用于固态激光器的光学泵。VCSEL 具有非常窄的线宽,另外,它们的波长随温度和驱动电流的变化非常小。VCSEL 芯片可以用 VCSEL 器件的二维阵列配置,这导致来自单个阵列的非常高的输出功率。在 2005 年 5 月 3 日颁发给 Zhang 等人的美国专利 No. 6888871 中,描述了用于泵浦固态激光器的使用 VCSEL 阵列的光学泵。VCSEL 和 VCSEL 阵列非常紧凑,可以容易地与用于向泵提供额外的光学和控制功能的其他器件集成。

[0012] 在其他现有技术专利公开中,例如在 2007 年 11 月 13 日颁发给 Jacobowitz 等人的美国专利 No. 7295375 中,描述了与微透镜和光互连组合的 VCSEL 阵列。在 2006 年 1 月 10 日颁发给 Walker Jr. 等人的美国专利 No. 6984076 中描述了 VCSEL 阵列到光缆的紧凑封装。然而,每个单独的 VCSEL 被导线键合到接触垫并且到封装的外连接器。该方案的一个主要缺点是,对于高光功率应用,导线键合易于发生故障,由此对可从这种泵获得的输出功率在实用方面有所限制。

发明内容

[0013] 在本发明中,提供了一种光学泵,包括高输出功率光学模块,高输出功率光学模块包括耦合到特别适于配置高功率光纤增益系统的光纤的 VCSEL 或 VCSEL 阵列器件。可以使用 VCSEL 阵列和光学组件的不同组合配置该光学模块以用于需要高功率输出的应用。

[0014] 本发明提供的高输出功率模块的一个重要方面是三反射器 VCSEL 器件,以用于诸如光纤激光器和放大器之类的高功率光纤增益系统中的泵模块的更好的波长稳定性。光学模块与光纤组件一起配置为提供光纤激光器和放大器。多级光纤系统,例如光纤激光器、单级或多级放大器以及它们的其他组合,可以按模块方式配置,以便为不同应用扩展功率输出要求。

[0015] 在本发明一实施例中,提供了高功率光学泵。高功率光学泵包括一个或多个 VCSEL 或 VCSEL 阵列。在本发明的一个变体中, VCSEL 或 VCSEL 阵列与用于光束整形和聚焦的一个或多个光学组件封装在一起。VCSEL 或 VCSEL 阵列的输出使用微透镜阵列、单透镜、或它们的组合来耦合到光纤尾纤。在本发明另一实施例中,根据所需输出功率来确定对一个或多个 VCSEL 或 VCSEL 阵列以及阵列维度的选择。有利地,可以从常规两反射器 VCSEL 器件或从根据本发明构建的高功率三反射器 VCSEL 器件来构建该光学模块。

[0016] 在另一实施例中,通过耦合来自包括一个或多个 VCSEL 或 VCSEL 阵列的高功率光学泵模块的光来提供光纤激光器。在实践中,来自泵模块的光被耦合到掺杂硅石光纤增益介质。掺杂光纤增益介质可包括双包层硅石光纤,其中泵辐射限制在内包层以内。增益介质置于两个反射器之间,一个反射器优选具有比另一个更小的反射率,以引导输出激光。来自 VCSEL 泵模块的光可以使用聚焦透镜、锥形光学器件或经由诸如组合器、循环器等之类的光学组件直接耦合到增益介质。

[0017] 在变体配置中,通过在增益介质的两个末端处提供单独的光学泵模块,来从两端泵浦掺杂硅石光纤增益介质。在某些应用中可以提供诸如声光开关之类的额外光学组件。光纤激光器可以在连续波(CW)模式、准连续波(QCW)模式或脉冲(P)模式下操作。此外,还可以通过使用以脉冲模式操作的电流源来操作泵模块,操作光纤激光器以获得短脉冲。激光器的脉冲宽度还可以通过以 Q 开关(Q-switching) 模式操作激光腔来进一步减小。

[0018] 在又一实施例中,通过耦合来自包括一个或多个 VCSEL 或 VCSEL 阵列的高功率光学泵模块的光来提供光纤放大器。来自泵模块的光与要放大的信号在掺杂硅石光纤增益介质的芯部中组合,掺杂硅石光纤增益介质具有单包层或优选地具有双包层硅石光纤,其中泵辐射被限制在内包层以内。信号和泵使用诸如光学组合器、多路复用器或偏振组合器等之类的常规组合器件或专门设计为与双包层光纤一起操作的组合器件来耦合。如此配置的放大器可操作来放大任何光学信号,包括短脉冲(种子脉冲)。在一实施例中,提供一种短脉冲再生放大器。可以通过模块地连接若干放大器来配置多级光纤放大器,以用于增强输出功率。

[0019] 在一不同实施例中,光纤激光器可以与光纤放大器级联,以便提高激光输出功率。该组合可以提供期望水平的激光功率,而无需提高操作光纤激光器的泵输入功率。在光纤激光器和放大器的替选配置中,可以组合来自若干泵模块的输出,以增强到掺杂光纤增益介质的输入光学泵功率,以便获得更高的输出功率。在又一实施例中,可以将泵模块从一端或从两端应用到增益介质。

附图说明

[0020] 使用在说明书中描述的不同实施例来描述本发明的广义框架,这些不同实施例将结合附图得到更好的理解,附图中:

[0021] 图 1 示出适于实施本发明的基本光纤增益系统的示意图;

[0022] 图 2 示出不同类型的顶部发射 VCSEL 器件,即两反射器 VCSEL 器件(2a)和扩展腔 VCSEL 器件的示意图,扩展腔 VCSEL 器件分别包括集成的第三反射器(2b)、外部结合到器件的第三反射器(2c)、以及外部第三反射器(2d);

[0023] 图 3 示出不同类型的底部发射 VCSEL 器件,即两反射器 VCSEL 器件(3a)和扩展腔 VCSEL 器件的示意图,扩展腔 VCSEL 器件分别包括集成的第三反射器(3b)、外部结合到器件的第三反射器(3c)、以及外部第三反射器(3d);

[0024] 图 4 是二维 VCSEL 阵列配置,即两反射器或扩展腔 VCSEL (a) 和带有外部反射器的扩展腔 VCSEL (b) 的示意图;

[0025] 图 5 是示出微透镜阵列与 VCSEL 阵列的布置以共同获取均匀发射图案的示意图;

[0026] 图 6 示出泵辐射到光纤的内包层的耦合,分别示出直接耦合(a)、透镜耦合(b)以及光锥耦合(c);

[0027] 图 7 示出包括光纤输出端口的 VCSEL 阵列光学泵模块;

[0028] 图 8 是使用 VCSEL 泵模块配置的光纤激光器的示意图,插图示出了双包层光纤横截面;

[0029] 图 9 是使用 VCSEL 泵模块以双泵浦模式配置的光纤激光器的示意图;

[0030] 图 10 是用于获取短激光脉冲的以 Q 开关模式配置的光纤激光器的示意图;

[0031] 图 11 示出使用 VCSEL 泵模块配置的光纤激光器的典型性能特性;

[0032] 图 12 示出使用 VCSEL 泵模块配置的光纤激光器的典型性能特性;

[0033] 图 13 示出使用 VCSEL 泵模块配置的光纤激光器的典型性能特性;

[0034] 图 14 是使用 VCSEL 泵模块配置的光纤放大器的示意图;

[0035] 图 15 是配置成以再生模式操作的激光放大器的示意图;以及

[0036] 图 16 是用耦合成单个光纤增益元件的多个 VCSEL 泵模块配置的光纤激光器或放大器的示意图。

具体实施方式

[0037] 将通过在不同附图所示的示例性实施例中描述本发明的各方面来呈现原理的广义框架。为了描述的清楚和方便起见,每个实施例都只包括几个方面。然而,来自不同实施例的不同方面可以组合或单独使用以实施本发明。代表性实施例的在本发明的广义框架内的许多不同组合和子组合可以对本领域技术人员而言是显而易见的,虽然未明确地显示或描述,不应理解为被排除。

[0038] 图 1 示出了示例性光纤增益系统 100 以说明本发明的不同方面,器可以配置成以不同模式实施本发明。光纤系统以基本构建块表示以示出广义原理,不应解释为限制。稍后将详细描述每个块的细节。更具体而言,光纤增益系统包括光学泵模块 101,光学泵模块 101 包括输出光纤 102 (也同义地称为光纤尾纤)。泵模块还包括光学发射器 111 和聚焦器件 112,聚焦器件 112 把来自发射器的光聚焦到光纤尾纤 102。稍后将详细地描述泵模块。

来自泵模块的光纤尾纤 102 的光学输出被拼接(优选地通过熔合拼接)到增益元件部分 105 的光纤尾纤 104。在替选布置中,也可以使用低损耗连接器 103 来从泵模块光耦合到增益元件部分。

[0039] 增益元件 105 形成增益系统的有源部件。增益元件是其中芯部被掺杂有活性离子的光纤部分,活性离子包括但不限于镱、铒、钕、铥、镨等,是用于光纤增益元件的已知掺杂剂。增益元件可包括仅有一个包层的单包层光纤,或优选地包括双包层光纤,双包层光纤具有耦合泵辐射的内包层和外包层以将泵辐射限制到光纤的芯部和内包层。重要的是,应注意,泵模块尾纤也可以是双包层光纤,其与增益元件的光纤尾纤匹配以最小化耦合损失。在某些情况下,使用一小段输入光纤,以便一端匹配增益元件,另一端匹配泵模块尾纤。用于实现低损耗耦合的这些和其他技术方面是本领域已知的,将不进行更详细的描述。

[0040] 泵辐射将芯部中的活性离子激励到更高电子态以用于激光发射或放大动作。增益元件的输出端 106 优选通过熔合拼接或与输入端处所示的 103 类似的低损耗连接器连接到输出光纤 107。增益元件的输出可以生成单模或多模发散光束,其利用准直光学器件 108 被准直成输出光束 109,准直光学器件 108 可以包括但不限于单个透镜、透镜组合、或透镜与导光光学器件的组合等。为了输出光束的更好的稳定性,可以在增益部分之后任选地包括隔离器 110 以减少来自输出光束所照射的对象的反射光。可以将诸如反射器、光栅、耦合器、循环器、声光开关等之类的附加光学元件适当地置于光纤增益部分的任一侧,以将增益元件配置为作为激光器或放大器操作,稍后将更详细地进行描述。

[0041] 光学泵模块

[0042] 一方面,本发明提供一种高功率光学泵模块,其包括单个高输出功率 VCSEL 器件或布置成二维阵列的多个 VCSEL 器件。在 Seurin 等人于 2012 年 7 月 5 日提交的未决美国专利申请 No. 13/541906 中已经公开了由 VCSEL 阵列构建的光学照明器,该申请由本申请的发明人中的某些人共同创作并且由 Princeton Optronics Inc. Mercerville, NJ 共同拥有,该申请的内容通过引用整体合并于此。在上文引用的申请中公开的 VCSEL 器件是使用置于活性层两侧的两个反射器配置的常规 VCSEL 器件。在图 2 中,示出了包括常规器件的若干 VCSEL 器件结构。图 2 所示的器件中具有类似功能的相同元件利用相同的附图标记来标识,适用于相同的描述。

[0043] 更具体而言,图 2a 所示的两反射器激光自发射 VCSEL 器件是在包括第一电接触层 202 (也是第一电气端子)的衬底 201 上构建的。发光区域 204 是半导体增益介质,其设置在两个反射器 203 和 206 之间。反射器可以是各种类型的,诸如包括电介质或半导体的分布式布拉格光栅,包括半导体、电介质或金属的光栅,或者反射性金属。第二电接触层 207 (也是第二端子)形成在与衬底触点 202 所在的表面相反的表面。电流限制孔阑(aperture) 205 将驱动电流的流动控制到发光区域,并且还确定发射光束的形状,如由 Seurin 等人于 2011 年 12 月 24 日提交的共同创作且共同拥有的未决美国专利申请 No. 13/337098 中所描述的那样。与电流限制孔阑对准的透明窗 208 设置在 VCSEL 表面上以用于在垂直方向上(在此图中相对于衬底平面)发射激光输出 209。

[0044] 这里采用的惯例仅是为了示范和说明方便,不应理解为限制。为便于论述,将采用如下惯例:对器件的“顶”和“底”端或“顶”和“底”电触点的引用是参考发射表面的。相应地,器件的顶端上的发射端和电触点将分别称为顶端和顶部触点。器件的非发射端和到

非发射端的电触点将贯穿示例性实施例分别称为底端和底部触点,除非另有声明。相应地,图 2a 所示的顶发射器件具有位于衬底端对面的发射表面 208, VCSEL 发射 209 来自于发光区域 204 上方的窗口。

[0045] 图 2a 所示的现有技术器件可用于构建泵模块(尤其是用于低功率应用)以泵浦例如固态激光器,如在由 Seurin 等人于 2012 年 7 月 5 日提交的未决美国专利申请 No. 13/541906 中公开的那样。使用布置成阵列的多个常规两反射器器件构建的高功率泵模块可以构建来在某些应用中光学泵浦光纤增益系统,将稍后进行描述。然而,已经使用根据本发明构建的扩展腔 VCSEL 开发了具有远更希望的输出特性(包括但不限于单模下的更高输出功率,更好的波长稳定性(在长时间操作下随温度变化的稳定性)等)的更好的泵模块。图 2b-2d 所示的示例性扩展腔 VCSEL 器件具有非常类似于图 2a 所示的现有技术器件的基本结构,除了它包括额外的第三反射器以实现前面提及的某些期望特性之外。

[0046] 更具体而言,图 2b 示出具有三个反射器的顶部发射 VCSEL 器件。构建于衬底 201 上的该器件具有设置在第一反射器 203 和第二反射器 206 之间的发光区域 204。此器件中的反射器 206 制作得是部分反射性的,第三反射器 210 制作在衬底的与具有发光区域的表面相对的底表面上。反射器 206 和 210 在设计有特定相位关系时导致高反射率,以便该组合与反射器 203 一起提供期望的激光发射操作。到衬底的电触点通过第三反射器 210 来制作。类似于图 2a 所示的现有技术器件,在此示例性配置中,输出 209 仍穿过反射器 203。

[0047] 在图 2c 所示的扩展腔 VCSEL 器件的变体示例性实施例中,顶部发射 VCSEL 器件构建在衬底 201 上,其具有设置在反射器 203 和 206 之间的发光区域 204。与参考图 2a 描述的器件不同,此实施例中的反射器 203 形成中间反射器,并且制作为部分反射性的,以包括第三反射器 210,从而配置扩展腔器件。衬底 201 具有应用到与发光区域 204 相对的表面的选择性抗反射涂层 211。更具体而言,抗反射涂层应用在光束在反射器 203 和 210 之间行经的区域。金属化触点 202 形成在未被抗反射涂层覆盖的区域中的底部处。

[0048] 扩展腔形成在反射器 206 和第三反射器 210 之间,第三反射器 210 沉积在透明衬底 213 上,透明衬底 213 具有应用到一个表面的抗反射涂层 212,第三反射器 210 的与之相对的表面用金属层 215 涂覆以便于结合到热沉。透明衬底的包括抗反射涂层的表面具有应用到光束行经的区域以外的区域的金属化层 214。第三反射器 210 位于 VCSEL 器件的底表面下方由 VCSEL 以及透明衬底 201 和 213 的厚度确定的设计距离处,使得来自反射器 203 和 210 的组合相位匹配反射提供高反射率,以产生具有期望输出特性的激光动作,所述期望输出特性包括单模下的高输出功率、更好的波长稳定性、以及均匀的光束形状。透明衬底上的第三反射器使用焊料 216 贴附到衬底 201 的具有抗反射涂层 211 的表面,以形成单片模块。共振激光动作发生在由三个反射器 210、203 和 206 形成的腔中。激光输出光 209 从反射器 206 发射。

[0049] 在本发明的不同实施例中,扩展腔 VCSEL 还可以使用图 2d 所示的外部反射器来配置。在此实施例中,基本器件非常类似于图 2a 所示的现有技术器件。更具体而言,VCSEL 器件包括衬底 201,在衬底 201 之上,发光区域 204 设置在两个反射器 203 和 206 之间。反射器 206 的反射率被实质上减小,使得具有预定反射率的外部第三反射器 210 位于反射器 206 上方的预定高度处。特别地,第三反射器置于 VCSEL 发射窗口 208 上方,以便反射器 206 和 210 的组合相位匹配反射率足够高,以在由反射器 203、206 和 210 形成的腔中提供激光输出

219。从第三反射器从与面向 VCSEL 器件的表面相反的表面 211 发射激光器的输出 209。

[0050] 在图 2a-2d 所示的器件中,参考了顶部发射配置,其中激光发生从器件的与衬底端相反的表面发生。替代地,扩展腔 VCSEL 还可以配置为用于图 3a-3d 所示的底部发射器件。在图 3a-3d 中,等效的并且提供与图 2a-2d 所示的对应的顶部发射对等器件相同的功能的元件用类似的附图标记来标识,将不再重复它们的描述。现在参考图 3,常规的现有技术两反射器底部发射器件示于图 3a 中并且描述于 Seurin 等人在 2012 年 7 月 5 提交的未决美国专利申请 No. 13/541906 中,上述申请的内容通过引用整体合并于此。

[0051] 在底部发射器件中,发射面位于器件的衬底一侧。相应地,顶部触点和底部触点分别位于衬底端和活性层端。应注意,底部发射器件通常安装为衬底一侧朝上,以便器件中的光发射仍在朝上的方向(在此图示中,相对于衬底平面)。

[0052] 扩展腔底部发射器件的基本原理类似于图 2b-2d 所示的顶部发射对等物。为了配置图 3b-3d 所示的扩展腔底部发射 VCSEL 器件,反射器 303 制作为具有较低的反射率,并且置于反射器 306 和第三反射器 310 之间。确定第三反射器的反射率以及其相对于反射器 303 的位置,以便来自反射器 306、303 和 310 的组合的相位匹配反射率提供 VCSEL 腔中的激光。更具体而言,在图 3b 所示的实施例中,第三反射器 310 与衬底 301 集成。在图 3c 所示的替代实施例中,第三反射器 310 构建在透明衬底 313 上,透明衬底基本以参考图 2c 描述的方式结合到底部发射 VCSEL 器件,以构建单块组合。将不重复该描述。在图 3d 所示的实施例中,第三反射器 310 置于 VCSEL 器件外部。

[0053] 对本领域技术人员将显而易见的是,在图 3b-3d 所示的实施例中,激光发射是通过 VCSEL 衬底 301 中的窗口 308 进行的。虽然图 2a-2d 和 3a-3d 中的器件示为分别具有衬底 201 和 301,但是减小衬底的厚度,或者在某些应用中完全去除衬底以便进行有效率的散热是常见做法。参考图 2 和 3 描述的器件的一个优点是,VCSEL 器件具有不使用外部导线键合的平面触点。结果,能以晶片级构建整个组件,以在晶片上产生多个模块,然后通过切割而将所完成的模块分开,无需从外部将单个器件连接到单个接触垫。

[0054] 可以有利地扩展这里描述的 VCSEL 器件,以构建 VCSEL 阵列和 VCSEL 阵列的阵列,从而以模块方式配置光学泵模块,如在由 Seurin 等人于 2012 年 7 月 5 日提交的未决美国专利申请 No. 13/541906 中针对常规两端子 VCSEL 器件所描述的那样。相应地,可以以如图 4 所示的阵列来配置三反射器扩展腔 VCSEL 器件。更具体而言,图 4a 示出了在公共衬底 412 上从多个 VCSEL 器件(每一个点 410 都表示 VCSEL 器件)构建的二维 VCSEL 阵列 411。可以从参考图 2a-2c 和 3a-3c 描述的任何类型的 VCSEL 器件构建 VCSEL 阵列。阵列中的所有 VCSEL 器件都电连接到充当阵列的第一公共端子的衬底。为了使 VCSEL 共同地发射,阵列中的每一个 VCSEL 的第二电触点使用阵列表面上的公共金属化层来连接,其充当阵列的第二公共端子。根据本发明构建的平面阵列的一个重要方面是,到阵列的触点完全是平面的,由此消除了对外部导线键合的需要。本领域技术人员将能够理解,这些 VCSEL 阵列的可靠性显著高于具有外部导线键合的常规器件。

[0055] 为了获得较高的输出功率,阵列中的所有 VCSEL 器件都被配置为沿相同方向(在此示例中由向上箭头 414 所示)同相地共同发射。为了便于描述,如图所示的 VCSEL 阵列 412 将被称为 VCSEL 阵列芯片(或下面称为阵列芯片)。在此特定示例中,VCSEL 器件的阵列以圆图案布置。可以理解,可以以任何规则的几何图案或随机形状来配置阵列芯片。阵列

芯片 412 可以安装在 Seurin 等人于 2011 年 12 月 24 日提交的共同创作且共同拥有的未决美国专利申请 No. 13/337098 中描述的散热基台 413 上。上述申请的内容通过引用整体合并于此。

[0056] 现在参考图 4b, 示出了配置有外部反射器的 VCSEL 阵列。更具体而言, 在公共衬底上构建的多个 VCSEL 器件的阵列被配置为三反射器 VCSEL 阵列。单独的外部反射器 420 (图 2d 和 3d 中的第三反射器的等效物) 位于 VCSEL 阵列衬底 412 的顶部上方的预定距离处, 以便包括三个反射器的组合腔在每个 VCSEL 器件中产生具有所需特性的激光动作 419。来自 VCSEL 阵列的输出光束 414 沿向上方向 (在此特定示例中) 从外部反射器 420 发射。

[0057] 注意, 可以通过适当地降低反射器之一 (206 或 306 或 203 和 303, 视情况而定) 的反射率, 从图 2a-2d 或 3a-3d 所示的顶部或底部发射 VCSEL 器件构建外部腔 VCSEL 阵列。整个模块可以以晶片形式组装, 单个第三反射器可以结合到具有 VCSEL 阵列的衬底。在变体实施例中, 许多模块可以这样制造在一起, 并且与外部反射器一起切成块。本领域技术人员将能够以本领域已知的许多不同的变体制造过程实施本发明。

[0058] 作为惯例且不作为限制, 在下面的讨论中, 术语 VCSEL 阵列或 VCSEL 阵列器件或元件将包括任何 VCSEL 器件, 包括 VCSEL、扩展腔 VCSEL 和外部腔 VCSEL 或 VCSEL 的阵列芯片, 如参考图 2a-2d、3a-3d 和 4a-4b 所描述的那些。通过使用这些 VCSEL 器件, 可以构建光学模块。已知从单个 VCSEL 的发射是窄的, 并且可以相对容易地耦合到光纤。然而, 为了从 VCSEL 模块获得高功率, 如为光纤增益系统配置高输出功率 VCSEL 泵模块所需的那样, 可能需要额外的光学元件, 以根据应用对阵列中的每一个 VCSEL 或整个阵列 (视情况而定) 的光束进行整形。

[0059] 现在参考图 5 所示的实施例, 用于光束整形的一个选项是使用微透镜的阵列来准直来自阵列器件中的个体 VCSEL 的输出光束。更具体而言, VCSEL 阵列器件 510 和微透镜阵列透镜元件 517 设计和制造为使得单个器件和元件在相同轴上对准。VCSEL 阵列衬底 512 安装在热沉 513 上以便有效地冷却 VCSEL 器件。微透镜阵列对准且定位在离 VCSEL 阵列预定距离处, 以便来自 VCSEL 元件的发散光束 515 被形成为准直光束 516 的阵列, 具有与 VCSEL 阵列和微透镜阵列相同的阵列节距 (pitch) 和形状因子。所产生的组合输出光束看起来具有基本均匀的强度横截面, 比来自 VCSEL 阵列的原始输出光束具有低得多的发散性。

[0060] 在实践中, 可能需要其他光学布置以有效地耦合来自 VCSEL 阵列的输出光, 以用于泵浦光纤, 特别是常用于诸如光纤激光器或放大器之类的光纤增益系统的双包层光纤。图 6 中示出了特别适合于 VCSEL 泵模块的若干示例性布置。现在参考图 6a, 示出了直接把来自 VCSEL 阵列的光耦合到双包层光纤的布置。然而, 这些布置也可以用于将泵浦光耦合到单包层光纤。替代地, 泵浦光可以耦合到单包层光纤, 然后单包层光纤优选通过熔接耦合到双包层光纤或双包层光纤增益元件。

[0061] 更具体而言, 具有多个 VCSEL 器件的 VCSEL 阵列 612 在某一区域共同地生成激光输出光 614, 该区域耦合到包括光纤增益系统的双包层光纤 611。双包层光纤是本领域已知的, 通常包括由内包层区域 620 和外包层区域 622 包围的中央芯区域 621。这里所示出和所描述的布置只是示例性的, 不应解释是唯一选项。也可以使用用于将 VCSEL 阵列的输出耦合到单或双包层光纤的其他方法。

[0062] 选择双包层光纤中的内和外包层区域的折射率, 以便泵辐射被限制在内和外包层

区域之间以包围芯区域,以便有效率地将泵辐射耦合到芯区域。芯区域 621 通常掺杂有光学活性离子,光学活性离子需要被泵激光输出 614 激励,以配置光纤激光器或光纤放大器(不同于形成用于光学地泵浦光纤激光器的源的 VCSEL 阵列)。当内包层直径小于 VCSEL 阵列发射区域或它们几乎相同时,此布置特别合适。VCSEL 阵列可以包括也可以不包括微透镜阵列。

[0063] 图 6(b) 示出用于把来自 VCSEL 泵激光器的光耦合到光纤的另一布置。特别地,来自包括微透镜阵列 615 的 VCSEL 阵列 612 的泵辐射使用外部聚焦透镜 617,以在光纤增益系统(例如,光纤激光器或放大器)的输入处将准直输出光束 616 耦合到双包层光纤 611 的内包层区域 620 中。内包层中的光被较低折射率的外包层 622 限制在此区域中。双包层光纤 611 的输入端通常在短距离上不包括芯区域 621,因为光纤激光器或放大器的辐射通常局限于光纤的其他区域。然而,在双包层光纤的输入端具有芯区域也不是不常见的。

[0064] 在如图 6c 所示的再一个布置中,光锥末端用于将泵激光耦合到双包层光纤,这取决于各种情况,包括但不限于阵列 612 的尺寸和光纤 611 的属性。更具体而言,可以使用带有高折射率芯部和较低折射率包层的锥体光学元件 623 来代替聚焦透镜。来自 VCSEL 阵列泵激光器 612 和对应的微透镜阵列 615 的准直光束 616 通过锥形部件 623 耦合到光纤。光束 624 从组件的芯区域的锥形侧面反射到光纤内包层 620 中。应注意,在没有微透镜阵列的情况下,来自 VCSEL 阵列的光也可以耦合到锥体末端。耦合方法的选择由要耦合的输出功率和应用确定。尽管这里只描述了几个示例,但是这些方法的许多其他组合和子组合可以对本领域技术人员显而易见。

[0065] 本发明的一个方面是提供用于泵浦光纤增益系统(例如光纤激光器或光纤放大器)的高光功率泵模块。参考图 2 和 3 描述的 VCSEL 器件,特别是扩展腔和外部腔 VCSEL 器件,在单模下生成高功率输出,由此导致非常高质量的输出光束。从这些类型的 VCSEL 器件构建的 VCSEL 阵列理想地适于在小占用面积上构建非常高功率的光学泵模块。从这些模块获取的典型输出光功率在 CW 操作中可以在 20-200W 的范围,在脉冲操作中可以在 200W - 2kW (千瓦)的范围。值得注意的是,为从本领域已知的常规光学泵获取类似的功率输出,将需要非常复杂的冷却系统来冷却光学泵。从 VCSEL 阵列构建的泵模块在这方面具有独特的优点,已经公开在 Seurin 等人于 2012 年 7 月 5 提交的未决美国专利申请 No. 13/541906 中。该申请的内容通过引用整体合并于此。

[0066] 现在请参看图 7,示出了从 VCSEL 阵列构建的光学泵模块的一个实施例。更具体而言,光学泵模块 701 包括具有两个部件的模块壳体:壳体基板 730 和罩 731。壳体的罩进一步包括光纤对准引导件 728 和弯曲半径限制器 729,以稳固地保持光纤尾纤 719。应注意,这里所示的泵模块只是示例性的,取决于泵模块的输出功率和散热要求,可以使用其他物理形状和尺寸。泵模块还包括光源,光源包括置于基台 713(例如,印刷电路高热导率陶瓷或适于构建平面接触的其他类似平台)上的 VCSEL 阵列 712。基台结合到高热导率基座 723。

[0067] 保持对准壳体 726 的光纤组合件安装台 727 被设置以保持光纤尾纤 719 与光源对准。光纤尾纤穿过对准引导件 728 和弯曲半径限制器 729。虽然可以使用其他类型的光纤尾纤,但是在此实施例中双包层光纤尾纤是优选的,用于构建高光功率泵模块,尤其是用于与具有包括双包层光纤的增益元件的光纤激光器或光纤放大器一起使用。为了获得准直泵

光束,在独立安装台 724 上支承微透镜阵列 715。微透镜阵列设置在离 VCSEL 阵列预定距离处,二者对准以便生成具有均匀强度的准直泵光束,如参考图 5 所描述的那样。替代地,微透镜阵列可以在晶片处理级与 VCSEL 阵列集成。

[0068] 在此示例性实施例中,来自 VCSEL 阵列的准直泵辐射使用聚焦透镜 716 耦合到光纤尾纤。聚焦透镜支承在第二独立安装台 725 上。应注意,前面参考图 6 描述的其他耦合布置,例如直接耦合或使用锥形波导的耦合,将同样有效。聚焦透镜定位在离微透镜阵列一距离处,以将准直泵光束聚焦到光纤尾纤上。应注意,VCSEL 阵列、微透镜阵列、聚焦透镜和光纤对准壳体可以被独立地移动以便实现对准。

[0069] 一旦对准了所有组件,它们就被结合到模块壳体基板 730。光纤尾纤用对准引导件和弯曲半径限制器密封。壳体罩和基板可以是环境密封的。基板 730 可以结合到散热器件,例如用于通过热安装台 723 来冷却 VCSEL 阵列的热沉。冷却可以通过使流体例如空气、气体或液体冷却剂循环通过热沉来促成,如在由 Seurin 等人于 2012 年 7 月 5 日提交的未决美国专利申请 No. 13/541906 中所描述的那样。

[0070] 光纤激光器

[0071] 现在同时参考图 7 和图 1,可以使用前一章节中描述的 VCSEL 泵模块 701 来配置参考图 1 描述的光纤增益系统 100。更具体而言,光学泵模块 701 替换图 1 中被称为泵模块 101 的块。在示例性实施例中,根据在前面的几个章节中概述的概念来配置图 8 所示的光纤激光器。使用包括例如单或双包层光纤部件的增益元件 842 来构建光纤激光器。为此实施例选择的双包层光纤(示于插图中)包括掺杂有产生发激光动作的活性离子的芯区域 843。芯区域被内包层区域 844 和外包层区域 845 包围。应注意,其他类型的增益元件可以利用 VCSEL 泵模块被同样良好地泵浦。

[0072] 内包层区域对泵辐射是透明的。选择芯部、内包层区域和外包层区域的折射率,以便泵辐射被限制在内和外包层区域内。选择泵辐射的波长,以匹配在增益元件光纤的芯中掺杂的离子的吸收带,以实现泵辐射的有效吸收。泵辐射在内包层区域中以各种角度传播到光纤轴,以便泵辐射也跨越和穿过芯区域传播。芯区域中的离子吸收泵辐射并且转变到具有较高能量的激发态。在返回到基态时,过剩能量表现为经放大的光。掺杂离子可以是各种类型的离子中的一种或多种,并且对应于所需的来自光纤激光器的特定操作波长。

[0073] 增益元件置于反射器 840 和 846 之间,以构建光纤激光器共振腔。反射器通常是光纤布拉格光栅,它们在芯区域中有效,但是对内包层区域中的泵辐射没有影响。在此示例中,反射器 840 具有高反射率,而具有相对较低反射率的第二反射器 846 配置为是激光输出口。增益元件可以拼接到反射器或使用低损耗连接器 833 连接,如图 8 所示。在实践中,输入和输出光纤部分 834 和 836 分别拼接到增益元件的反射器端,以将它连接到泵模块或输出口。替代地,也可以使用低损耗连接器。

[0074] 来自泵模块 801 的光纤尾纤 819 通过增益元件,经由反射器 840 处的输入光纤 834 被拼接。光纤激光器的输出通过输出光纤部分 836 发射为发散光束。额外的透镜 838 可以用于获取准直输出光束 839。可以在输出反射器 846 和输出光纤部分 836 之间设置可选的隔离器 848,以便防止来自自由输出光束照射的对象的反射光进入光纤激光器中,其可能导致光纤激光器不稳定,特别是当增益元件中的内部增益高时。额外选项是用抗反射涂层适当地涂覆光纤末端,和/或使光纤成一角度,以减少来自光纤末端的使激光器不稳定的反射

光。

[0075] 在本发明的一个变体实施例中,特别是当增益元件中的内部增益比较高时,用于最佳光纤激光器操作的输出端(在此示例中,846)处的反射器的反射率需要十分低。如果所需反射系数大致是 4%,那么代替反射器 846 (例如,光纤布拉格光栅),光纤的垂直劈开末端是优选的。在图 9 所示的本发明的一个实施例中,激光器的输出处的垂直劈开末端有利地用于从两端以光学方式泵浦增益元件(双泵浦配置),特别是当需要高的泵功率以获取高功率激光输出时。

[0076] 更具体而言,在此示例中的增益元件 935 包括与参考图 8 描述的类似的双包层光纤。增益元件的一端连接到或优选地拼接到反射器,例如光纤布拉格光栅 940,另一端 936 垂直于发激光轴劈开。劈开的光纤末端充当低反射率反射器,并且与增益元件另一端的反射器形成反馈腔。包括 VCSEL 阵列的光学泵模块 901 使用光纤拼接或低损耗连接器 933(在此示例中)连接到反射器的另一端。此端的 VCSEL 光学泵浦基本上类似于参考图 8 所描述的那样,为了简便起见将不再重复描述。

[0077] 光纤的垂直劈开末端 936 还提供激光输出 921,激光输出 921 由一个或多个光学元件准直,例如在此例子中为透镜 922,以提供准直激光输出 909。此布置特别适合于应用来自增益元件 935 的第二端的更多输入泵辐射。更具体而言,来自一个或多个 VCSEL 阵列 925 (为清楚起见,只标记了一个)(每一个 VCSEL 阵列 925 都具有相应的微透镜阵列)的额外的泵辐射可以布置在光纤激光器输出光束周围的散热安装台 926 上。散热安装台 926 由导热材料构建,以为 VCSEL 阵列提供冷却。来自 VCSEL 阵列和微透镜组合件的泵辐射 927 使用透镜 922 耦合到光纤激光器的输出端 936 (双泵浦)的内包层中。孔阑安装台 926 的中心孔允许输出光束 909 从输出光纤 936 的芯的通过准直透镜 922 发射。

[0078] 返回参考图 8 所示的光纤激光器配置,其中所描述的光纤激光器可以在不同的模式下进行操作,包括连续波(CW)、准连续波(QCW)或脉冲(P)模式。在实践中,泵模块,特别是 VCSEL 阵列泵模块,可以通过连续施加电流而进行 CW 操作,或使用预定占空因数的脉冲电流源而进行 QCW 或脉冲操作,这取决于光纤激光器的输出处的所需脉冲宽度。在一个实施例中,可以使用脉冲发生器来生成电脉冲,所生成的电脉冲具有光纤激光器光学输出的输出脉冲宽度所需的脉冲宽度和重复率。来自脉冲发生器的输出被放大以生成高电流驱动脉冲,以便驱动 VCSEL 阵列泵模块。通过光纤尾纤 819 的内包层传输的高能量泵浦脉冲耦合到增益元件的内包层区域,并且大致在 VCSEL 泵脉冲的持续时间内放大在芯部中传播的光纤激光器光束。

[0079] 上文参考图 8 描述的脉冲光纤激光器配置特别适于生成中等长度脉冲(1-100 微秒)。光纤激光器中更短脉冲的生成主要受限于动力学,特别地,光纤增益元件的芯(843)中生成发激光动作的离子的激发态寿命。因此,为了生成非常短的激光脉冲(1-100 纳秒),特别是在具有带长激发态寿命的增益元件的激光系统中,Q 开关的已知方法是更合适的。图 10 示出根据本发明的可用来配置 Q 开关光纤激光器的实施例。Q 开关的原理是本领域已知的,将不进行详细描述。

[0080] 更具体而言,图 10 所示的实施例包括与参考图 8 描述的类似的基本光纤激光器布局。具有类似的附图标记的元件是等效的,或提供基本类似的功能,将不重复描述。在此配置中,VCSEL 泵模块 1001 使用生成电流驱动脉冲 1061 的函数发生器 1054 在脉冲模式下操

作,脉冲 1061 的长度对于增益光纤 1042 的显著激发而言足够长。来自函数发生器的输出脉冲 1061 在电流驱动器 1055 中进一步放大,用于驱动光学泵模块的 VCSEL 阵列。泵脉冲传输到尾纤 1019 的内包层,尾纤 1019 连接到增益元件 1042 的输入光纤部分 1034。增益元件后面是 Q 开关元件 1056, Q 开关元件 1056 包括但不限于可饱和吸收器光纤组件、光纤耦合声光开关、SBS (受激布里渊散射)非线性组件、以及本领域已知的用于 Q 开关的许多其他器件,可取决于应用,根据它们各自的优点来选择。

[0081] 在操作中,增益元件的芯区域中的离子吸收泵辐射,并且在由激发态寿命确定的时间段内获得高激发态的高族群密度。激发态下的离子具有非常高的内部增益,由此非常快速地建立高功率脉冲。当 Q 开关 1056 被激活时,激光动作快速地累积,非常短的高能量光纤激光器脉冲 1062 分别通过输出反射器 1046、隔离器 1048、输出光纤和准直透镜 1036 传输到光纤的输出端。在此情况下,光纤激光器输出 1009 是一连串高能量短脉冲。此序列的重复率由 Q 开关激活频率确定。随着高能量脉冲从增益元件中发射,芯区域中的离子返回到基态。结果,芯区域中的增益积累很快终止,直到新的电脉冲被提供到 VCSEL 阵列以向光纤激光器提供光学泵浦。

[0082] 根据本发明配置的光纤激光器的一个优点是,输入到光纤激光器增益元件的大部分 VCSEL 阵列泵功率在从光纤激光器生成高输出功率时被有效利用。在比边缘发射器半导体激光器显著更窄的窄波长带中发射 VCSEL 泵辐射。通过适当地选择 VCSEL 发射波长,它很好地与增益离子的吸收带匹配,以便大部分泵辐射被增益离子吸收。在图 11 中,来自与参考图 8 (或 10)描述的类似的光纤激光器的输出功率,以及没有被光纤激光器吸收的剩余泵功率,作为泵功率(x 轴)的函数被绘图,分别以迹线 1101 (左 y 轴)和 1102 (右 y 轴)示出。通过分色反射器或光学过滤器,将没有被增益光纤吸收的泵辐射量与光纤激光器光束分离。

[0083] 根据图 11 所示的曲线图,绘制了作为吸收泵功率的函数的光纤激光器输出功率,如图 12 所示。此图所示出的曲线图表明,光纤激光器输出功率与吸收泵功率成线性关系。插图示出了光纤激光器输出辐射的光谱。在图 13 中分别以线性刻度 (a) 和对数刻度 (b) 示出了光纤激光器输出的详细输出谱。更具体而言,图 13a 示出了输出谱的规范化图表,图 13b 示出了作为波长的函数以 dBm 为单位绘制的强度(y 轴)。对于此示例性光纤激光器,谱的线宽大约是 0.27nm。

[0084] 光纤放大器

[0085] 返回参考图 1,其中所示的光纤增益系统可被配置成光纤放大器。在图 14 中示出了使用 VCSEL 阵列光学泵模块配置的光纤放大器的一个实施例。光纤放大器的许多组件类似于参考图 8 描述的光纤激光器。更具体而言,光纤放大器包括增益元件 1442,增益元件 1442 包括具有与前面参考图 8 描述的基本相同功能的芯区域、内包层区域和外包层区域 1443、1444 和 1445 (插图所示)。芯区域包括生成光学增益并且对光信号放大有贡献的活性离子。虽然使用此特定配置来描述原理,但是可以扩展相同原理,以配置其他类型的光纤放大器。

[0086] 在包括 VCSEL 阵列的泵模块 1401 中生成泵辐射,以将光耦合到输入端口的内包层,而要被放大的光信号 1440 连接到光组合器 1447 的输入端口的芯部。组合器的输出端口包括匹配光纤增益元件输入部分 1441 的横截面的双包层光纤 1434。效果上,输入信号在芯

区域中传播,泵辐射在组合器和光纤增益元件的内包层和芯区域中传播。光学隔离器 1448 置于光纤增益元件 1442 和输入光纤部分 1441 之间以仅控制芯部中的光。更具体而言,隔离器促进沿前进方向输入的要放大的输入信号传输到光纤增益元件中,但是防止来自增益元件的辐射的反射沿后退方向行进回到光纤放大器增益元件中,以防止光纤放大器的不稳定。

[0087] 经放大的信号通过在此示例中置于增益元件右侧的第二隔离器 1448 从增益元件中发射。该隔离器防止任何反射信号被传输回到增益光纤并使光纤放大器不稳定。第二隔离器优选地通过熔接或通过低损耗耦合器 1433 连接到输出光纤部分 1436。通常,来自放大器的输出是发散光束,其使用额外的光学元件(例如,在此示范性例子中,简单透镜 1438)准直成放大输出信号 1409。取决于应用也可以使用其他的光束整形方法,这些方法是本领域已知的。

[0088] 此外,为了从光纤放大器实现更高增益和输出功率,可以通过级联来构建多级放大器,即,一级的输出光纤 1436 的输出 1409 和类似于 1401 的第二光学泵模块一起连接到类似于 1447 的输入耦合器,以构建第二级放大器。还可以进一步认识到,取决于在每一级所需的放大水平,多级配置中的每一个放大级可以基本相似或者可以不同。例如,每一连续的放大器级可以被设计为处理不同水平的输入和输出光功率。确定双包层光纤增益元件的物理尺寸与用于输入和输出端口尾纤的双包层光纤良好匹配也是重要的。

[0089] 在又一变体中,来自与参考图 8 描述的类似的光纤激光器的输出可以与类似于参考图 14 描述的光纤放大器级适当地结合,以配置具有高输出功率的 CW 或脉冲模式光纤激光器。在此配置中,增益元件的第一级配置为将要在 CW、QCW 或脉冲模式下操作的激光器。来自第一级的非准直输出被适当地组合到配置为光纤放大器的第二级增益元件。实践本技术的技术人员可以想到的这些及其他组合和子组合也包括在这里提供的描述的广义框架内。

[0090] 本领域技术人员可以理解,要放大的输入信号 1440 可以是 CW、QCW、脉冲(包括非常短的脉冲)、或多路复用信号(诸如波分复用(WDM)信号)中的任何类型。有利地,如所述地配置的光纤放大器可以为具有专门特性的光信号(例如,非常短的脉冲、非常低噪声的 CW 光信号、非常窄线宽的信号、以及用于多普勒激光雷达应用的 FM 调制信号,仅举几个例子)提供放大。使用包括 VCSEL 阵列的泵模块的光纤放大器提供用于放大这些类型的光信号的理想解决方案,其中保持信号的高质量 and 特殊特性是重要的。

[0091] 再生光纤激光器

[0092] 在图 15 所示的一个实施例中,通过组合光纤激光器级和光纤放大器级来提供 VCSEL 泵浦的再生光纤激光器。也称为主控振荡器脉冲放大器(MOPA)的配置对于保持短激光脉冲的脉冲质量同时放大脉冲以提供例如非常高的输出功率而言是特别有用的。特别地,在再生环路配置中设立包括芯、内包层和外包层区域的光纤增益元件 1542。再生环路包括与增益元件一起置于两个反射器 1540 和 1550 之间以提供反馈共振器的声光开关 1560。反射器可以包括但不限于在此示例性实施例中所示的光纤布拉格光栅。此示例所示的声光开关具有三个端口 1561、1562 和 1563。在声光开关的闭合状态,进入光纤增益元件的芯区域的光在端口 1561 和 1562 之间行进到高反射率光纤布拉格光栅。在声光开关的断开状态,进入端口 1561 的光被传输到端口 1563,端口 1562 被闭塞。

[0093] 包括 VCSEL 阵列的泵模块 1501 连接到反射器之一 1550 以泵浦增益元件 1542。对于此应用,泵模块在脉冲模式下操作。泵辐射通过光纤布拉格光栅 1560 的内包层区域耦合到光纤增益元件的内包层区域。泵辐射脉冲相对较长,使得光纤增益元件的芯中的大部分离子吸收泵辐射,并在由高激发态寿命确定的时段内转变到激发状态。

[0094] 脉冲源 1540 生成要放大的脉冲,为了便于论述,其将被称为“种子”激光脉冲。种子激光脉冲可以由另一激光器或产生具有所需波长和脉宽特性的短脉冲的其他类型的光源生成。种子激光脉冲通过输入端口(或输入光纤) 1571 处的循环器 1570 进入再生环路,并且通过循环器的第二端口 1572 耦合到声光开关的端口 1563。

[0095] 在操作中,在与 VCSEL 泵模块脉冲同步的指定时间,声光开关被断开,来自脉冲源的种子激光脉冲通过端口 1561 传输到光纤增益元件的芯部。紧随在种子激光脉冲经过开关之后,开关闭合。种子激光脉冲传输经过光纤增益元件的芯部,并且被增益元件的芯区域中的受激离子放大。经放大的种子激光脉冲被光纤布拉格光栅 1550 反射回到光纤增益元件的芯区域中,并且被进一步放大。已放大的种子激光脉冲由现在闭合的声光开关从端口 1561 传输到端口 1562,并且到另一光纤布拉格光栅反射器 1540。

[0096] 结果,在每一轮中,种子脉冲被如此来回反射经过光纤增益元件并且被连续放大。在适当时间,当种子激光脉冲耗尽了光纤增益元件并且到达其最大能量时,声光开关在该点断开,从而已放大的高能量种子激光脉冲可以从端口 1561 传输到端口 1563,进入将第二循环器端口 1572 连接到声光开关端口 1563 的光纤的芯部,这使得放大的种子激光脉冲能作为输出脉冲 1509 从循环器端口 1573 离开。

[0097] 根据本发明设计的光纤增益系统的一个优点是,VCSEL 泵功率可以通过使用例如星形耦合器(如本领域已知的那样)被动地耦合来自若干泵模块的泵辐射来进一步提高。然而,根据本发明配置的星形耦合器需要双包层光纤来匹配在光纤激光器或放大器的增益元件中使用的光纤。可以以模块方式使用额外的泵模块。一般而言,为了有效率地把来自一个光纤的辐射耦合到另一个光纤,同时通过熔接或者通过低损耗连接器连接双包层光纤,重要的是芯和包层区域(特别是内包层区域)的物理尺寸很好地匹配。星形耦合器可以置于反射器或隔离器之前或之后,视情况而定。

[0098] 如图 16 所示,提供了包括双包层光纤的示例性星形耦合器的一个实施例。可以使用此配置来为光纤激光器或为放大器生成较高泵功率(带有某些略微的改动),并且特别适于包括 VCSEL 发射器阵列的泵模块。由于 VCSEL 阵列模块的小形状因子,可以在相对较小的物理区域内配置高泵功率模块。对于两种应用,使用双包层光纤的高功率星形耦合器的基本设计原理是类似的。高功率星形耦合器可以以单端泵浦以及双端泵浦配置来配置。特别地,来自若干泵模块 1601 的泵光束在置于增益元件 1635 的输入端处的光耦合器 1650 中组合。光纤组合器被设计成将来自每个输入光纤 1619 (只标记了一个)的相应内包层的泵光束耦合到耦合器的输出光纤 1634 的内包层中。

[0099] 在图 16 所示的光纤激光器配置的情况下,可以将耦合器置于反射器 1640 之前,并且在指定端口连接到耦合器,使得只有激光信号传播通过该端口的芯区域。耦合器的输出被设计成具有与增益元件双包层光纤基本类似的尺寸。来自多个 VCSEL 泵模块的组合泵光束直接传输到增益光纤的内包层,而激光发射被限制在增益元件的芯区域中。在一种替选布置中,可以将光纤反射器置于耦合器之后,将光纤反射器的输出端口与增益元件进行匹

配。此外,在光纤激光器只从一端被泵浦的配置中,增益元件的另一端直接连接到第二反射器 1646。

[0100] 然而,为了更高的输出功率,可以从增益元件的另一端以光学方式泵浦激光器,也如图 16 所示。基本上类似于耦合器 1650 的第二耦合器 1651 连接在增益元件和第二反射器之间。一个或多个光学泵模块也连接到增益元件的此端。耦合器被设计成具有专用于连接反射器的光纤,来自反射器的输出光纤 1636 传播激光输出。在两种布置中,组合器 1651 的输入光纤之一具有直接连接到耦合器输出光纤 1636 的芯的芯区域。可以任选地使用包括光纤和透镜的光纤准直器 1652 来通过透镜将发散光束准直成自由空间平行光束。

[0101] 图 16 所示的布置带有少量修改也适用于为光纤放大器应用添加 VCSEL 泵模块。在此实施例中,光纤反射器 1640 和 1646 被隔离器替代。类似于光纤激光器配置,可以将隔离器置于耦合器 1650 和 1651 之前或之后,耦合器端口可以相应地设计成适当地匹配增益元件。本领域技术人员可以理解,与常规光学泵相比,甚至与那些包括单 VCSEL 器件或 VCSEL 器件的线性阵列的光学泵相比,可以相对轻松地并且用附加成本以模块方式提高泵功率。

[0102] 本发明还可以实施于如下各项所述的实施例中。

[0103] 1、一种光纤泵模块,包括:

[0104] 光学发射器,包括一个或多个 VCSEL 器件,所述光学发射器被支承在可移动的散热安装台上,

[0105] 一个或多个光学组件,以及

[0106] 聚焦器件,其中所述一个或多个光学组件以及所述聚焦器件每个都支承在相应的可移动安装台上,从而将所述一个或多个光学组件以及所述聚焦装置与所述光学发射器共轴地对准以用于生成聚焦光束;以及

[0107] 光纤,固定在可移动光纤对准壳体中,使得固定在所述对准壳体中的所述光纤的输入端与所述聚焦光束共轴对准,从而在所述光纤的输出端生成输出泵光束。

[0108] 2、如项目 1 所述的光纤泵模块,其中,所述一个或多个 VCSEL 器件包括两反射器 VCSEL 器件或三反射器 VCSEL 器件。

[0109] 3、如项目 1 所述的光纤泵模块,还包括以线性或二维平面阵列布置的多个 VCSEL 器件。

[0110] 4、如项目 1 所述的光纤泵模块,还包括一个或多个微透镜,与所述一个或多个 VCSEL 器件中对应的一个基本对准,使得集体发射是准直输出光束。

[0111] 5、如项目 1 所述的光纤泵模块,还包括:

[0112] 外部壳体,所述壳体具有与所述光学发射器热接触的导热基板,其中所述光学发射器、所述一个或多个光学组件、所述聚焦器件以及所述光纤对准壳体共轴地固定在所述基板上;以及

[0113] 外部隆起罩,所述罩封围所述基板上的所述光纤泵模块,其中所述罩还包括在一端的光纤对准引导件和弯曲半径限制器以支承和固定离开所述外部壳体的所述光纤,其中所述外部壳体适用于与所述基板热接触地安置的使用循环流体的外部冷却器件。

[0114] 6、如项目 1 所述的光纤泵模块,其中,所述光纤是单包层光纤,其中来自所述发射器的光学输出辐射耦合到所述光纤的芯部。

[0115] 7、如项目 1 所述的光纤泵模块,其中,所述光纤是双包层光纤,来自所述发射器的

光学发射被耦合到芯、内包层、或它们的组合。

[0116] 8、如项目 1 所述的光纤泵模块,其中,所述聚焦器件包括透镜、光锥组件、或它们的组合。

[0117] 9、一种光纤增益系统,包括:

[0118] 光学泵模块,包括:

[0119] 光学发射器,包括一个或多个 VCSEL 器件,所述光学发射器被支承在可移动散热安装台上,

[0120] 一个或多个光学组件,以及

[0121] 聚焦器件,其中所述一个或多个光学组件以及所述聚焦器件每个都支承在相应的可移动安装台上,从而将所述一个或多个光学组件以及所述聚焦器件与所述光学发射器共轴地对准以用于生成聚焦光束;以及

[0122] 光纤,固定在可移动光纤对准壳体中,使得固定在所述对准壳体中的所述光纤的输入端与所述聚焦光束共轴对准,以在所述光纤的输出端生成输出泵光束;以及

[0123] 光纤增益元件,具有输入端和输出端,其中所述增益元件的输入端连接到所述光纤的输出端,以将所述泵光束耦合到所述增益元件光纤。

[0124] 10、如项目 9 所述的光纤增益系统,其中,所述一个或多个 VCSEL 器件包括两反射器 VCSEL 器件或三反射器 VCSEL 器件。

[0125] 11、如项目 9 所述的光纤增益系统,包括以线性或二维平面阵列布置的多个 VCSEL 器件。

[0126] 12、如项目 9 所述的光纤增益系统,其中,所述光学泵模块还包括一个或多个微透镜,其与所述一个或多个 VCSEL 器件中对应的一个基本对准,使得集体发射是准直泵光束。

[0127] 13、如项目 9 所述的光纤增益系统,还包括:

[0128] 外部壳体,所述壳体具有与所述光学发射器热接触的导热基板,其中所述光学发射器、所述一个或多个光学组件、所述聚焦器件以及所述光纤对准壳体共轴地固定在所述基板上;以及

[0129] 外部隆起罩,所述罩封围所述基板上的所述光纤泵模块,其中所述罩还包括在一端的光纤对准引导件和弯曲半径限制器以支承和固定离开所述外部壳体的所述光纤,其中所述外部壳体适用于与所述基板热接触地安置的使用循环流体的外部冷却器件。

[0130] 14、如项目 9 所述的光纤增益系统,其中,所述输出光纤是单包层光纤,其中来自所述发射器的光学输出辐射被耦合到所述光纤的芯。

[0131] 15、如项目 9 所述的光纤增益系统,其中,所述光纤是双包层光纤,来自所述发射器的光学输出辐射被耦合到芯、内包层、或它们的组合。

[0132] 16、如项目 9 所述的光纤增益系统,其中,所述聚焦器件包括透镜或光锥组件。

[0133] 17、如项目 9 所述的光纤增益系统,其中,所述增益元件的芯被掺杂有吸收所述泵辐射的离子。

[0134] 18、如项目 9 所述的光纤增益系统,其中,所述增益元件包括单包层或双包层光纤,其中泵辐射被耦合到所述增益元件光纤的芯。

[0135] 19、如项目 9 所述的光纤增益系统,其中,所述增益元件包括双包层光纤,其中泵辐射在芯、内包层、或它们的组合中被耦合到所述增益元件光纤。

[0136] 20、如项目 9 所述的光纤增益系统,其中,所述增益元件的输出端处的辐射利用置于预定距离处的外部光学器件被准直。

[0137] 21、如项目 9 所述的光纤增益系统,还包括至少两个反射器,其中,第一反射器置于所述泵模块和所述增益元件光纤之间,具有比所述第一反射器的反射率实质上更低的反射率的第二反射器置于所述增益元件的输出端以外,使得设置在所述第一反射器和第二反射器之间的所述增益元件操作为光纤激光器。

[0138] 22、如项目 21 所述的光纤激光器,其中,所述第一反射器和第二反射器是分别具有高反射率芯和低反射率芯的光纤布拉格光栅。

[0139] 23、如项目 22 所述的光纤激光器,其中,所述第一反射器和第二反射器构造在双包层光纤的芯区域中。

[0140] 24、如项目 21 所述的光纤激光器,其中,所述增益元件包括双包层光纤,其中所述泵模块辐射耦合到所述增益元件的内包层,激光动作发生在所述增益元件的芯中,激光输出传播通过所述增益元件的芯。

[0141] 25、如项目 21 所述的光纤激光器,其中,所述增益元件的劈开输出端形成所述第二反射器。

[0142] 26、如项目 25 所述的光纤激光器,还包括附加的一个或多个光学泵模块,其具有一个或多个 VCSEL 器件,所述光学泵定位于所述增益元件的劈开末端周围,从所述劈开末端以光学方式泵浦所述增益元件,其中包括一个以上 VCSEL 器件的所述附加的光学泵模块具有以线性或二维阵列布置的所述一个或多个 VCSEL 器件。

[0143] 27、如项目 25 所述的光纤激光器,还包括在所述劈开末端准直来自附加的一个或多个光学泵的泵辐射的聚焦器件。

[0144] 28、如项目 21 所述的光纤激光器,还包括一个或多个隔离器,其中至少一个隔离器跟随在所述第二反射器之后。

[0145] 29、如项目 21 所述的光纤激光器,还包括输出耦合器,用于将所述激光输出与所述泵光束隔离开,并且在所述输出耦合器的输出光纤的芯中传输所述激光输出。

[0146] 30、如项目 21 所述的光纤激光器,还包括开关器件,其设置在所述增益元件和所述第二反射器之间,使得所述光纤激光器以与以脉冲模式操作所述泵模块的信号发生器同步的 Q 开关模式操作。

[0147] 31、如项目 30 所述的光纤激光器,其中,所述开关器件包括可饱和吸收器光纤组件、光纤耦合声光开关、或受激布里渊散射 SBS 非线性光纤组件。

[0148] 32、如项目 9 所述的光纤增益系统,还包括具有输入端和输出端的输入光学耦合器,所述输入光学耦合器将输入信号组合到所述泵辐射,以配置所述增益系统用于放大所述输入信号。

[0149] 33、如项目 32 所述的光纤放大器,其中

[0150] 所述输入光学耦合器包括具有芯、内包层和外包层的双包层光纤,并且具有输入端和输出端,且

[0151] 所述泵光束和所述信号在所述耦合器的输入端分别耦合到所述耦合器的内包层和芯,使得所述泵光束和所述信号分别耦合到所述增益元件的内包层区域和芯。

[0152] 34、如项目 32 所述的光纤放大器,还包括输出耦合器,其中,所述输出耦合器将已

放大信号与所述泵光束分离,并且在所述输出耦合器的输出光纤的芯中传输所述已放大信号。

[0153] 35、如项目 32 所述的光纤放大器,还包括一个或多个隔离器,其中,至少一个隔离器在所述增益元件之前,至少一个隔离器跟随在所述增益元件之后,其中跟随在所述增益元件之后的所述至少一个隔离器的输出端形成所述光纤放大器的输出端口。

[0154] 36、如项目 35 所述的光纤放大器,其中,所述一个或多个隔离器包括双包层光纤,所述双包层光纤的芯和内包层匹配所述增益元件的芯和内包层。

[0155] 37、如项目 9 所述的光纤增益系统,还包括至少一个附加泵模块,其包括一个或多个 VCSEL 器件,其中来自所述泵模块和所述至少一个附加泵模块的泵光束在具有一个输出光纤和多个输入光纤的双包层光纤组合器中组合,其中至少一个输入光纤的芯区域连接到所述组合器的输出光纤的芯区域,使得在每个输入光纤的内包层中传播的泵光束被组合以在所述输出光纤的内包层和芯区域中传播。

[0156] 38、如项目 37 所述的光纤增益系统,其中,所述至少一个附加泵模块中的一个或多个 VCSEL 器件以线性或二维阵列布置。

[0157] 39、一种再生光纤放大器系统,包括:

[0158] 光学信号脉冲源;

[0159] 循环器,具有至少三个端口,其中,所述信号源连接到所述循环器的第一端口;

[0160] 声光开关,包括至少三个端口,其中,所述声光开关的一个端口连接到所述循环器的第二端口以从所述信号脉冲源接收信号;

[0161] 第一反射器和第二反射器,其中,所述第一反射器的反射率实质上高于所述第二反射器的反射率;

[0162] 光纤增益元件,其中,所述增益元件的一端连接到所述第一反射器的一端,所述增益元件的第二端连接到所述声光开关的也连接到所述第二反射器的一端的第二端口,由此在经由所述声光开关包围所述增益元件的所述第一反射器和第二反射器之间形成再生共振腔;

[0163] 光纤泵模块,包括一个或多个 VCSEL 器件以及传输在所述泵模块中生成的泵光束的输出光纤,其中,所述输出光纤连接到所述第一反射器从而把来自所述泵模块的泵光束跨所述第一反射器传输到所述增益元件;

[0164] 其中,在与所述泵模块的脉冲操作同步地闭合所述声光开关时,所述泵光束再循环,直到所述再生共振腔中的信号放大到饱和极限,随后在断开所述声光开关时,已放大信号脉冲从所述增益元件经由所述声光开关传输到所述循环器的第三端口。

[0165] 40、如项目 39 所述的光纤放大器系统,其中,所述一个或多个 VCSEL 器件以线性或二维阵列布置。

[0166] 41、如项目 39 所述的光纤放大器系统,其中,所述第一反射器和所述第二反射器分别是具有高反射率芯和低反射率芯的光纤布拉格光栅。

[0167] 42、如项目 41 所述的光纤放大器系统,其中,所述第一反射器和所述第二反射器构建在双包层光纤的芯区域中。

[0168] 43、如项目 39 所述的光纤放大器系统,其中,所述光纤泵模块还包括:

[0169] 位于所述一个或多个 VCSEL 器件附近的用于准直来自所述 VCSEL 器件的发射的一

个或多个光学组件；

[0170] 位于所述一个或多个光学组件附近的聚焦器件，用于聚焦来自所述一个或多个 VCSEL 器件的准直光束，使得聚焦泵光束与所述输出光纤共轴对准，以在所述泵模块的输出端产生聚焦泵光束。

[0171] 44、如项目 43 所述的光纤放大器系统，其中，一个或多个光学组件包括一个或多个微透镜，其与所述一个或多个 VCSEL 器件中对应的一个基本对准，使得集体发射是准直泵光束。

[0172] 45、如项目 43 所述的光纤放大器系统，其中，所述聚焦器件包括透镜或锥形光学组件。

[0173] 46、如项目 39 所述的光纤放大器系统，其中，所述输出光纤是双包层光纤，来自所述发射器的泵辐射被耦合到芯、内包层、或它们的组合。

[0174] 虽然特别参考 VCSEL 和 VCSEL 阵列泵模块为不同应用配置光纤增益系统的优选实施例描述了本发明，但是这些具体示例仅用于示出其中可以使用根据本发明的高功率泵模块的系统。本发明中所描述的泵模块可以用于其他光纤增益系统中。这里所描述的泵模块示出了指定形状的规则二维 VCSEL 阵列。然而，可以使用单个高功率 VCSEL，线性阵列或二维阵列（包括不同形状的阵列），或一维或二维 VCSEL 阵列的阵列来配置以不同形状进行发射的泵模块，这取决于特定光纤激光器泵浦应用的要求。将对本领域技术人员变得显而易见的这些组合和子组合的变体和修改被包括在所附权利要求书中定义的本发明的广义框架内。

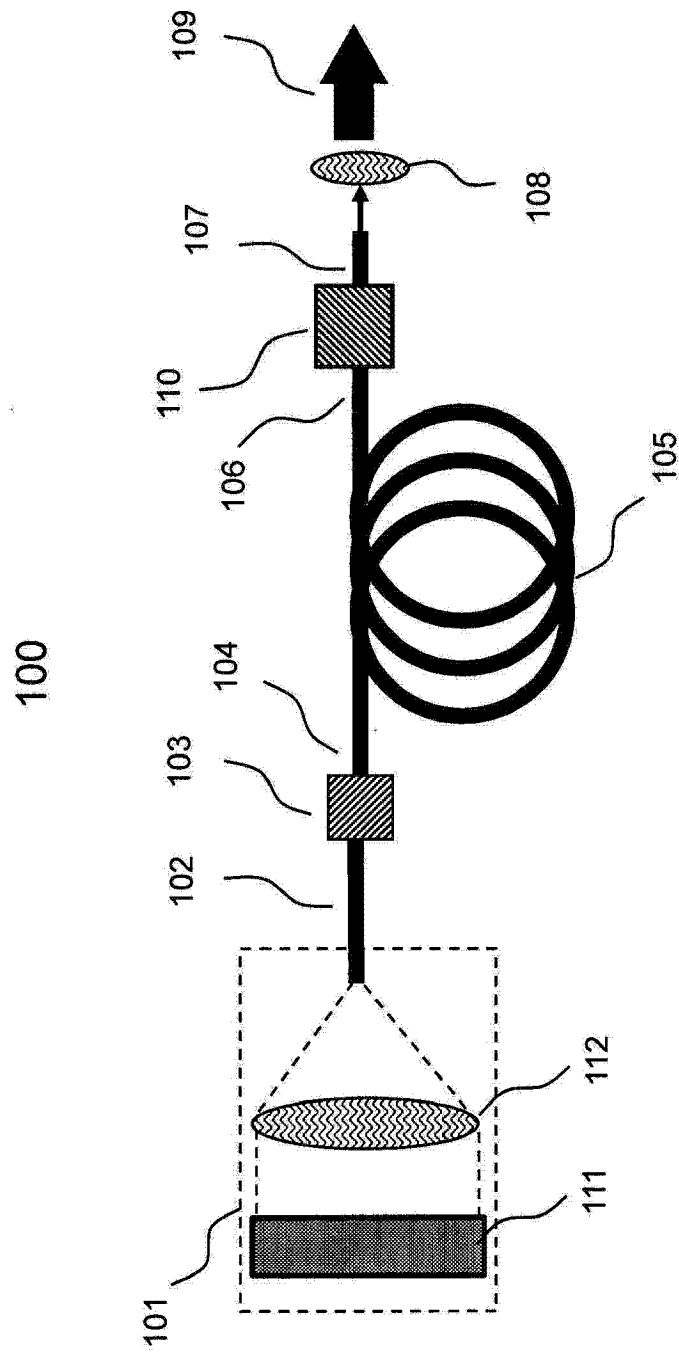


图 1

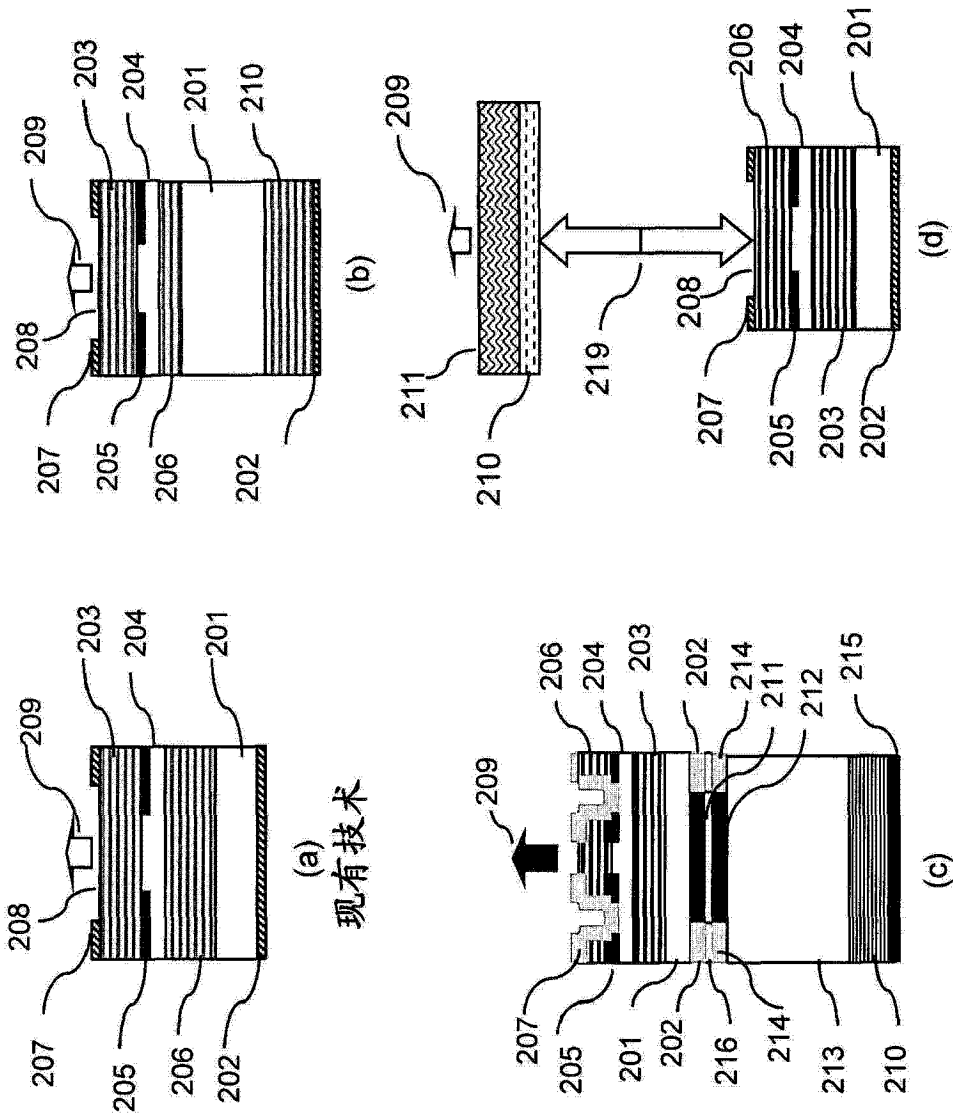


图 2

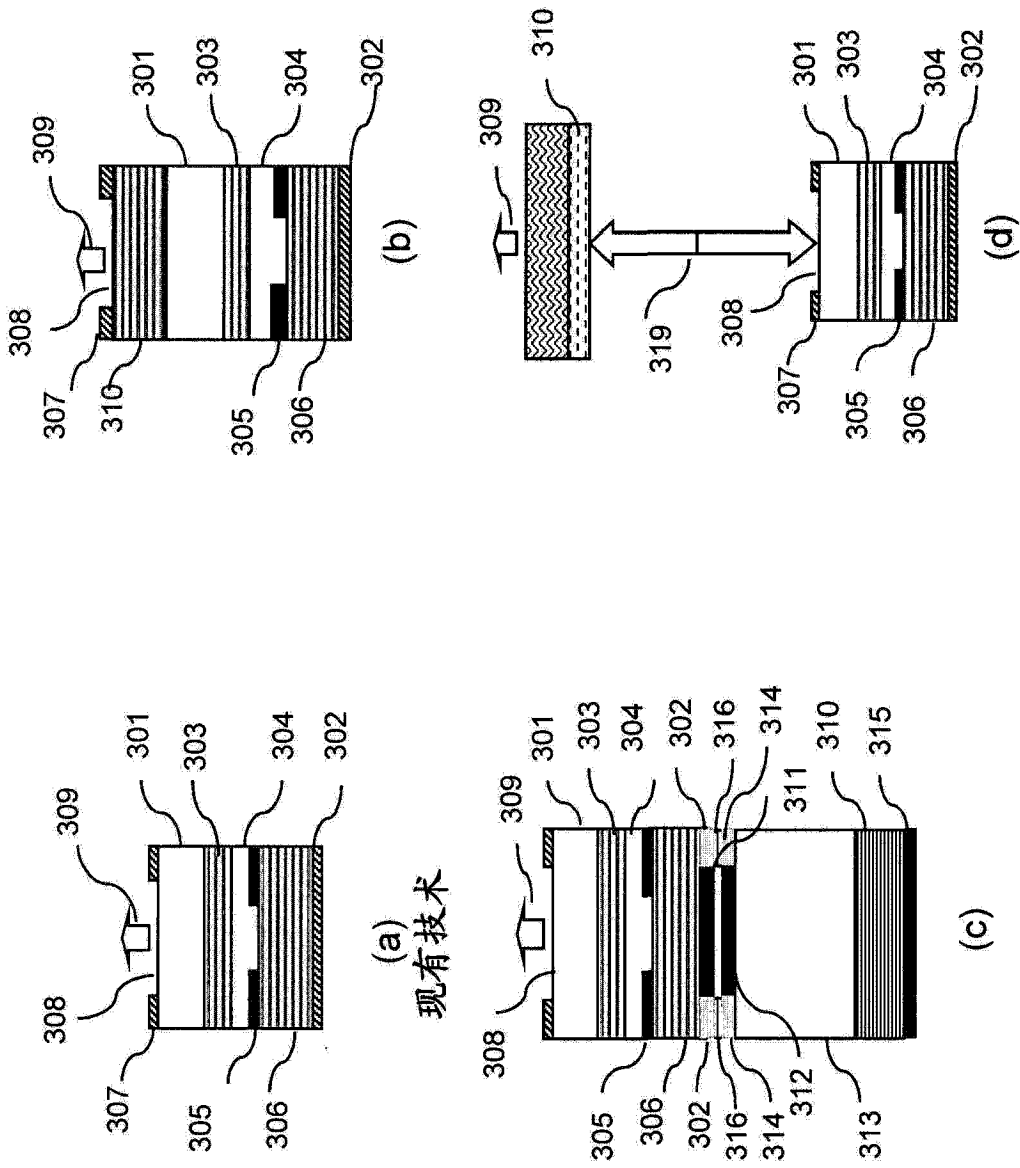


图 3

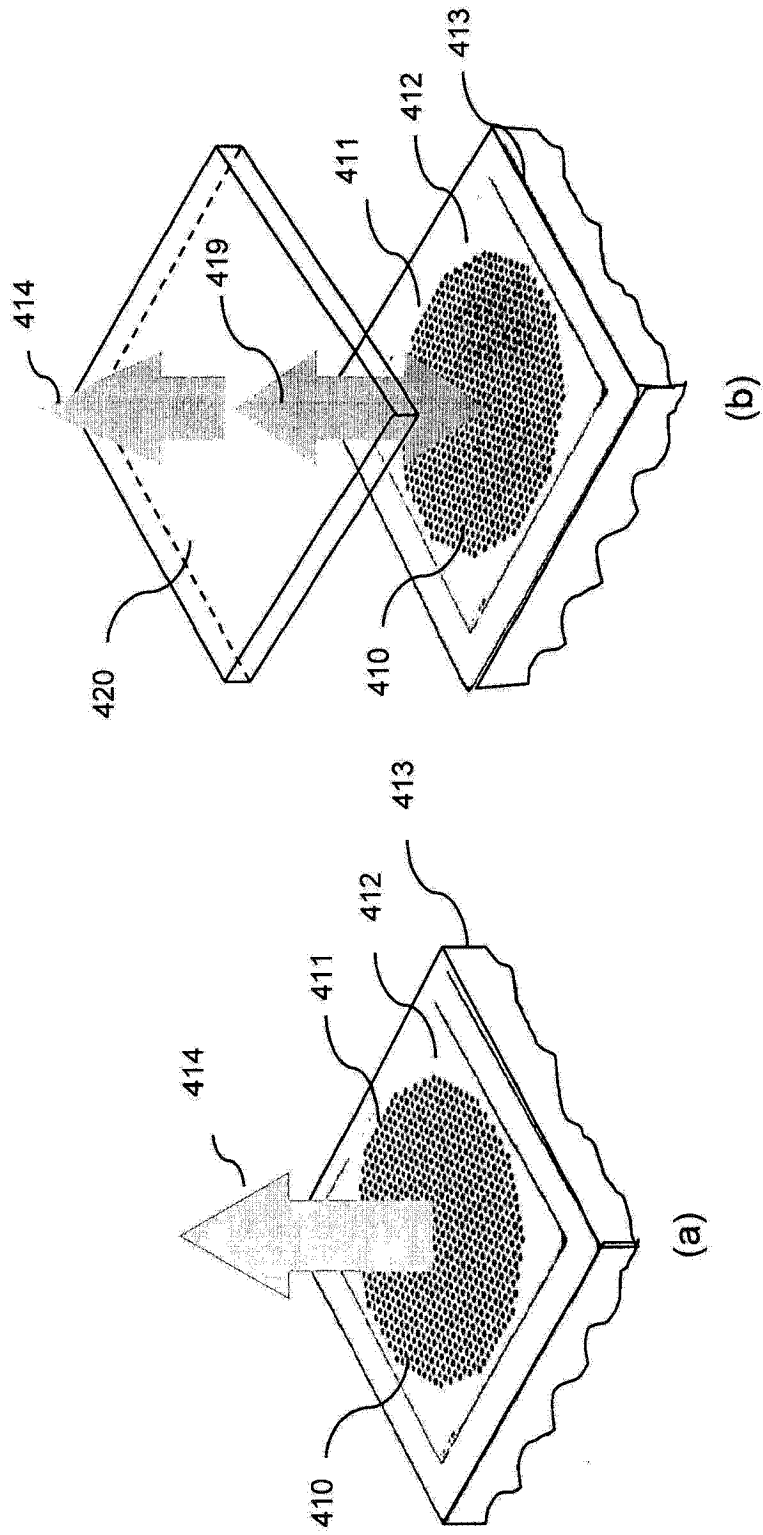


图 4

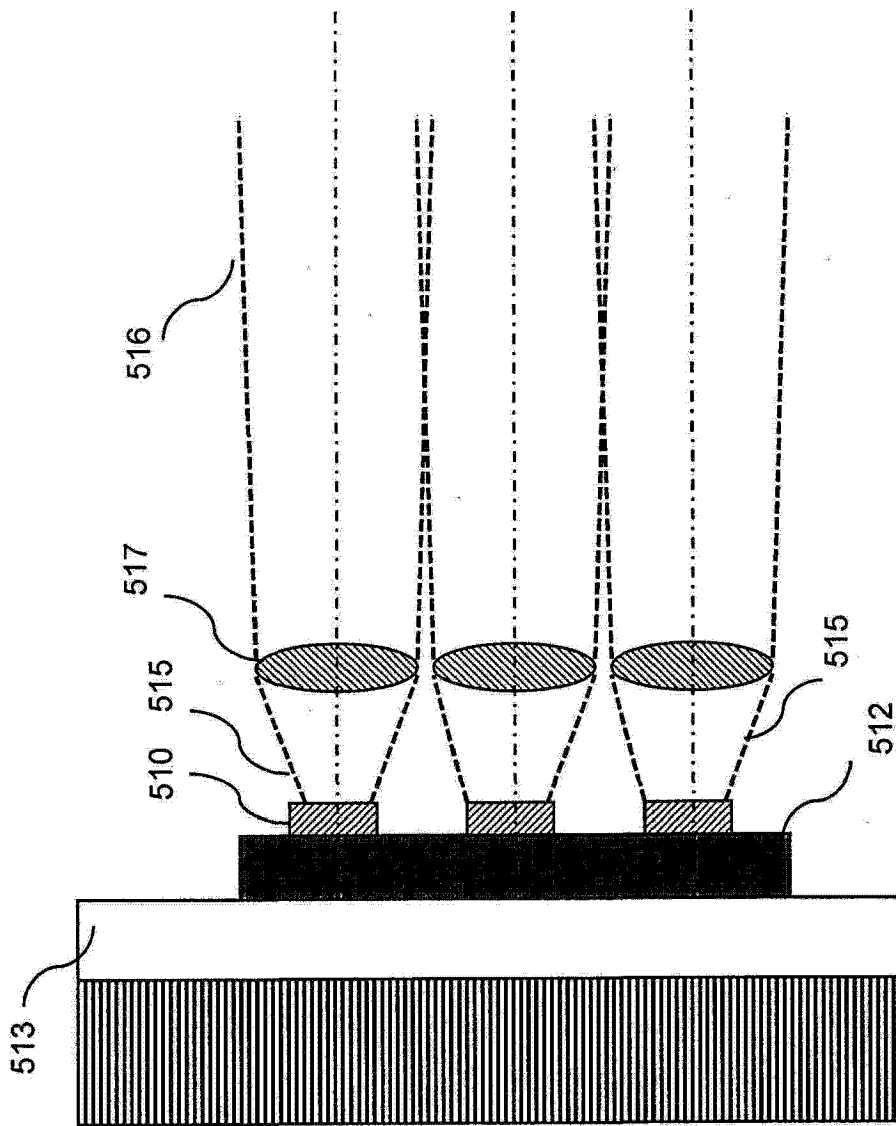


图 5

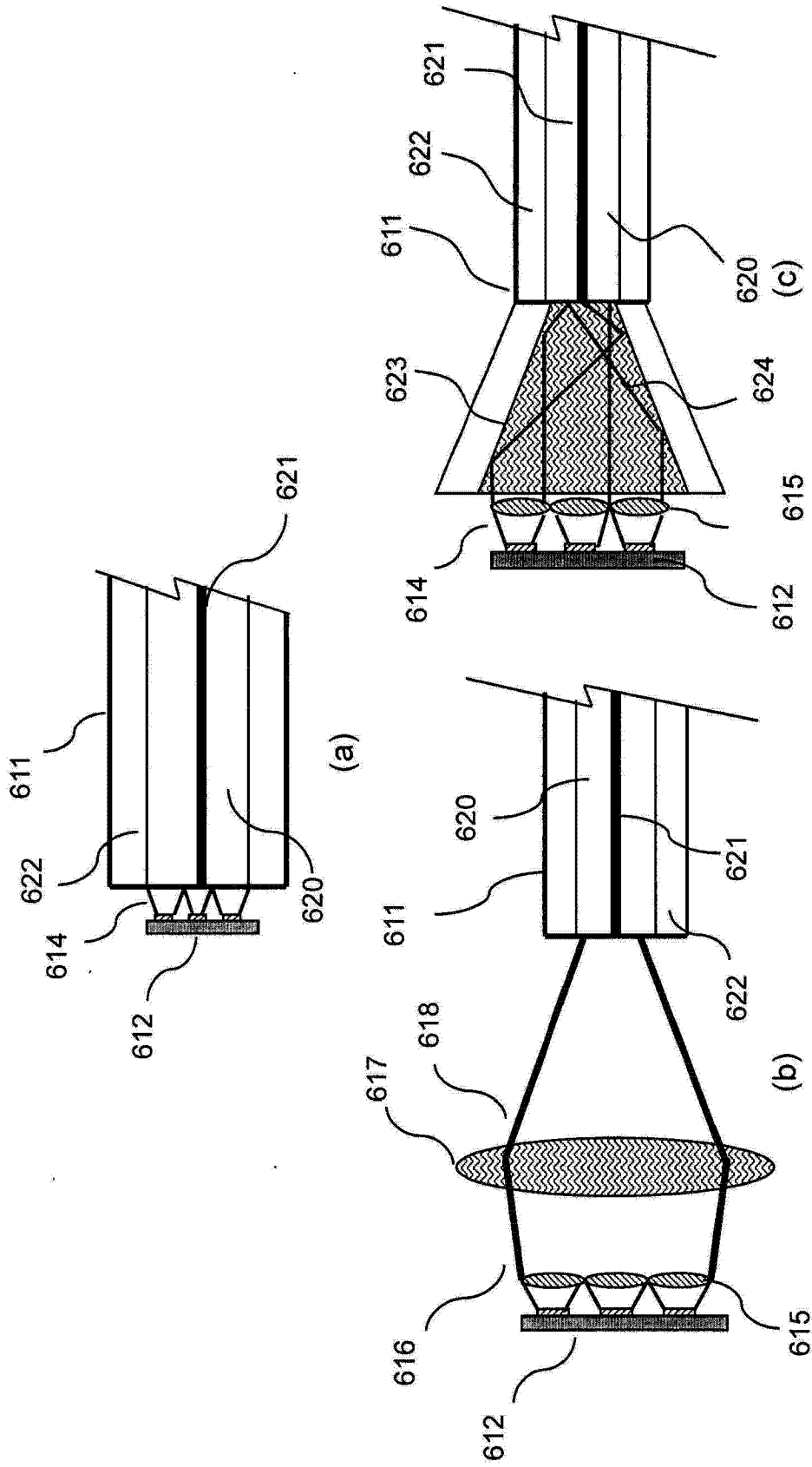


图 6

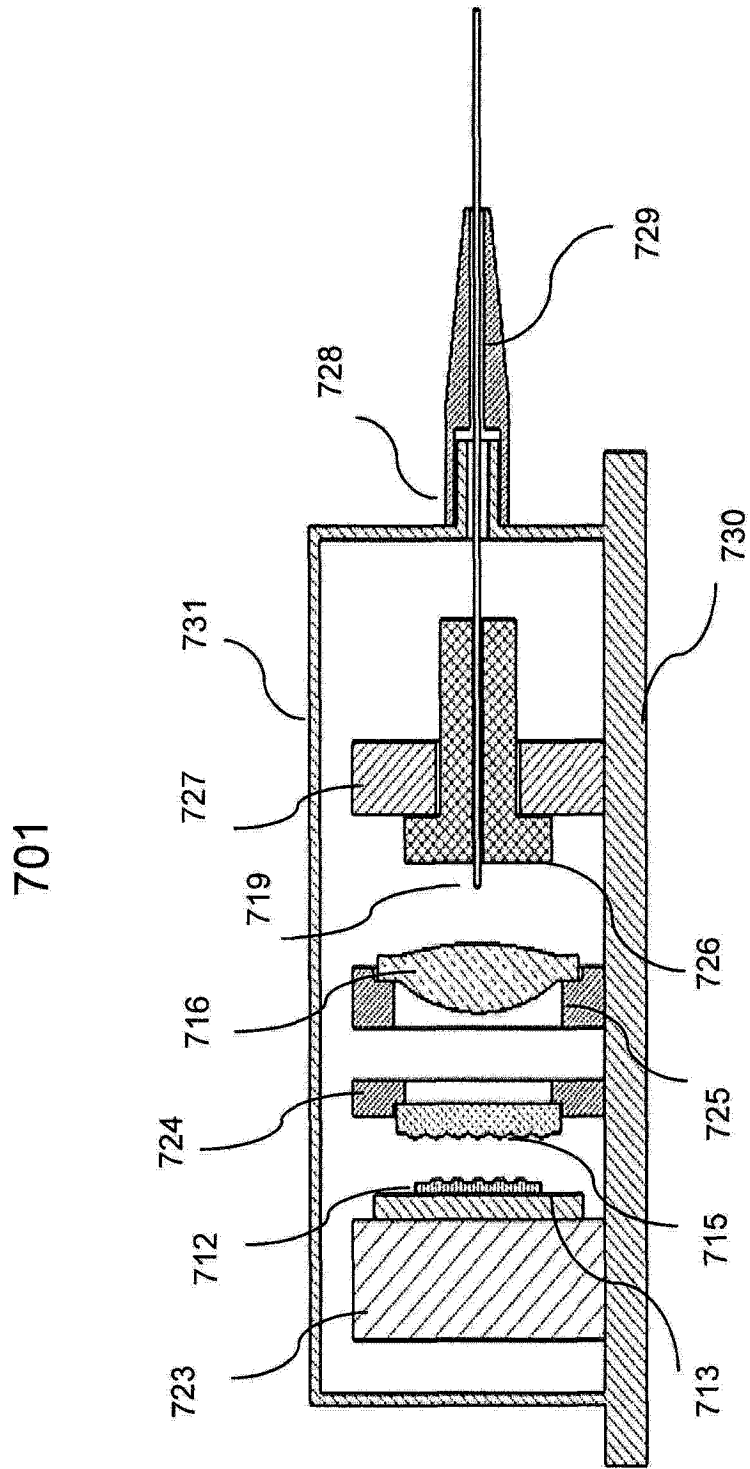


图 7

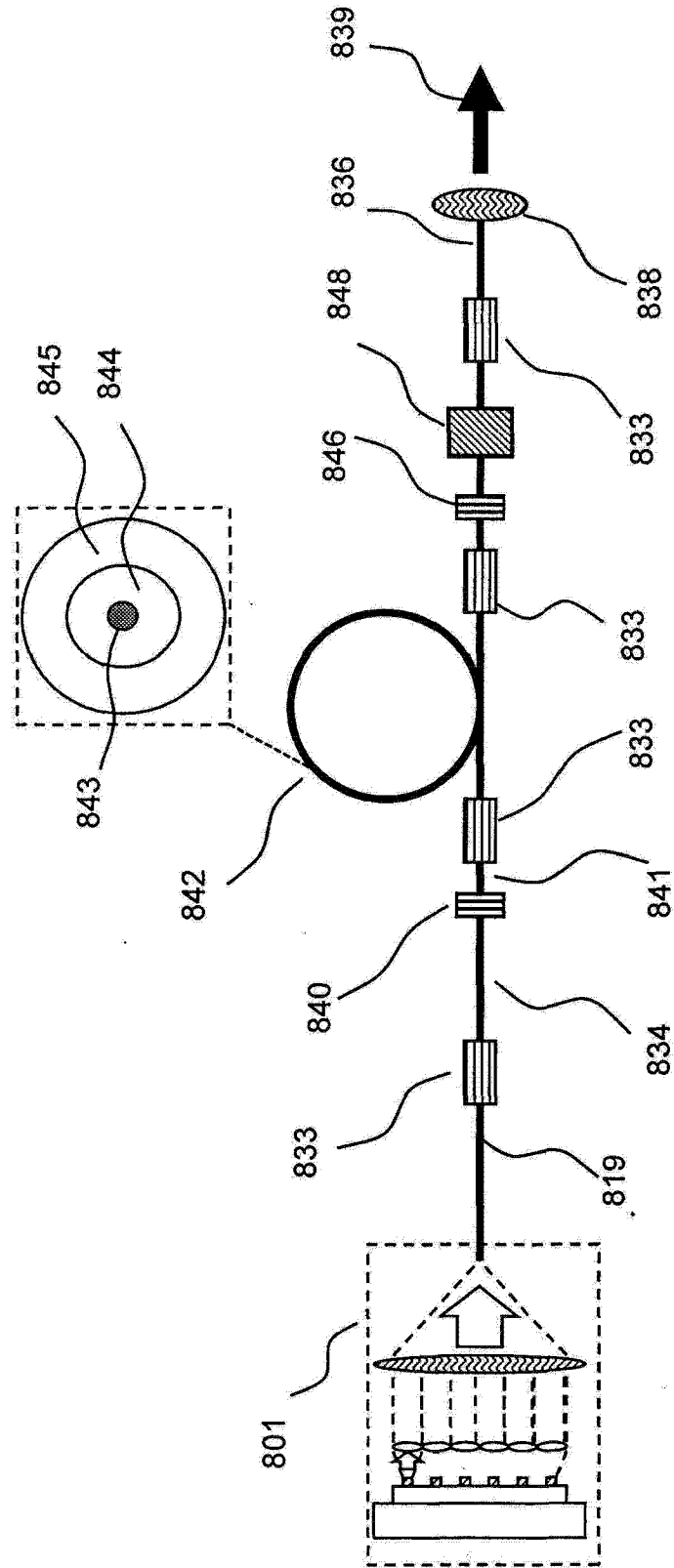


图 8

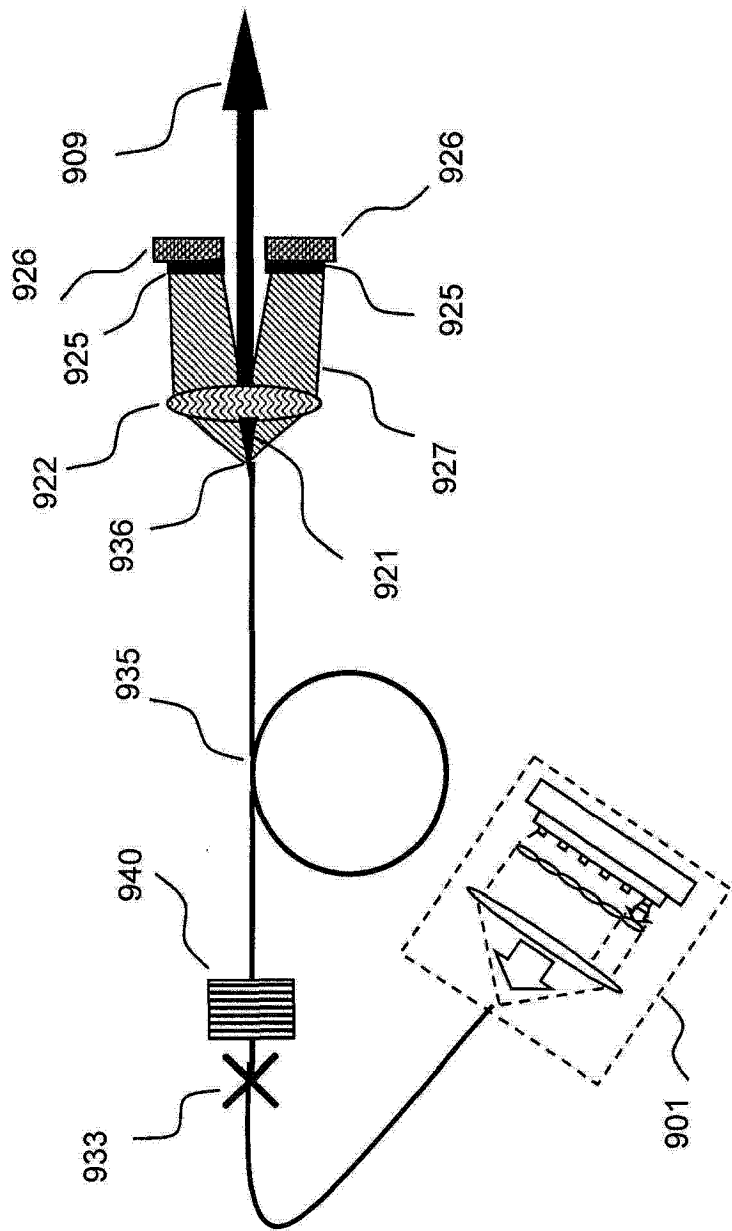


图 9

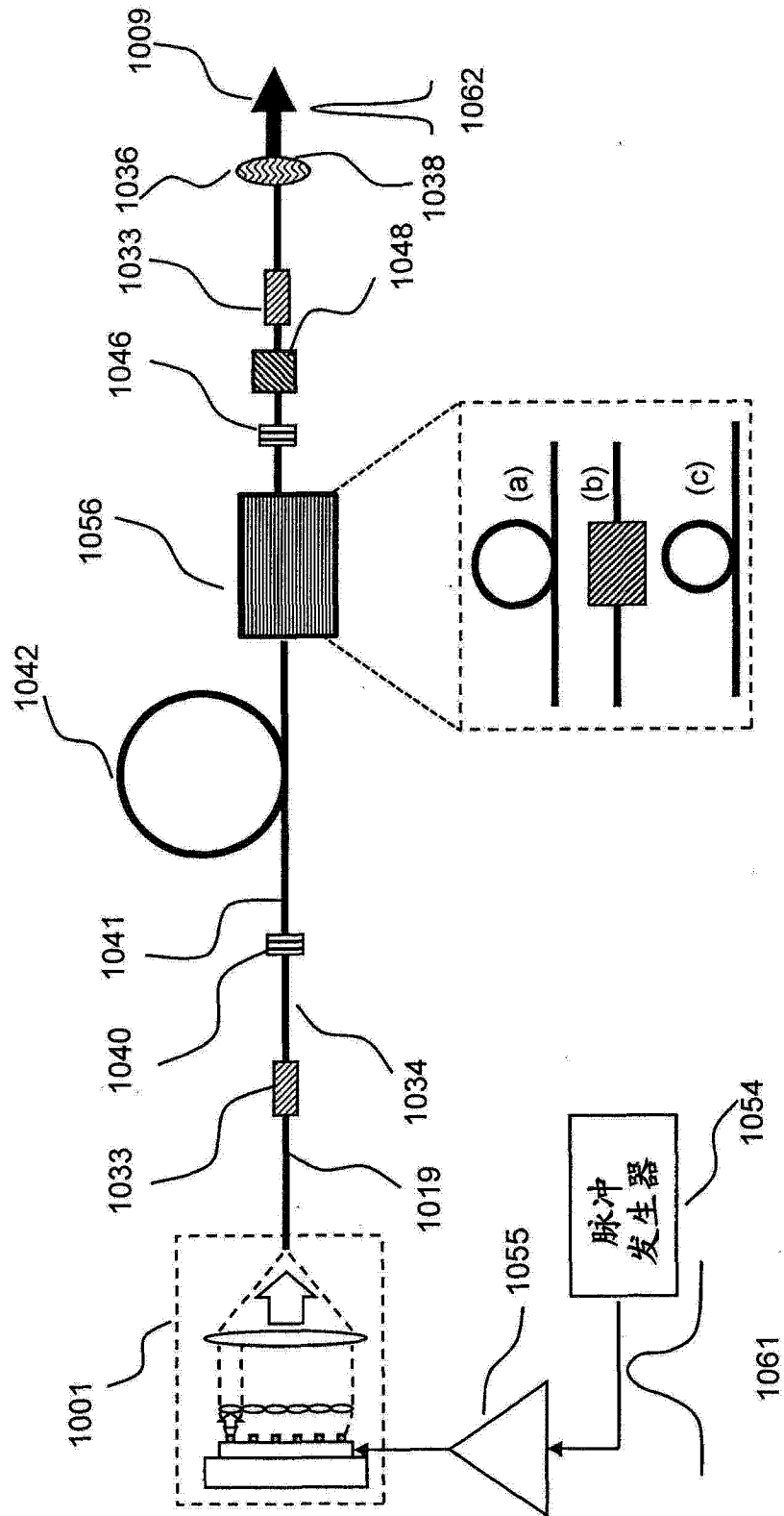


图 10

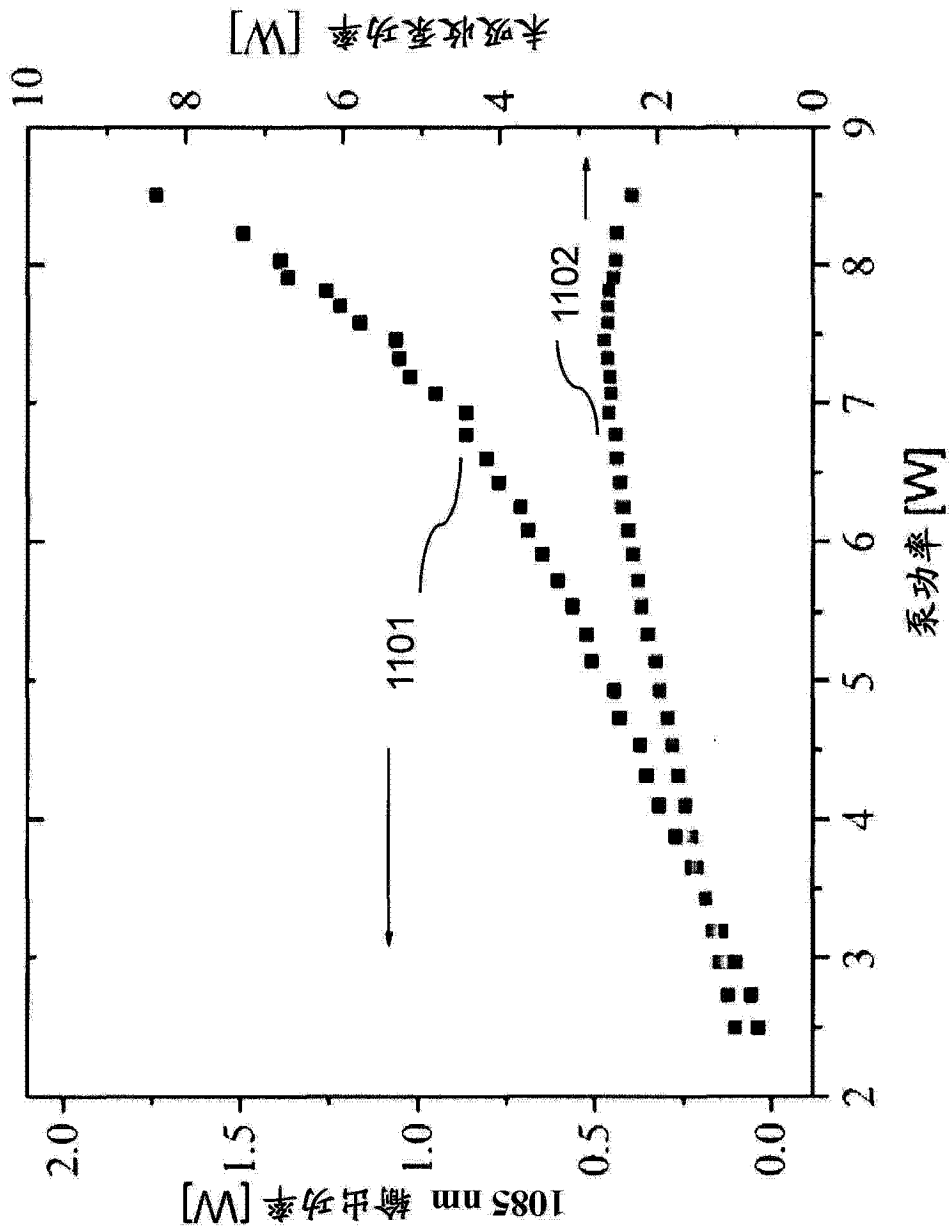


图 11

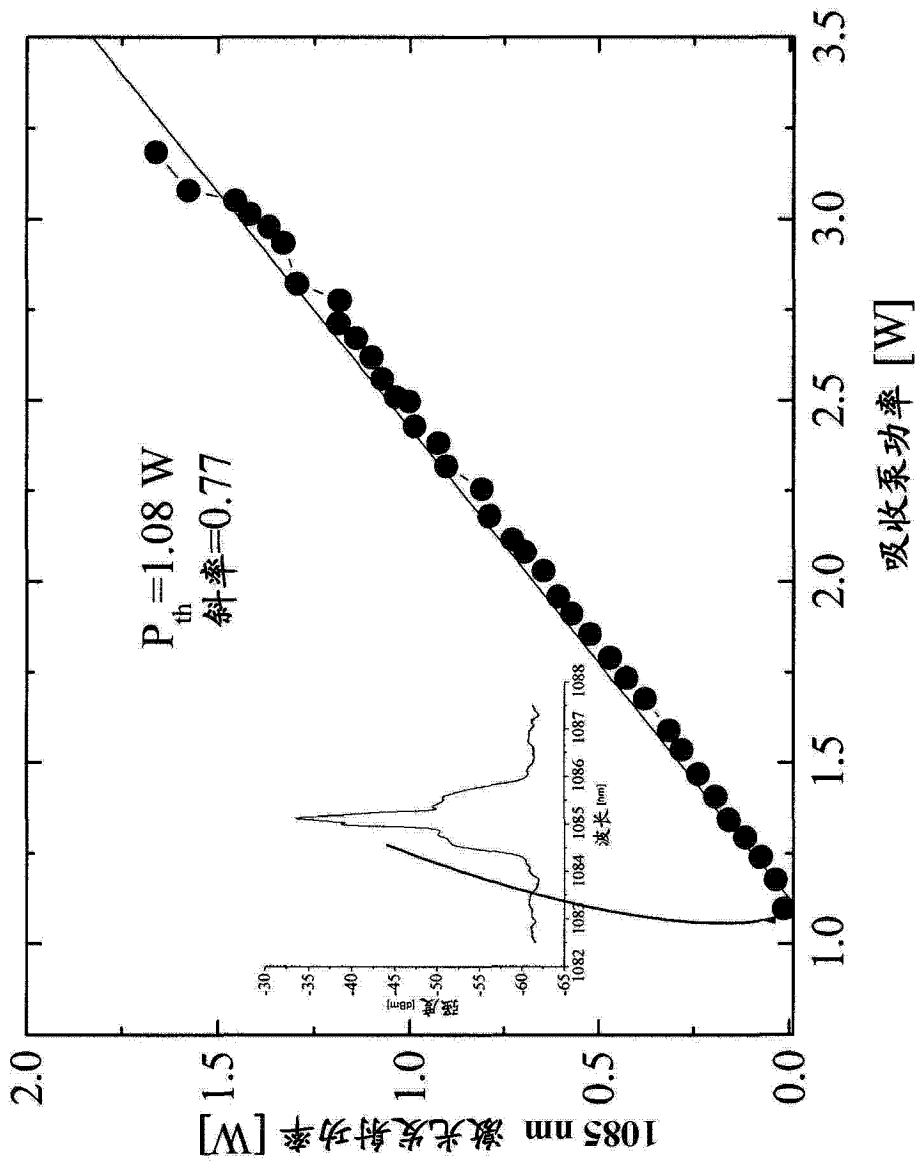


图 12

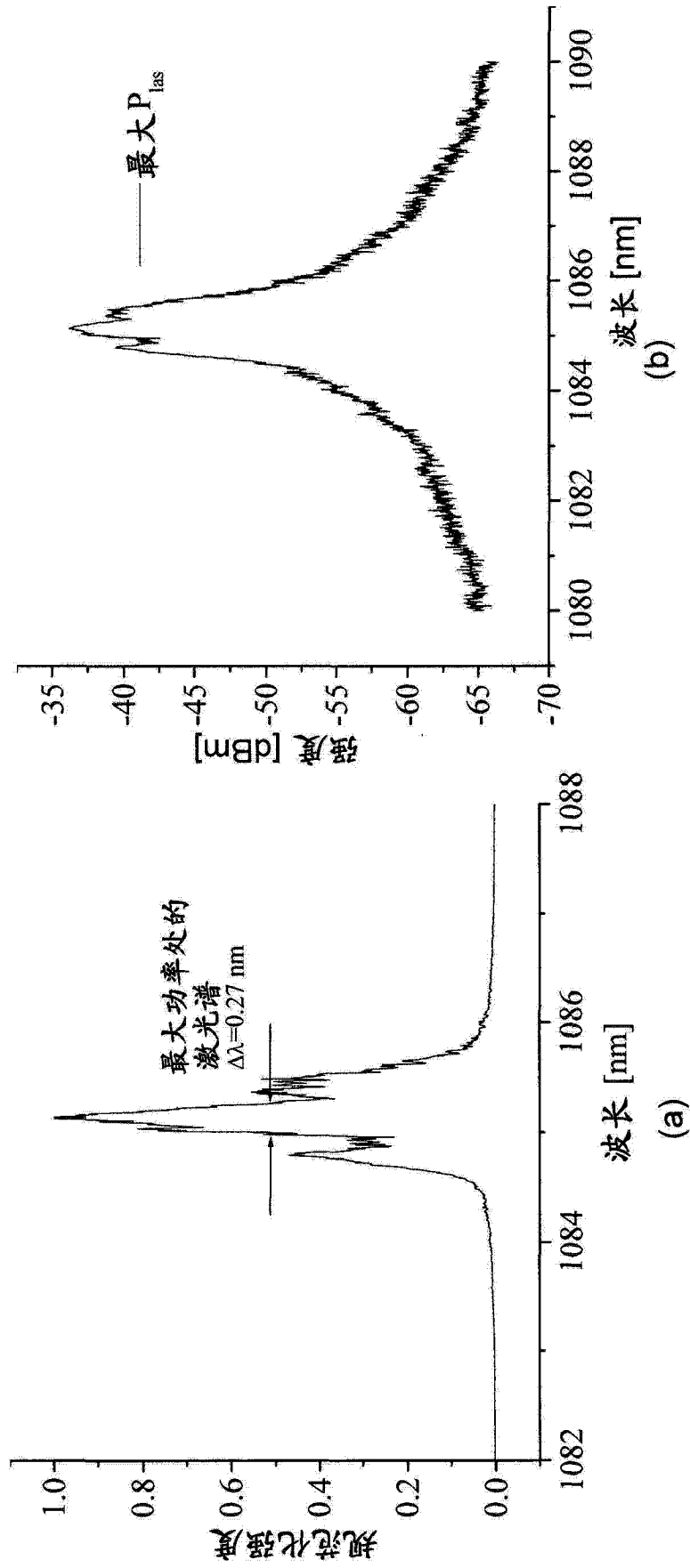


图 13

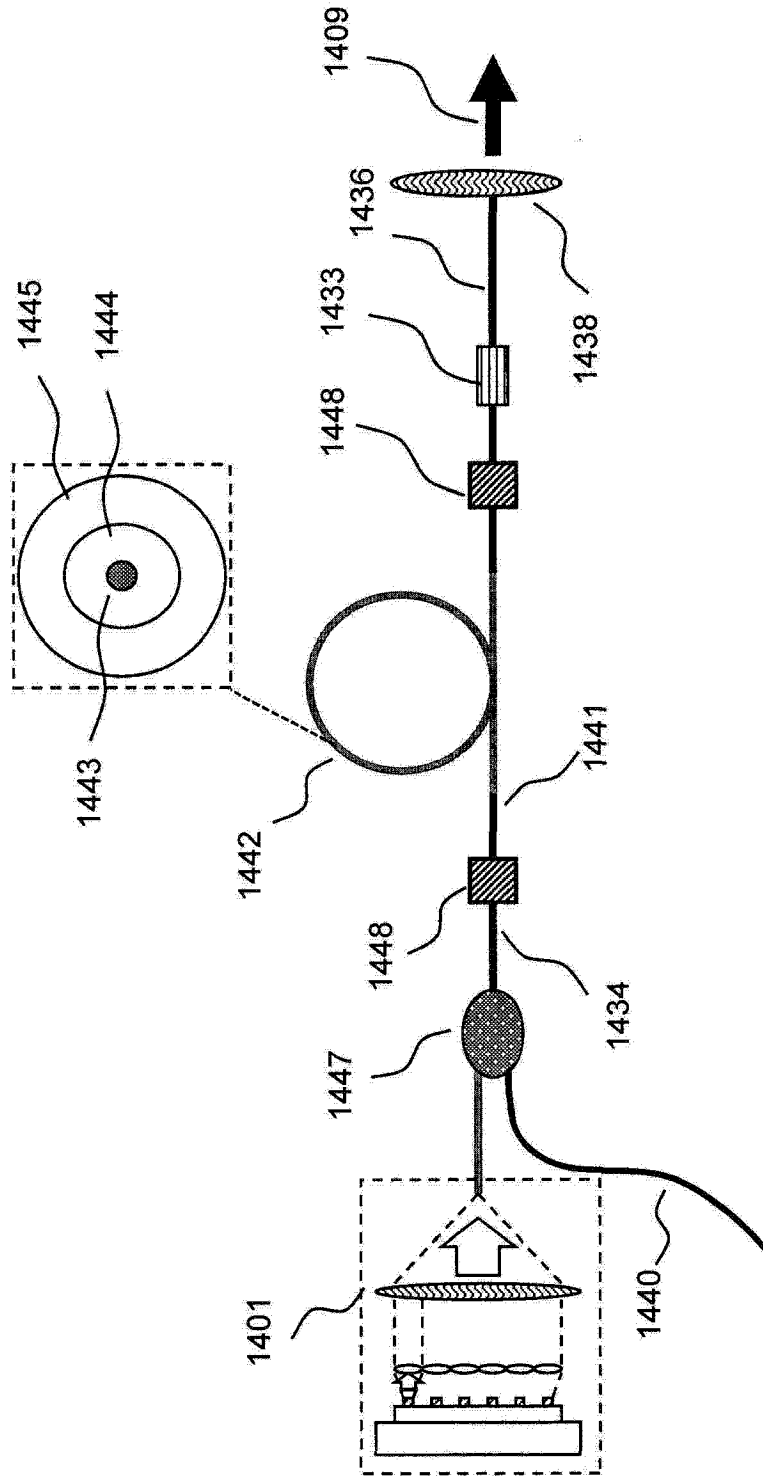


图 14

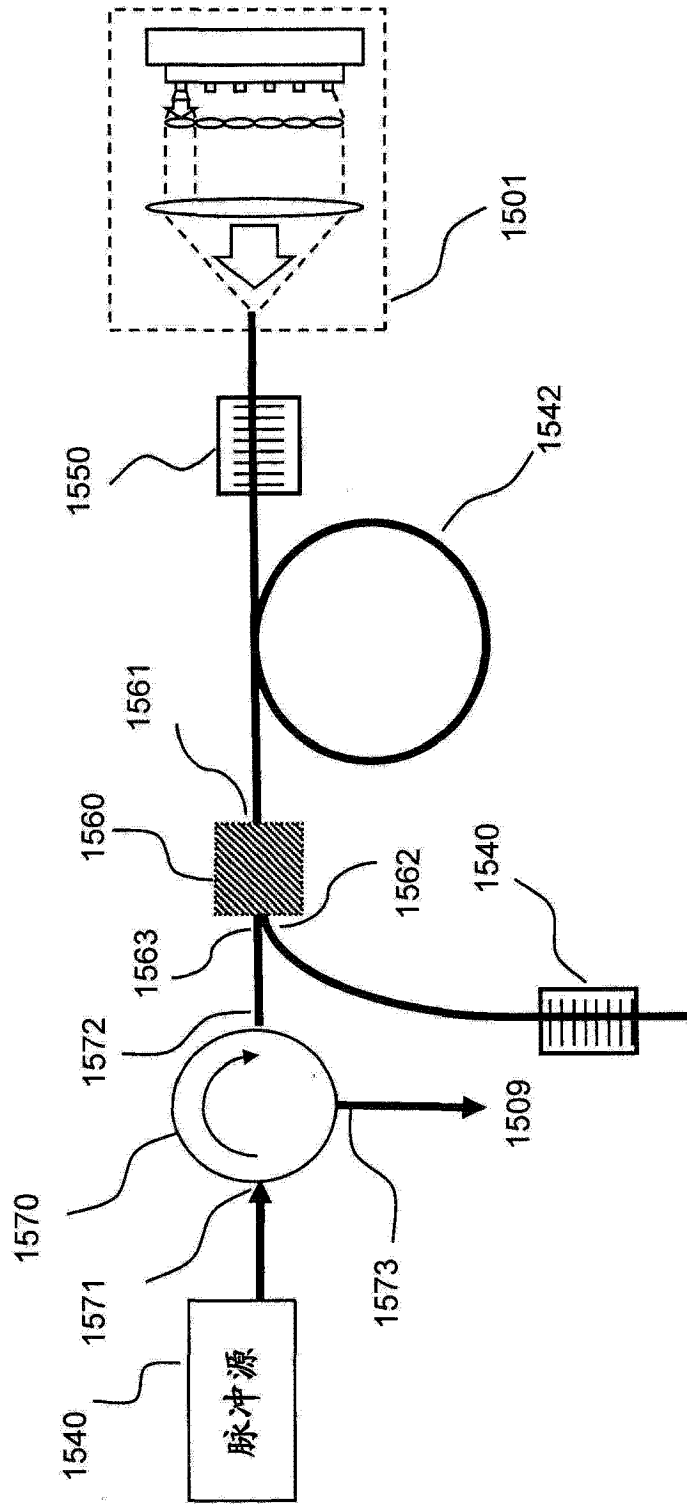


图 15

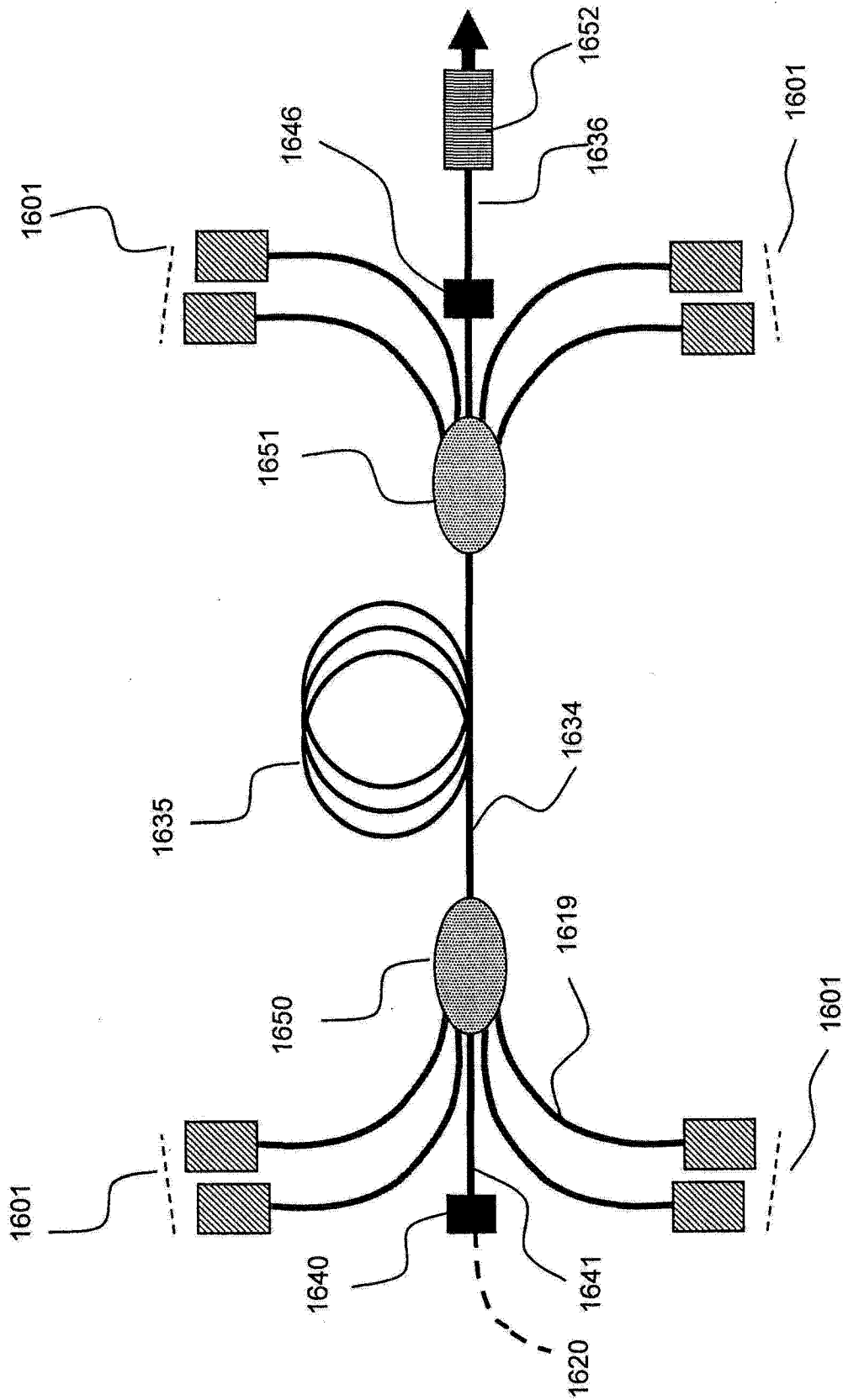


图 16