



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102239434 B

(45) 授权公告日 2014. 11. 26

(21) 申请号 200980149170. 3

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2009. 12. 03

G02B 6/00 (2006. 01)

(30) 优先权数据

61/120, 022 2008. 12. 04 US

(56) 对比文件

WO 2007/132182 A2, 2007. 11. 22,

US 5450427 A, 1995. 09. 12,

US 7394591 B2, 2008. 07. 01,

WO 2007/143542 A2, 2007. 12. 13,

US 2006/0263024 A1, 2006. 11. 23,

WO 2007/132182 A2, 2007. 11. 22,

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2011. 06. 07

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2009/066655 2009. 12. 03

(87) PCT国际申请的公布数据

WO2010/065788 EN 2010. 06. 10

审查员 陈嘉佳

(73) 专利权人 IMRA 美国公司

地址 美国密歇根州

(72) 发明人 董梁 M·E·费尔曼 H·麦凯

傅立斌 铃木茂

(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

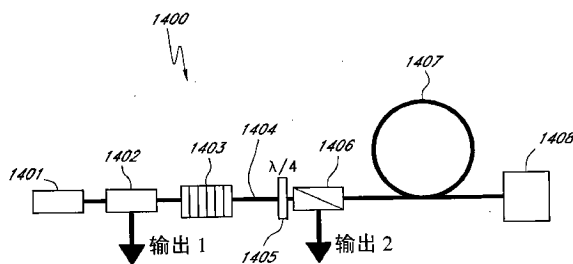
权利要求书3页 说明书32页 附图23页

(54) 发明名称

用于光纤激光器和放大器的高度稀土掺杂的光纤

(57) 摘要

本文所述的不同实施例包括激光器和 / 或放大器系统, 所述系统包括在磷硅玻璃中具有镱离子的掺杂增益光纤 (1404)。本文所述的不同实施例将泵浦吸收增大到至少约 1000dB/m-9000dB/m。所述增益光纤的使用提供了增大的峰值功率和 / 或脉冲能量。在磷硅玻璃中具有镱离子的掺杂增益光纤 (1404) 的不同实施例表现出与等量掺杂水平的镱掺杂石英光纤可获得的光暗化水平相比降低的光暗化水平。



1. 一种光纤,所述光纤包括:  
稀土掺杂玻璃,所述稀土掺杂玻璃包括石英、镱、磷、铝和硼;  
其中,所述稀土掺杂玻璃中镱的浓度在 0.5-15mol% 的范围内,使得所述光纤被设置成在泵浦波长具有大于 3000dB/m 的峰值吸收和在发射波长具有大于 0.5dB/cm 的增益,  
所述稀土掺杂玻璃中的磷的浓度包括超过 50mol%  $P_2O_5$ ,使得在所述发射波长的光纤中光暗化损耗的饱和值小于 10dB/m,和  
所述稀土掺杂玻璃中铝的浓度在 0.5-15mol% 的范围内,  
其中,所述稀土掺杂玻璃中硼的浓度小于 25mol%。
2. 根据权利要求 1 所述的光纤,其中所述稀土掺杂玻璃还包括 0.5-1mol% 的钇。
3. 根据权利要求 1 所述的光纤,其中所述铝的浓度在 1-10mol% 的范围内。
4. 根据权利要求 1 所述的光纤,其中所述稀土掺杂玻璃中铝的浓度在 5-10mol% 的范围内。
5. 根据权利要求 1 所述的光纤,其中所述光纤被设置成具有大于 100dB/m 的增益。
6. 根据权利要求 1 所述的光纤,其中所述光纤被设置成具有大于 500dB/m 的增益。
7. 根据权利要求 1 所述的光纤,其中所述泵浦波长在 0.9  $\mu\text{m}$  到 1.0  $\mu\text{m}$  的范围内。
8. 根据权利要求 1 所述的光纤,其中所述发射波长在 1.0  $\mu\text{m}$  到 1.1  $\mu\text{m}$  的范围内。
9. 一种光学放大器,包括:  
泵浦源;  
增益光纤,和提供亚皮秒输出脉冲的生成的色散补偿器,所述增益光纤包括:  
包层,所述包层包括石英;和  
纤芯,所述纤芯包括石英、镱、磷、铝和硼,  
其中所述纤芯中镱的浓度在 0.5-15mol% 的范围内,使得所述增益光纤在泵浦波长具有大于 3000dB/m 的峰值吸收并在发射波长具有大于 0.5dB/cm 的增益,  
所述纤芯中磷的浓度包括超过 50mol%  $P_2O_5$ ,使得在发射波长的增益光纤的光暗化损耗的饱和值小于 10dB/m,和  
所述纤芯中铝的浓度在 0.5-15mol% 的范围内,  
其中,所述纤芯中硼的浓度小于 25mol%。
10. 根据权利要求 9 所述的光学放大器,其中所述泵浦源被设置成芯泵浦所述增益光纤,并且所述泵浦源包括大芯径光纤放大器。
11. 根据权利要求 9 所述的光学放大器,其中所述泵浦源被设置成包层泵浦所述增益光纤。
12. 根据权利要求 9 所述的光学放大器,其中所述放大器包括长度在几厘米到几米范围内的增益介质,并且每单位长度的增益在 0.5dB/cm 到 10dB/cm 的范围内。
13. 根据权利要求 12 所述的光学放大器,其中每单位长度的增益在 2dB/cm 到 10dB/cm 的范围内。
14. 根据权利要求 9 所述的光学放大器,其中所述泵浦波长在 0.9  $\mu\text{m}$  到 1.0  $\mu\text{m}$  的范围内。
15. 根据权利要求 9 所述的光学放大器,其中所述发射波长在 1.0  $\mu\text{m}$  到 1.1  $\mu\text{m}$  的范围内。

16. 一种包括权利要求 9 所述的光学放大器的光纤激光器,所述放大器被设置成光学共振器内的增益介质。

17. 根据权利要求 16 所述的光纤激光器,其中所述光纤放大器具有 1mm 到 20cm 的光纤长度。

18. 一种光纤,包括:

具有纤芯半径  $\rho$  的稀土掺杂的纤芯;

围绕所述纤芯设置的第一包层;和

围绕所述第一包层设置的第二包层,

所述第一包层具有外半径  $\rho_1$ ,所述纤芯和第一包层具有折射率差  $\Delta n$ ,并且所述第一包层和所述第二包层具有折射率差  $\Delta n_1$ ,

其中 (i) 所述纤芯中支持少于 10 种模态, (ii) 所述第一包层半径  $\rho_1$  大于  $1.1\rho$  并小于  $2\rho$ , 和 (iii) 所述第一包层和所述第二包层之间的折射率差  $\Delta n_1$  大于  $1.5\Delta n$  并小于  $50\Delta n$ ,

其中所述光纤包括石英、稀土掺杂剂、磷、和铝,并且所述稀土掺杂剂的浓度为至少 0.5mol%,所述光纤在泵浦波长具有大于 3000dB/m 到 9000dB/m 的峰值吸收,和

其中所述稀土掺杂的纤芯中的磷的浓度包括超过 50mol%  $P_2O_5$ ,使得在发射波长的光纤的光暗化损耗的饱和值小于 10dB/m。

19. 一种光纤激光振荡器,包括:

增益光纤,所述增益光纤包括权利要求 1 所述的光纤,所述增益光纤具有第一长度;

泵浦源,所述泵浦源用于泵浦所述增益光纤;

第一反射器,所述第一反射器光学连接至所述增益光纤的第一输出端,其中所述第一反射器被设置成控制腔内色散,所述第一反射器具有至少 40% 的反射率;

无掺杂光纤,所述无掺杂光纤光学耦合至所述增益光纤的第二输出端并被设置成接收从所述增益光纤的第二输出端发射的能量,所述无掺杂光纤具有第二长度,所述第二长度大于所述第一长度;

可饱和吸收器,所述可饱和吸收器被设置成高反射腔端镜,所述可饱和吸收器具有至少 40% 的反射率并可操作以对所述光纤激光振荡器进行锁模,所述可饱和吸收器被设置成接收和反射从所述增益光纤的第二输出端发射的能量;和

腔内偏振器,所述腔内偏振器光学耦合至所述增益光纤和所述无掺杂光纤,所述腔内偏振器被设置成第一输出耦合器以发射第一组输出脉冲。

20. 根据权利要求 19 所述的光纤激光振荡器,其中所述第一反射器包括啁啾布拉格光栅。

21. 根据权利要求 19 所述的光纤激光振荡器,其中所述振荡器还包括偏振控制器,所述偏振控制器包括四分之一波片,其中所述四分之一波片被设置成可以调节以控制所述输出脉冲的输出耦合。

22. 根据权利要求 21 所述的光纤激光振荡器,其中所述偏振控制器被设置成用于至少 50% 的输出耦合。

23. 根据权利要求 19 所述的光纤激光振荡器,其中所述振荡器被设置成支持孤子。

24. 根据权利要求 19 所述的光纤激光振荡器,其中所述振荡器被设置成将输出脉冲的

非线性相位延迟限制在小于  $\pi$ 。

25. 一种基于激光的系统,包括:

光脉冲源;

光纤放大器,所述光纤放大器包括权利要求 1 所述的光纤;和

非线性光纤,所述非线性光纤被设置成对从所述光纤放大器发射出的脉冲进行光谱展宽;所述非线性光纤包括应力导引光纤,所述应力导引光纤被设置成利用应力光学效应在所述光纤中引导模态。

26. 根据权利要求 25 所述的基于激光的系统,还包括脉冲压缩器,所述脉冲压缩器被设置成接收来自所述非线性光纤的脉冲并将所述脉冲压缩成脉宽在 10fs 至 1ps 的范围内。

27. 一种高重复率光纤激光振荡器,包括:

泵浦;

增益光纤,所述增益光纤包括权利要求 1 所述的光纤;和

色散补偿器,所述色散补偿器包括具有色散的一个或多个光纤,其中所述增益光纤和一个或多个光纤具有的总长度足够短以便提供在 100MHz 到 10GHz 范围内的重复率,所述色散补偿器提供亚皮秒输出脉冲的生成。

28. 根据权利要求 27 所述的高重复率光纤激光振荡器,其中所述脉冲具有的亚皮秒脉冲宽度在 100fs 到 300fs 的范围内。

29. 根据权利要求 27 所述的高重复率光纤激光振荡器,其中所述色散补偿器包括光纤布拉格光栅。

30. 一种频梳源,包括:

光脉冲源,所述光脉冲源包括权利要求 27 所述的高重复率光纤激光振荡器;和

非线性光纤,所述非线性光纤被设置成对从所述增益光纤发射出的脉冲进行光谱展宽。

31. 一种基于激光的系统,包括:

至少一个多模泵浦二极管;

大芯径光纤,所述大芯径光纤被设置成从所述泵浦二极管接收能量并发射单模或少模泵浦输出;和

光学系统,所述光学系统被设置成接收所述泵浦输出;

其中所述大芯径光纤或所述光学系统的至少一个包括权利要求 1 所述的光纤。

32. 根据权利要求 31 所述的基于激光的系统,其中所述泵浦二极管被设置成脉冲的。

33. 根据权利要求 31 所述的基于激光的系统,其中所述光学系统包括激光器。

34. 根据权利要求 31 所述的基于激光的系统,其中所述光学系统包括放大器。

## 用于光纤激光器和放大器的高度稀土掺杂的光纤

### [0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请根据 35 U. S. C § 119 (e) 要求申请日为 2008 年 12 月 4 日、发明名称为“用于光纤激光器和放大器的高度稀土掺杂的光纤 (Highly Rare-Earth-Doped Optical Fibers for Fiber Lasers and Amplifiers)”的美国临时专利申请 No. 61/120, 022 的优先权, 该文献在此以其全文形式被结合入本文作为引用。

[0003] 本申请还涉及申请日为 2007 年 3 月 29 日、发明名称为“用于光纤激光器或放大器的稀土掺杂和大有效面积的光纤 (Rare earth doped and large effective area optical fibers for fiber lasers and amplifiers)”的美国专利申请 No. 11/693, 633, 该申请现被授权为美国专利 No. 7, 450, 813。本申请还涉及申请日为 2008 年 8 月 28 日、发明名称为“玻璃大芯径光纤 (Glass Large-Core Optical Fibers)”的国际专利申请 No. PCT/US2008/074668, 该申请的国际公布号为 WO 2009/042347 ; 以及涉及申请日为 2007 年 3 月 27 日、发明名称为“超大数值孔径光纤 (Ultra high numerical aperture optics fibers)”的美国专利申请 No. 11/691, 986, 该申请现被授权为美国专利 No. 7, 496, 260。上述每个专利申请、专利公布和专利的公开内容在此以其全文形式被结合入本文作为引用。

### 技术领域

[0004] 本申请总体涉及光纤激光器和放大器系统。具体地说, 本申请涉及包括高度稀土掺杂的光纤的用于激光器和放大器系统的光纤。

### 背景技术

[0005] 输出功率为几十瓦特到几百瓦特的镜光纤激光器已经在市场上存在很多年了。近来, 以单横向模式工作的若干千瓦的镜光纤激光器也出现了。镜的简单的两级能量系统通过其 3 个较低能级和 4 个高能级的集合使得在激光器或放大器结构中能够实现从泵浦到信号的有效光能转换。

[0006] 具有高峰值和 CW 功率、高重复频率和增大的稳定性和可靠性的光纤激光器在各种应用中可以有优势的。不过, 所述激光器难以通过现有技术开发。

### 发明内容

[0007] 本文所述的不同实施例包括激光器或放大器系统, 所述激光器或放大器系统包括在硅酸磷玻璃中具有镱离子的掺杂增益光纤。所述增益光纤被设置成使得在约  $0.9 \mu\text{m}$  - 约  $1 \mu\text{m}$  的泵浦波长范围上每单位长度的泵浦吸收明显超过石英光纤的每单位长度泵浦吸收。本文所述的不同实施例将泵浦吸收 (量) 增大到至少约 1000dB/m 及更高。在一些实施例中, 泵浦吸收 (量) 可以是约 3000dB/m-9000dB/m。在不同的实施例中, 使用这些增益光纤提供了增大的峰值功率和 / 或脉冲能量。在硅酸磷玻璃中具有镱离子的掺杂增益光纤的不同实施例中, 与通过等同掺杂水平的镱掺杂石英光纤可获得的光暗化水平相比也降低了光暗化水平。在本文所述的掺杂增益光纤的一些实施例中, 可获得芯和包层之间相对较低的

有效折射率差,一般在包括包层(例如石英)的材料的折射率的约  $\pm 0.006$  或更小的范围内。在一些实施例中,芯和包层之间的有效折射率差在约  $\pm 0.003$  内。

[0008] 本文所述的不同实施例包括光纤,所述光纤包括:稀土掺杂的玻璃,所述稀土掺杂的玻璃包括石英、稀土掺杂剂、磷、和铝,其中稀土掺杂剂的浓度为至少约  $0.5\text{mol}\%$ 。光纤的不同实施例被设置成在泵浦波长下峰值吸收大于约  $3000\text{dB/m}$  并在发射波长下增益大于约  $0.5\text{dB/cm}$ 。在不同的实施例中,稀土掺杂玻璃中的磷具有的浓度使得在发射波长下光纤中光暗化损耗的饱和值小于约  $10\text{dB/m}$ 。在不同的实施例中,泵浦波长可以在从约  $0.9\mu\text{m}$ -约  $1.0\mu\text{m}$  的范围内。在一些实施例中,发射波长可以在从约  $0.95\mu\text{m}$ -约  $1.2\mu\text{m}$  的范围内。在一些实施例中,泵浦波长可以在从约  $0.91\mu\text{m}$ -约  $0.99\mu\text{m}$  的范围内。在一些实施例中,发射波长可以在从约  $1.0\mu\text{m}$ -约  $1.1\mu\text{m}$  的范围内。

[0009] 本文所述的不同实施例描述了一种系统,所述系统包括光纤放大器,其中所述光纤放大器包括放大器材料;和光纤泵浦激光器,其中所述光纤泵浦激光器包括激光器材料,所述激光器材料被设置成在具有峰值泵浦波长的波长范围中产生辐射,所述光纤泵浦激光器被设置成芯泵浦光纤放大器。在不同的实施例中,在泵浦波长下泵浦激光器材料的发射截面比泵浦波长下放大器材料的发射截面大大约  $10\%$ 。

[0010] 本文所述的不同实施例描述了一种光学放大器,所述光学放大器包括泵浦源;和增益光纤。所述增益光纤的不同实施例包括包含石英的包层,和包括稀土掺杂剂、磷、和铝的芯。在不同的实施例中,稀土掺杂剂的浓度为至少约  $0.5\text{mol}\%$ 。在不同的实施例中,所述增益光纤在泵浦波长下具有的峰值吸收大于约  $3000\text{dB/m}$  并在发射波长下具有的增益大于约  $0.5\text{dB/cm}$ 。在不同的实施例中,增益光纤中的磷具有的浓度使得在发射波长下增益光纤的光暗化损耗的饱和值小于约  $10\text{dB/m}$ 。

[0011] 本文所述的不同实施例描述了一种光纤,所述光纤包括具有纤芯半径  $\rho$  的稀土掺杂纤芯;围绕所述纤芯设置的第一包层;和围绕所述第一包层设置的第二包层。在不同的实施例中,第一包层具有外半径  $\rho_1$ ,纤芯和第一包层具有的折射率差为  $\Delta n$ ,并且第一包层和第二包层具有的折射率差为  $\Delta n_1$ 。在一些实施例中,纤芯中支持小于 10 种模式。在一些实施例中,第一包层半径  $\rho_1$  大于约  $1.1\rho$  并小于约  $2\rho$ 。在一些实施例中,第一包层和第二包层之间的折射率差  $\Delta n_1$  大于约  $1.5\Delta n$  并小于约  $50\Delta n$ 。在一些实施例中,光纤包括石英、稀土掺杂剂、磷、和铝,其中所述稀土掺杂剂的浓度为至少约  $0.5\text{mol}\%$ 。在不同的实施例中,光纤在泵浦波长下具有的峰值吸收处大于约  $3000\text{dB/m}$ - $9000\text{dB/m}$ 。在一些实施例中,稀土掺杂的纤芯中磷具有的浓度使得在发射波长下光纤的光暗化损耗的饱和值小于约  $10\text{dB/m}$ 。

[0012] 本文所述的不同实施例描述了一种光纤振荡器,所述光纤振荡器包括增益光纤;用于泵浦增益光纤的泵浦源;光学连接至增益光纤的第一输出端的反射器;无掺杂光纤,所述无掺杂光纤光学连接至增益光纤的第二输出端并被设置成接收从增益光纤的第二输出端发射的能量;可饱和吸收器,所述可饱和吸收器被设置成为高反射的腔镜;和腔内偏振器,所述腔内偏振器光学连接至增益光纤和无掺杂光纤。在不同的实施例中,所述增益光纤包括光纤,所述光纤包括稀土掺杂玻璃,所述稀土掺杂玻璃包括石英、稀土掺杂剂、磷、和铝,其中稀土掺杂剂的浓度为至少约  $0.5\text{mol}\%$ 。光纤的不同实施例被设置成在泵浦波长下具有的峰值吸收大于约  $3000\text{dB/m}$  并在发射波长下具有的增益大于约  $0.5\text{dB/cm}$ 。在不同的

实施例中,稀土掺杂玻璃中磷具有的浓度使得在发射波长下光纤中光暗化损耗的饱和值小于约 10dB/m。在不同的实施例中,反射器被设置成控制腔内色散。在不同的实施例中,所述反射器具有的反射率为至少约 40%。在一些实施例中,可饱和吸收器具有的反射率为至少约 40%并且可操作以便对光纤振荡器进行锁模。在一些实施例中,可饱和吸收器被设置成接收和反射从增益光纤的第二输出端发射的能量。在不同的实施例中,腔内偏振器被设置成作为第一输出耦合器并发射第一组输出脉冲。在不同的实施例中,增益光纤具有第一长度而无掺杂光纤具有第二长度。在一些实施例中,第二长度大于第一长度。

[0013] 本文所述的不同实施例描述了一种基于激光的系统,所述系统包括光脉冲源;光纤放大器;和非线性光纤,所述非线性光纤被设置成将从光纤放大器发射出的脉冲进行光谱增宽。在不同的实施例中,所述非线性光纤包括应力导引光纤,所述应力导引光纤被设置成利用由于应力光学效应产生的折射率变化在光纤中引导模式。在不同的实施例中,所述光纤放大器可包括光纤,所述光纤包括稀土掺杂玻璃,所述稀土掺杂玻璃包括石英、稀土掺杂剂、磷、和铝,其中稀土掺杂剂的浓度为至少约 0.5mol%。不同实施例的光纤被设置成在泵浦波长下具有的峰值吸收大于约 3000dB/m 并在发射波长下具有的增益大于约 0.5dB/cm。在不同的实施例中,稀土掺杂玻璃中的磷具有的浓度使得在发射波长下光纤中光暗化损耗的饱和值小于约 10dB/m。

[0014] 本文所述的不同实施例描述了一种高重复率光纤激光振荡器,所述高重复率光纤激光振荡器包括泵浦;增益光纤;和色散补偿器,所述色散补偿器包括一个或多个具有色散的光纤。在不同的实施例中,所述增益光纤包括光纤,所述光纤包括稀土掺杂玻璃,所述稀土掺杂玻璃包括石英、稀土掺杂剂、磷、和铝,其中稀土掺杂剂的浓度为至少约 0.5mol%。不同实施例的光纤被设置成在泵浦波长下具有的峰值吸收大于约 3000dB/m 并在发射波长下具有的增益大于约 0.5dB/cm。在不同的实施例中,稀土掺杂玻璃中磷具有的浓度使得光纤中光暗化损耗的饱和值小于约 10dB/m。在不同的实施例中,所述增益光纤和具有色散的一个或多个光纤具有的总长度足够短以提供在约 100MHz-10GHz 范围内的重复率。在一些实施例中,所述色散补偿器提供亚皮秒输出脉冲的生成。本文所述的不同实施例描述了一种频梳源,所述频梳源包括高重复率光纤激光振荡器和非线性光纤,所述非线性光纤被设置成对从增益光纤发射出的脉冲进行光谱增宽。

[0015] 本文所述的不同实施例描述了一种高重复率光纤激光振荡器,所述高重复率光纤激光振荡器包括至少一个多模泵浦二极管;大芯径光纤,所述大芯径光纤从所述泵浦二极管接收能量并发射具有单个或若干模式的泵浦输出;和,接收所述泵浦输出的光学系统。在一些实施例中,大芯径光纤或光学系统中的至少一个包括光纤,所述光纤包括稀土掺杂玻璃,所述稀土掺杂玻璃包括石英、稀土掺杂剂、磷、和铝,其中稀土掺杂剂的浓度为至少约 0.5mol%。不同实施例的光纤被设置成在泵浦波长下具有的峰值吸收大于约 3000dB/m 并在发射波长下具有的增益大于约 0.5dB/cm。在不同的实施例中,稀土掺杂玻璃中磷具有的浓度使得光纤中光暗化损耗的饱和值小于约 10dB/m。

#### 附图说明

[0016] 图 1 示出了镜能级系统。

[0017] 图 2 示出了在硅酸铝光纤中镜的吸收和发射。

- [0018] 图 3A 和 3B 示出了在两个不同温度下在硅酸铝光纤中镱的吸收和发射。
- [0019] 图 4 示出了在磷和氟掺杂的石英光纤中镱的吸收和发射。
- [0020] 图 5A 和 5B 是示出在两个不同温度下在磷和氟掺杂的石英光纤中镱的吸收和发射的图。
- [0021] 图 6 示出了在磷掺杂的石英光纤中镱的吸收和发射。
- [0022] 图 7A 和 7B 是示出在两个不同温度下在磷掺杂的石英光纤中镱的吸收和发射的图。
- [0023] 图 8 是示出了氟掺杂的石英光纤、磷和氟掺杂的石英光纤和磷掺杂的石英光纤的寿命测量结果的图。
- [0024] 图 9 是示出了包含铝（氧化铝）、磷、硼和氟的高度掺杂镱光纤的吸收光谱的图。
- [0025] 图 10 是示出了在具有不同成分的镱掺杂光纤中光暗化测量结果的示例的图。
- [0026] 图 11 是示出了在具有自预成型件的不同拉丝条件的镱掺杂光纤中光暗化测量结果的示例的曲线图。
- [0027] 图 12 是示出了在不同温度下镱掺杂光纤中示例光暗化测量结果的曲线图。
- [0028] 图 13 是示出了与光暗化导致的吸收相关的示例光谱的曲线图。
- [0029] 图 14 示意性地示出了扭转（模）腔被动锁模光纤激光器的一个实施例。
- [0030] 图 14A 示意性地示出了双扭转（模）腔被动锁模光纤激光器的一个实施例。
- [0031] 图 15 示意性地示出了高能皮秒（ps）光纤激光器系统的一个实施例。
- [0032] 图 16 是示出在 ps 光纤放大器系统的一个实施例中带宽拓宽的曲线图。
- [0033] 图 17 示意性地示出了利用 ps 光纤激光器种子源耦合至一个或多个应力导引光纤的高能量短脉冲光纤激光器系统的一个实施例，所述示例结构提供了用于非线性频率增宽和脉冲压缩的构造。
- [0034] 图 17A 示意性地示出了泄漏信道光纤（LCF）的一个实施例，所述泄漏信道光纤（LCF）可被设置成利用应力光学效应引导模式。
- [0035] 图 18 表示另一示例实施例，示出了高能光纤激光腔。
- [0036] 图 19 表示一个示例实施例，示出了非常高重复率的振荡器。
- [0037] 图 20 表示另一示例实施例，示出了非常高重复率的振荡器。
- [0038] 图 21 表示一个示例实施例，示出了高重复率光纤频梳激光器。
- [0039] 图 22 示出了由 976nm 光纤激光器泵浦的反泵浦 Yb 放大器的一个实施例，并被设置成将 ASE 与镱光纤放大器分隔开。
- [0040] 图 23A 示意性地示出了光纤放大器系统的一个实施例，其中大芯径放大器被设置成泵浦放大器增益级。
- [0041] 图 23B-23F 示出了适用于图 23A 所示大芯径泵浦光纤的实施例的大芯径光纤的不同示例。图 23F 示出了泵浦光纤的测量模式分布。
- [0042] 图 24-27 示出了制备的全玻璃泄漏信道光纤的示例的性能，其中所述泄漏信道光纤被设置成利用应力光学效应引导模式。
- [0043] 图 24 是三维图，示出了图 26 所示示例光纤的测量的二维反射率分布，并示出了在低折射率结构处增大的折射率。
- [0044] 图 25A-25C 示出了具有三层的制备的全玻璃泄漏信道光纤（LCF）的示例的一些特



征。图 25A 示出了光纤的剖面,图 25B 示出了测量的二维折射率分布,而图 25C 示出了在 780nm-1100nm 的范围中不同波长处测得的若干模式分布。

[0045] 图 26 示出了利用与图 25A 所示 LCF 相同的预成型件拉制的制备光纤在若干波长处获得的模场测量结果。

[0046] 图 27 是示出了图 25B 的二维反射率分布的断面的曲线图。

### 具体实施方式

[0047] 在光纤中产生高功率 CW 到近带宽极限的纳秒长度脉冲受到若干效应的限制,例如受激布里渊 (Brillouin) 散射、光暗化等。在文献中已经提出了抑制布里渊 (Brillouin) 散射的不同方法。这些方法一般通过半导体激光器的频率抖动、调频器的应用、或利用线窄化放大自发发射源来增大注入光信号的带宽。可替换的,可利用光纤参数变化来增大布里渊散射阈值。通过将应变分布应用至具有布线的光纤的方式的受激布里渊 (Brillouin) 散射抑制是另一种可行的方法。在一些系统中,通过应用温度分布可以增大短的高度非线性光纤中的 SBS 阈值。在一些实施例中,通过减少光纤的光场和声模之间的重叠可以降低光纤的有效布里渊散射截面。不过,对于芯径直径  $> \approx 30 \mu\text{m}$  的大模光纤,光场和声模之间的重叠由声模的有限的传播距离 ( $\approx 30 \mu\text{m}$ ) 控制;在这种情况下,布里渊散射的起始由光场强度确定,所述光场强度与光模面积和非线性相互作用长度成比例,所述非线性相互作用长度与光纤长度成比例。

[0048] 在光纤设计、成分和制造上的改进(使光纤的非线性阈值增大一个或多个数量级)对于抑制受激布里渊 (Brillouin) 散射是有利的。优选的,这些改进可以在不增大光纤的信号带宽、温度或应变控制的情况下增大非线性阈值,并且可应用于包括具有大芯径面积的光纤的光纤激光器。

[0049] 光纤激光器和放大器的功率提高(功率调节)的另一可能的限制由光暗化引起。光暗化是一种现象,其中由于在光纤中存在大量的光功率,光纤中的背景损耗由色中心的产生而永久性增大。尽管所述效应在暴露一段时间后可饱和(例如,参见图 10-12),这可促成光纤激光器和放大器中输出功率的损耗和效率的降低。光暗化在高功率电平下可能更为严重,并且如果处理不当可能促成在高功率光纤激光系统中显著的功率损耗。

[0050] 本文所述的不同实施例包括低光暗化玻璃,所述低光暗化玻璃包括在单模光纤、多模大模光纤、光子晶体光纤 (PCF)、泄漏信道光纤 (LCF) 和其它光纤设计(包括双包层光纤设计)中所用的高浓度镱。使用所述光纤可提供较短的设备长度和因而较高的非线性阈值。在不同的实施例中,使用具有由高度多模泵浦引导件环绕的掺杂纤芯的双包层设计,镱掺杂的光纤对于各种应用允许从多模高功率泵浦二极管到波长为约  $1 \mu\text{m}$  的高功率单模光束的有效光能转换。

[0051] 不同的实施例包括石英光纤,所述石英光纤具有高水平的 Yb 掺杂,和一些硼和/或磷掺杂剂。在一些实施例中,具有高水平的 Yb 掺杂和一些硼和/或磷掺杂剂的石英光纤可具有大纤芯。所述光纤可同时提供高泵浦光吸收、低光暗化、和纤芯与包层之间的较低的有效折射率差,以及高增益。

[0052] 实验结果显示可以实现出人意料的高 Yb 掺杂水平。在泵浦波长下所得到的吸收的增大提供了在减小的光纤长度上放大至更高能量和/或峰值功率。从而显著增大了非线性

性效应的阈值。此外,还观察到低光暗化,并且显著减少了已知随高反转能级而出现的常见的权衡 (tradeoff)。

[0053] 在一些实施例中,理想的基质玻璃可以大部分是石英,掺杂有足够大量的镱离子以提供高掺杂水平。玻璃成分可包括其它的掺杂剂,例如硼和 / 或磷。具有磷的石英玻璃基质在本文中经常被称为硅酸磷玻璃。

[0054] 不同的实施例包括产生近衍射极限输出的大芯径小数值孔径光纤。高度稀土掺杂的纤芯提供增大的每单位长度的增益 (dB/m),和光纤长度为几厘米的高增益,以及对非线性效应的降低的敏感度。

[0055] 不同的实施例包括用于镱掺杂光纤、光纤激光器和放大器的含磷石英玻璃基质。所述石英玻璃基质可包括磷,并且在一些实施例中玻璃基质可包括硼和磷。

[0056] 具有如此较短长度的 (与镱掺杂光纤相比) 磷硅酸增益光纤还可以减少脉冲激光器和放大器中的非线性效应,其中高功率引起在设备长度上集成的非线性效应。所述减小的非线性可提供更高的峰值功率,并且可有益于高能量脉冲放大,例如在超短脉宽下,其中非线性效应是限制较高脉冲能量的因素之一,这对用于微加工应用可能是希望的。

[0057] 本申请的发明人还发现了在不同的实施例中,与石英光纤相比,在具有等量镱掺杂水平的已制备磷硅酸光纤中光暗化效应明显更低。这可导致可靠和有效的高功率光纤激光器和放大器。

[0058] 在不同的实施例中,镱掺杂的石英光纤,通过磷酸盐基质的优点,可以利用已经成熟的光纤制备技术基于化学气相沉积进行制备。所述制备的光纤可具有非常低的背景损耗和减少的光暗化。此外,磷硅酸光纤还可具有电信级光纤的各种希望的物理特征。这样,制备光纤的工艺与用于制备传统石英光纤的工艺类似或相同,并且在至少一些实施例中, (杠杆作用) 放大了开发用于石英光纤制备和使用的各种技术和设备的可用性的优点。

[0059] 硅酸磷增益光纤可用于高重复率光纤激光器和放大器系统 (例如,100MHz-100GHz 频率),飞秒至纳秒脉冲放大器,用作由高功率源注入的功率放大器,用作体放大器的种子源,用作产生高功率输出或高能量的体放大器的种子源,用作泵浦源,用作在高平均功率应用中表现低光暗化的 CW 源,用作高功率 / 短波长应用中的脉冲源,用于连续生成,用作基于光纤的相干光束组合器的增益元件,用作频梳源,用作单频光纤激光器,用作材料加工或激光雷达应用中的增益元件,用作通信放大器,以及用于许多其它应用中。

[0060] 本文所述的不同实施例描述了具有大光纤芯径和 / 或高掺杂的玻璃。不同的实施例披露了可用于大芯径光纤和棒的稀土掺杂的玻璃成分。包括高 (度) 稀土掺杂的基质玻璃的不同实施例提供了短光纤长度的使用,以及相应减小的非线性效应。

[0061] 在不同的实施例中,石英玻璃在光纤激光器和放大器中可用作镱的基质。在一些实施例中,因为镱结合入石英玻璃成为 Yb<sup>3+</sup>,我们经常使用镱来指 Yb<sup>3+</sup>。在镱掺杂的石英光纤中,经常添加一定量的铝以减少高掺杂水平下的镱团簇。镱团簇是不希望的,因为镱离子间的相互作用可导致多光子上转换,并因此导致激光器或放大器中的能量损失。铝掺杂也提高折射率。在一些实施例中,如果需要,光纤可掺杂有少量的锆以增大折射率。在一些实施例中,经常添加氟以减小折射率。

[0062] 一般认为光暗化与高镱掺杂水平下的镱团簇有关,其中多个离子相互作用以产生具有非常高能量水平能导致光暗化的光子。本文所述的不同实施例例如可通过减少镱团簇

来减少光暗化。在不同的实施例中,可以通过添加材料例如铝、磷、硼等来减少镱团簇。

[0063] 本申请结合引用美国专利申请 No. 11/693, 633, 其发明名称为“用于光纤激光器和放大器的稀土掺杂和大有有效面积的光纤 (Rare earth doped and large effective area optical fibers for fiber lasers and amplifiers)”, 相应的美国公开号为 2008/0069508 (在下文中称为' 9508), 并且相应的美国专利号为 7, 450, 813, 上述文献的每一篇以其全文形式被结合入本文作为引用。前述的申请、公开和专利披露了(除了别的以外)可减少光暗化效应的光纤的实施例。

[0064] 在一些实施例中,使用具有大模面积、在纤芯和包层之间具有低有效折射率差的稀土掺杂光纤是有优势的。因此,为了降低纤芯和包层之间的有效折射率差,在掺杂纤芯中实现较低的折射率可能是有优势的。

[0065] 在一些实施例中,可使用较高的铝掺杂来减少光暗化,而不需要使用任何硼或磷。不过,添加铝和磷来减少镱团簇可提高折射率。在一些实施例中,观察到少量的锆掺杂也能够提高折射率。为了降低折射率,在一些实施例中可添加氟。由于通过目前技术发展水平的石英光纤制备技术有限量的氟可被结合入石英玻璃,稀土掺杂的纤芯具有比石英更高的折射率。这对于高度稀土掺杂的纤芯尤其如此,因为在一些情况铝或磷的希望的掺杂水平要高的多,以实现合理的低水平的团簇。因此,制造折射率接近于石英的折射率、在某些大芯径光纤设计中可用于光纤激光器的功率提高的高度稀土掺杂的纤芯玻璃可能是困难的。

[0066] 本文所述的不同实施例包括折射率相对接近于石英的折射率的高度稀土掺杂的玻璃成分。例如,在不同的实施例中,折射率可以在石英的约  $\pm 0.01$  内,石英的约  $\pm 0.006$  内,石英的约  $\pm 0.003$  内,或石英的约  $\pm 0.001$  内。在其它实施例中,相对于石英的折射率可具有不同值。所述玻璃可被制备成棒,所述棒可用作预成型件以生产其它棒以及光纤。此外,所述玻璃可通过用于通信行业中制造光纤的成熟技术进行制备。

[0067] '9508 中披露了包含磷、硼、铝和 / 或氟的镱掺杂石英光纤的制备工艺的实施例。在制备工艺的一些实施例中,在烧结过程中通过不流动  $\text{BCl}_3$  可省去硼,和 / 或通过在溶液中省去铝可省略铝。

[0068] 本文所述的不同实施例包括可用于光纤和具有大芯尺寸的棒的稀土掺杂玻璃成分。所述玻璃的折射率可以基本一致并且在一些实施例中可接近于石英的折射率。所述特征的可能优点包括减少在纤芯内形成其它波导,这对于较大的纤芯尺寸变得逐渐是个问题。

[0069] 本文所述的不同实施例包括掺杂玻璃,所述掺杂玻璃包括具有折射率的石英,在所述石英中有至少约 10mol% 的磷,在所述石英中有至少约 10mol% 的硼,和在所述石英中有稀土离子。所述稀土离子在石英中的浓度为至少约 1000molppm。所述包括其内具有磷、硼、和稀土离子的石英的光纤具有的折射率在石英的折射率的约  $\pm 0.003$  或更小。

[0070] 不同的实施例包括制备稀土离子掺杂玻璃的方法。所述方法包括将包括稀土离子掺杂玻璃的多个棒层叠并且拉制所述层叠的棒以形成第一棒。在一些实施例中,第一棒可被切成较短的部分,所述较短的部分可被层叠并拉制以形成第二棒。该第二棒可具有有效的折射率一致性,用空间分辨率为  $0.1 \mu\text{m}$  的折射率分析器测得小于约  $5 \times 10^{-4}$  的最大峰 - 峰变化。

[0071] 一些实施例包括棒,所述棒包括掺杂有稀土离子的纤芯和包层。纤芯具有有效的

折射率一致性,用空间分辨率为  $0.1-0.5\mu\text{m}$  之间的折射率分析器测得小于约  $5 \times 10^{-4}$  的最大峰-峰变化。

[0072] 不同的实施例包括棒,所述棒包括掺杂有稀土离子的纤芯和包层,其中纤芯包括至少  $200\mu\text{m}^2$  的掺杂区域,平均折射率在石英的折射率的约  $\pm 0.003$  或更小的范围内。

[0073] 本文所述的不同实施例包括阶跃折射率光纤,所述光纤包括具有纤芯半径  $\rho$  的纤芯,围绕所述纤芯设置的第一包层,和围绕所述第一包层设置的第二包层。第一包层具有外半径  $\rho_1$ 。纤芯和第一包层具有折射率差  $\Delta n$ ,而第一包层和第二包层具有折射率差  $\Delta n_1$ 。对于该阶跃折射率光纤,(i) 纤芯中支持少于 10 种模式,(ii) 第一包层半径  $\rho_1$  大于约  $1.1\rho$  并小于约  $2\rho$ ,和 (iii) 第一包层和所述第二包层之间的折射率差  $\Delta n_1$  大于约  $1.5\Delta n$  并小于约  $50\Delta n$ 。

[0074] 本文所述的一些实施例包括光纤系统,用于提供光放大。所述光纤系统包括掺杂有一种或多种类型稀土离子的光纤。所述光纤具有锥形的输入端以及从其开始延伸的一长度。所述光纤系统还包括光学连接至光纤的光泵和光学连接至光纤的锥形输入端的光源。所述锥形的输入端支持比从所述锥形输入端开始延伸的长度减少数量的光模。

[0075] 本文所述的一些实施例包括制备玻璃的方法。所述方法包括通过汽相沉积引入硼和通过汽相沉积引入磷,其中硼和磷在不同的时间引入。在不同的时间引入硼和磷防止了硼和磷在汽相的反应。

[0076] 本文所述的一些实施例包括减少光暗化并提供稳定和高功率激光器和放大器的高度稀土掺杂的玻璃成分,以及制备方法。例如,至少第 [0063]-[0074] 段和' 9508 的相应附图(对于本文所具体引用的主题和对于其披露的所有其它主题以其全文形式被结合入本文作为引用)披露了所述成分、光纤、和制备技术的示例。

[0077] 在一些实施例中,与没有团簇的石英基质相比,更多的镱离子可被结合入磷基质。镱掺杂的磷硅酸盐(磷硅)光纤可以潜在地允许更多的镱离子被结合而具有低水平的团簇。磷硅酸盐(磷硅)玻璃中的镱离子可以比在石英基质中在  $1-1.1\mu\text{m}$  之间的波长范围上提供更高的泵浦吸收和发射截面。更高的镱含量和更高的发射截面可提供更短的设备长度和更高效的激光器和放大器。这可使更为紧凑的设备以及利用短腔的单频镱激光器的方便实施成为可能。

[0078] 在一些实施例中,磷玻璃、 $\text{P}_2\text{O}_5$  含量超过 50% 的玻璃比基于石英的玻璃对于稀土掺杂可能是更好的基质。磷玻璃的示例可包含  $60-65\text{mol}\% \text{P}_2\text{O}_5$ ,  $5-30\text{mol}\% \text{BaO}$ ,  $5-10\text{mol}\% \text{Al}_2\text{O}_3$ , 和  $0-2\% \text{La}_2\text{O}_3$ 。可以在玻璃中添加可达到  $10\text{mol}\%$  的稀土氧化物,例如  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  或  $\text{Er}_2\text{O}_3$ 。可以在较小的团簇水平获得高的多的掺杂水平。此外,磷玻璃还具有良好的物理和光学特性以使用作光纤的光学材料。

[0079] 制造这种类型玻璃的一种方法包括在坩埚中加热和混合。由于减少杂质的难题,通过这种工艺制得的玻璃可导致高的多的背景损耗。在一个实施例中,为了制成磷玻璃光纤,用希望量的稀土离子制成纤芯玻璃。可以单独制作包层玻璃,所述包层玻璃可被改性成具有比纤芯玻璃的折射率稍低的折射率。纤芯玻璃被制成棒状而包层玻璃被制成匹配管状。通过将纤芯玻璃棒插入包层玻璃管来组装预成型件。光纤随后从预成型件拉制。对于双包层设计,在外侧上再添加具有更低折射率的另一玻璃。

[0080] 该制备工艺可能比开发用于基于石英的玻璃的气相沉积工艺更麻烦。气相沉积工艺也能够使石英玻璃具有比任何其它玻璃低的多不纯度,从而得到低的多损耗。在气相沉积工艺中,纤芯和包层玻璃在一个工艺中制成。

[0081] 这些因素使得开发基于气相沉积的技术以制造具有由磷玻璃提供的一些优点的稀土掺杂的纤芯玻璃非常有吸引力。所述气相沉积工艺的示例在'9508的图2A-6和相应的段落中示出,该文献对于本文具体引用的主题和对于其披露的所有其它主题以其全文形式被结合入本文作为引用。在一些实施例中,还希望能够方便地与石英光纤接合,以便促使开发用于基于石英的光纤的大量技术的进一步利用。还可以添加硼以降低这些玻璃的折射率,使得折射率可以非常接近于石英玻璃的折射率。这对于大芯径光纤是有优势的,其中使镱掺杂玻璃具有非常接近于或匹配于石英玻璃的折射率可能是有益的。

[0082] 通过示例的方式,发明人发现在磷含量低至约0.5mol%的磷掺杂的石英玻璃中相当数量的镱离子可被保留在磷位置处。磷酸盐玻璃的一些希望特征,例如吸收和发射截面、高能态寿命等可通过磷含量大于50mol%而获得。在一些实施例中,为了使大多数的镱保留在磷位置,玻璃应具有足够的磷含量。在一些实施例中,为了实现更高的希望的镱掺杂水平,增大磷含量以实现自镱离子的磷玻璃特征。在一些实施例中,通过所述成分可减少光暗化。在一些实施例中,利用所述高度稀土掺杂的光纤可提供能量、功率、和/或重复率的调节(提高)。例如,获得在光纤长度上减小的高峰值功率可有利地产生紧凑结构以在高重复率下使用。在不同的实施例中可同时提供非线性效应(特别是拉曼散射)的增大的阈值。

[0083] 本文所述的不同示例光纤激光器和放大器实施例包括至少一种镱掺杂的磷硅酸盐(磷硅)增益光纤。在激光器或放大器系统中,磷硅增益光纤可以单独使用或与其它掺杂光纤结合使用。例如,基于磷硅酸盐的增益光纤可被用作功率放大器,所述功率放大器放大由一个或多个前置放大器或功率放大器产生的脉冲。

[0084] 例如,已经推进了最近的大芯径光纤技术,例如通过实施泄漏信道光纤(LCF)提供创记录的有效模面积,如申请日为2008年8月28日、发明名称为“玻璃大芯径光纤(Glass Large-Core Optical Fibers)”的PCT国际申请PCT/US2008/074668所述,该申请的PCT公开号为WO 2009/042347,对于本文具体引用的主题和对于其披露的所有其它主题以其全文形式在此被结合入本文作为引用。所述大芯径光纤当用作放大器或在激光腔内时提供高峰值功率单模输出。本文所述的不同实施例可采用大芯径光纤,例如纤芯尺寸为至少约35 $\mu\text{m}$ 、50 $\mu\text{m}$ 、70 $\mu\text{m}$ 、100 $\mu\text{m}$ 、或稍微更大些的泄漏信道光纤(LCF),具有高度稀土掺杂的纤芯被设置成能减少放大器长度、增大非线性阈值、和/或减少光暗化。

[0085] 一些实施例提供了在ps范围的高峰值功率近带宽极限脉冲的实用源。所述源是基于光纤振荡器光纤放大器构思的。它利用最佳扭转腔结构从光纤振荡器产生高能量近带宽极限或稍偏负的啁啾脉冲。随后提供最佳光纤前置放大器和功率放大器以产生高能量近带宽极限的脉冲,所述脉冲可以有效频率转换成其它波长。

[0086] 不同的实施例提供真单模光纤或近单模光纤中ps脉冲的非线性频率增宽和随后的脉冲压缩以及在微加工中所述源的使用。

[0087] 一些实施例提供高能量锁模光纤振荡器。这里,大芯径泄漏信道光纤被结合入色散补偿激光腔以使振荡脉冲的能量最大化。

[0088] 一些实施例提供了高能量锁模光纤振荡器。一些实施例提供了高重复率锁模振荡

器及其在频梳度量中的使用。

[0089] 不同的实施例提供了高峰值功率单频光纤放大器系统。一些实施例提供了基于 980nmYb 光纤结构的激光器及其应用于 Yb 光纤放大器的纤芯泵浦。

[0090] 磷硅酸盐（磷硅）光纤过渡和光学特性

[0091] 图 1-7A 示出了单独采用镱或利用镱与其它掺杂剂（例如铝、磷和 / 或氟）结合的激光器或放大器介质的相关能级和过渡。描述了通过制备的光纤获得的结果，包括寿命、泵浦吸收、寿命和光暗化的不同测量结果。尤其关注的是不同浓度的铝、磷、氟和硼对于性能的影响。

[0092] 图 1 示出了镱的能级图。由附图标记 100 表示的能级的上部集合  ${}^2F_{5/2}$  具有分别由附图标记 108, 107, 106 表示的三个子能级 g, f 和 e, 而由附图标记 101 表示的能级的下部集合  ${}^2F_{7/2}$  具有由附图标记 102, 103, 104 和 105 表示的四个子能级 a, b, c 和 d。吸收通过具有实线的箭头示出, 而发射通过具有虚线的箭头示出。

[0093] 图 2 示出了铝掺杂的石英光纤中镱吸收 - 曲线 110 和发射 - 曲线 111。

[0094] 图 3A 示出了铝掺杂的石英光纤中在 0 摄氏度的吸收 - 曲线 120 和在 100 摄氏度的吸收 - 曲线 121。图 3B 示出了铝掺杂的石英光纤中在 0 摄氏度的发射 - 曲线 122 和在 100 摄氏度的发射 - 曲线 123。

[0095] 图 4 示出了在磷和氟掺杂的石英光纤中镱吸收 - 曲线 131 和发射 - 曲线 130。

[0096] 图 5A 示出了在磷和氟掺杂的石英光纤中在 0 摄氏度的吸收 - 曲线 140 和在 100 摄氏度的吸收 - 曲线 141。

[0097] 图 5B 示出了在磷和氟掺杂的石英光纤中在 0 摄氏度的发射 - 曲线 142 和在 100 摄氏度的发射 - 曲线 143。

[0098] 图 6 示出了在磷掺杂的石英光纤中镱吸收 - 曲线 151 和发射 - 曲线 150。

[0099] 图 7A 示出了在磷掺杂的石英光纤中在 0 摄氏度的吸收 - 曲线 180 和在 100 摄氏度的吸收 - 曲线 181。图 7B 示出了在磷掺杂的石英光纤中在 0 摄氏度的发射 - 曲线 182 和在 100 摄氏度的发射 - 曲线 183。

[0100] 图 8 示出了三种制备光纤的寿命测量结果。曲线 200 是对于磷掺杂的石英光纤, 曲线 201 是对于磷和氟掺杂的石英光纤, 而曲线 202 是对于氟掺杂的石英光纤。三种光纤的高（上）能态寿命分别是 1.24ms, 0.96ms, 0.66ms, 表示随磷掺杂显著增加的寿命。

[0101] 图 9 示出了高峰值镱吸收 - 曲线 203, 可通过磷硅酸盐（磷硅）增益光纤获得。在这种情况下, 镱掺杂的石英光纤还包含磷、氟、铝、和硼。在一些实施例中, 在磷酸盐玻璃中在峰值为 976nm 处的吸收可超过 5000dB/m。在一些实施例中可实现更高的吸收水平, 例如接近约 9000dB/m。在本例中, 光纤的数值孔径 NA 是  $\sim 0.13$ 。

[0102] 表 1

[0103]

能级	$k(\text{cm}^{-1})$	$\nu(\text{GHz})$	$h\nu(\text{J})$
g	11689	350670	$2.32357 \times 10^{-19}$
f	10909	327270	$2.16852 \times 10^{-19}$

e	10239	307170	$2.03533 \times 10^{-19}$
d	1365	40950	$2.71338 \times 10^{-19}$
c	970	29100	$1.92819 \times 10^{-20}$
b	492	14760	$9.78009 \times 10^{-21}$
a	0	0	0

[0104] 表 2

[0105]

$g_{xy} (\text{cm}^{-1})$	$\nu (\text{GHz})$	$g_{xy}^0 (\text{cm}^{-1})$	$\Delta \nu (\text{GHz})$
$g_{ea}$	307252	0.192159485	920.5
$g_{eb}$	292402	0.043871515	7500
$g_{ec}$	277252	0.012706458	6649.5
$g_{fb}$	307107	0.191297102	4501
$g_{fc}$	288122	0.048947606	3173.5
$g_{ae}$	307214	0.200149915	1435
$g_{af}$	326977	0.0622078	9912.5
$g_{be}$	293291	0.032512969	4014
$g_{bf}$	309164	0.162469284	7155

[0106] 表 3

[0107]

能级	$k (\text{cm}^{-1})$	$\nu (\text{GHz})$	$h\nu (\text{J})$
g	10959	328770	$2.17845 \times 10^{-19}$
f	10667	320010	$2.12041 \times 10^{-19}$
e	10252	307560	$2.03792 \times 10^{-19}$
d	1406	42180	$2.79488 \times 10^{-20}$
能级	$k (\text{cm}^{-1})$	$\nu (\text{GHz})$	$h\nu (\text{J})$

c	821	24630	1.632E-20
b	425	12750	8.44825E-21
a	0	0	0

[0108] 表 1-3 提供了与不同示例的掺杂结构相关的能级的测量结果。对于铝掺杂的石英光纤的所测得的能级在表 1 中示出,以三种不同的单位。第 1 列对应图 1 所示的子能级。第 2 列是  $\text{cm}^{-1}$  的波数 (k),第 3 列是 (单位为)GHz 的峰值频率 ( $\nu$ ),而第 4 列表示 (单位为)J 的转变能。

[0109] 表 2 在第 1 列示出了每个过渡 (转变),在第 2 列示出了每个过渡 (转变)的中心峰值,在第 3 列示出了每个过渡 (转变)的强度,而在第 4 列示出了每个过渡 (转变)的线宽。所述结果对应磷和氟掺杂的石英光纤。

[0110] 在表 3 中示出了对于磷掺杂的石英光纤所测得的能级,以三种不同的单位。第 1 列对应于图 1 所定义的子能级。第 2 列是单位为  $\text{cm}^{-1}$  的波数,第 3 列是单位为 GHz 的峰值频率 ( $\nu$ ),而第 4 列表示单位为 J 的转变能。提供了高浓度的镱离子,并实现了低光暗化。所述结果显示磷硅酸盐基质还提供了更长的高 (上) 能态寿命,对于较低的激光器和增益阈值的益处,对潜在更高增益的更大的发射截面,更短的增益峰值波长,更低量子亏损的可能性,和在 910nm 与 970nm 之间的更平的吸收,提供其它泵浦波长的可能性。

[0111] 如图 9 所示,在一些情况峰值吸收可超过约 5000dB/m。在一些实施例中,掺杂石英光纤的吸收小于约 1000dB/m,并且可以比图 9 所示的峰值吸收小至少一阶 (dB/m)。所获得的具有非常低光暗化的高水平的 Yb 掺杂是出人意料的益处和意想不到的结果。

[0112] 在至少一个实施例中,磷硅酸盐 (磷硅) 增益光纤可优选在泵浦波长下提供至少约 1000dB/m 泵浦吸收,并且在一些实施例中可吸收至少约 1500dB/m,并且可超过约 4000-5000dB/m。吸收可以在约 3000dB/m-5000dB/m 的范围内,并且可达到约 9000dB/m。采用磷硅酸盐 (磷硅) 增益光纤的光纤激光器或放大器可提供在峰值功率、CW 功率、和重复率的一个或多个上的显著改进。同时可实现低光暗化水平。

[0113] 因此,包括至少一种磷硅酸盐 (磷硅) 增益光纤的光纤激光器或放大器可同时提供高品质因数的可扩展性,同时满足或超过传统 Yb (例如,掺杂在非磷硅玻璃中的 Yb) 光纤激光器和 / 或放大器的可靠性和寿命要求。

#### [0114] 制备的光纤示例 - 泵浦吸收和光暗化测量

[0115] 在不同的实施例中,用不同浓度的硼和铝制备光纤以便鉴别它们对光暗化的影响。光纤特性在下文的表 4 中总结。表 4 的第 1 列提供了不同光纤的识别。第 2 列提供了不同光纤的单模截止波长。第 3 列提供了不同光纤的 V- 数。第 4 列和第 5 列分别提供了硼流量率和铝浓度。第 6 列提供了不同光纤的包层直径。第 7 列提供了不同光纤的预成型件进给率  $V_f$  和拉制率  $V_d$ 。第 8 列提供了拉制光纤时的温度。

[0116] 表 4

[0117]



光纤拉制 ID	单模截止波长 WL ( $\mu\text{m}$ )	V @ 0.688 $\mu\text{m}$	硼流量率 (sccm)	铝浓度 (g/100ml)	包层直径 (mm)	Vf/Vd (mm/min)/(m/min)	温度
301	0.53	1.85	40	12	125	1.4/50.5	2100
302	0.57	1.99	40	18	125	1.4/53	2100
303	0.73	2.55	0	24	125	1.4/47	2100
304	0.71±0.06	2.48	0	12	125	1.4/47	2100
305	0.48	1.68	0	18	125	1.4/	2100

[0118] 注：对于表 4 :3.6g Yb/100ml 的掺杂溶液，固结温度是 1200C

[0119] 在一些实施例中，所有光纤用相同镱浓度在 3.6g YbCl<sub>3</sub>•6H<sub>2</sub>O 在 100ml 的蒸馏水的溶液中制成，并且在 1200 摄氏度的相同固结温度制得。对于光纤 301 和 302 开启 40sccm（标准立方厘米 / 每分钟）的硼流率，并对光纤 303, 304 和 305 关闭。溶液中的铝浓度对于光纤 301 为 100ml 水中 12gAlCl<sub>3</sub>，对于光纤 302 为 18g，对于光纤 303 为 24g，对于光纤 304 为 12g，和对于光纤 305 为 18g。对于所有的光纤在 976nm 测得的镱吸收为 ~ 1600dB/m。~ 3cm 的小长度镱掺杂光纤在 ~ 976nm 用超过 100mW 的功率连续泵浦。

[0120] 在本示例中，泵浦功率的选择在该泵浦波长（约 976nm）处提供了 ~ 50% 的最大反转。在不同的实施例中，可以选择泵浦功率以提供希望的反转能级，因为在不同的实施例中，光暗化可取决于反转。在一些实施例中，居中在约 674nm 和 FWHM 为 8nm 的 LED 被用作探测器以连续监控光纤传输并确定光暗化损耗。不同带通滤波器被用于探测器和泵浦的光束路径以提供相应功率检测的隔离。

[0121] 图 10 示出了对表 4 所列的所有光纤 301-305 在探测器波长处测得的光暗化损耗。曲线 301 对应具有低铝浓度和一些硼的光纤 301，给出最低的光暗化。光纤 302 中增大的铝（浓度）水平给出了如曲线 302 所示的稍高水平的光暗化。不含有硼的光纤 303, 304 和 305 具有与曲线 303, 304 和 305 所示相似但更高的光暗化。表 4 还给出了所有的控制参数，包括预成型件进给率 V<sub>f</sub> 和控制率 V<sub>d</sub>。

[0122] 图 10 示出了光暗化损耗最初随积累的泵浦时间增大而随后对于较大值的积累的泵浦时间趋于平稳在饱和值处。例如，曲线 305 的光暗化损耗的饱和值为约 7dB/m。从例如图 10 所示的曲线（另参见图 11-12）可以估计光暗化损耗的饱和值，因为光暗化损耗的渐进值作为积累的泵浦时间的函数。在图 10 所示的一些情况（例如，曲线 301），光纤的光暗化损耗到测量结束（例如，60,000 秒的积累泵浦时间）明显还没有达到饱和值。对于所述情况，饱和值可利用数值和 / 或分析技术从实验数据（例如，图 10-12 中所示的曲线）进行估算以确定该数据的渐进值或平稳值。在一些情况，光暗化损耗的饱和值在探测波长（例如，675nm）或超过探测波长范围进行测量（或估算），并且在另一波长（或波长范围）的光暗化损耗的饱和值至少部分根据所测得的光暗化数据（例如利用外推技术）进行确定。在一些情况，在光纤的发射波长（例如，约 1.05  $\mu\text{m}$ ）处的光暗化损耗的饱和值利用探测波长数据进行估算。

[0123] 为了确定不同控制条件对光暗化的影响，预成型件在不同控制条件被拉制成光纤。不同光纤的不同控制条件和特性在下文的表 5 中总结并在图 11 中示出了测试结果。图 11 中所示的曲线 310-314 对应于表 5 中所列的光纤 310-314。

[0124] 表 5

[0125]

光纤拉制 ID	单模截止波长 WL ( $\mu\text{m}$ )	V @ 0.688 $\mu\text{m}$	硼流率 (sccm)	铝浓度 (g/100ml)	包层直径 (mm)	Vd (m/min)	温度
310	0.71±0.06	2.48	0	12	125	8	2100
311	0.71±0.06	2.48	0	18	125	70	2200
312	0.71±0.06	2.48	0	24	125	47	2100
313	0.71±0.06	2.48	0	12	125	34	1950
314	0.71±0.06	2.48	0	18	125	135	2100

[0126] 注:对于表 5:3.6g Yb/100ml 的掺杂溶液,固结温度是 1200C

[0127] 从表 5 和图 11 可以看到,在一些实施例中,较低的拉制率和较高的拉制温度有利于低水平的光暗化。通过控制拉制条件可实现光暗化的显著降低,在一些情况超过一个级数。

[0128] 利用表 5 所述的光纤 313 还可以研究在不同光纤温度下的光暗化。结果在图 12 中示出。曲线 320 和 321 是分别对于 113 和 22 摄氏度的温度。对温度有较弱的依赖性,在较高温度下具有稍微更低的光暗化。这对于高平均功率光纤激光器可能是有益的,其中纤芯温度预计要高于周围温度。还测量了光暗化损耗的光谱并在图 13 中示出。对光纤 313 在 22 摄氏度的温度下测量了光谱。在本示例中在  $\sim 1 \mu\text{m}$  的损耗明显小于在探测波长的损耗。

[0129] 作为示例,在不同的实施例中,由光暗化导致的损耗在发射波长(例如,  $1.05 \mu\text{m}$ )可小于约 10dB/m,并且在泵浦波长(例如,  $0.976 \mu\text{m}$ )具有至少约 1000dB/m 的峰值吸收。在一些示例中,在高泵浦功率和高反转能级作业期间可获得低光暗化。一些实施例包括光纤,所述光纤具有包括石英、磷、和铝的高度稀土掺杂的玻璃。在不同的实施例中,泵浦波长可以在从约  $0.9 \mu\text{m}$  到约  $1.0 \mu\text{m}$  的范围内。在一些实施例中,泵浦波长可在从约  $0.91 \mu\text{m}$  到约  $0.99 \mu\text{m}$  的范围内。在一些实施例中,泵浦波长可在从约  $0.97 \mu\text{m}$  到约  $1.03 \mu\text{m}$  的范围内。在一些实施例中,发射波长可在从约  $0.95 \mu\text{m}$  到约  $1.2 \mu\text{m}$  的范围内。在一些实施例中,发射波长可在从约  $1.0 \mu\text{m}$  到约  $1.1 \mu\text{m}$  的范围内。在其它实施例中,在发射波长的光暗化损耗的饱和值可小于约 1dB/m,小于约 5dB/m,小于约 15dB/m,小于约 20dB/m,或小于约 30dB/m。在光纤的其它实施例中,饱和光暗化损耗的其它值是可行的。

[0130] 在提供减少的光暗化的不同实施例中,光纤可包括约 0.5-15mol% 的铝浓度和小于约 30mol% 的硼(浓度)。在一些实施例中可以不包括硼,或采用非常少量的硼浓度,例如 0.01mol% -1mol%。在一些实施例中,光纤可包括 1-10mol% 铝,5-25mol% 硼,并且优选 5-10mol% 铝和 5-15mol% 硼。拉制条件从约 1900 至 2200 摄氏度变化并且拉制率(拉制速度)小于约 50m/min。在不同的实施例中,拉制温度的优选范围可以是约 2000-2150 摄氏度并且拉制率(拉制速度)小于约 10m/mins。

[0131] 本文披露的是磷硅酸盐(磷硅)光纤的不同实施例,所述磷硅光纤可包括 10-30mol% 的磷,小于约 25mol% 的硼,0.5-15mol% 的铝,并且还可包括约 0.01-15mol% 的镱。

[0132] 在本文所述的一些实施例中,高度稀土掺杂的光纤可包括磷硅酸盐(磷硅)玻璃,并且所述磷硅玻璃可包括至少约 10mol% 的  $\text{P}_2\text{O}_5$ 。

[0133] 本文所述的不同实施例可包括光纤,所述光纤包括:石英;浓度为至少约 0.5mol%的稀土掺杂剂;和磷,所述光纤可被设置成所述光纤在高泵浦功率和高反转能级作业期间在发射波长的光暗化损耗不大于约 10dB/m。

[0134] 上述示例示出了高度稀土掺杂的镱光纤。在一些实施例中,可采用其它的稀土掺杂剂,并且提供其它的发射波长。几个示例包括:光纤具有约 0.01-15mol%镱,约 0.001-2mol%铟,约 0.01-15mol%镱和约 0.001-1mol%铟,约 0.01-15mol%铟。

#### [0135] 示例激光器和放大器实施例

[0136] 磷硅增益光纤可被用于激光放大器、光纤激光器、或其组合。增益光纤还可被用于结合增益开关、Q 开关或锁模激光器结构的任何组合的系统。例如,高峰值功率激光系统的一部分可包括一实施例,所述实施例具有高度稀土掺杂的磷硅增益光纤作为体放大器的种子源的一部分,其中所述种子源能量为至少 10  $\mu$  J,或至少 100  $\mu$  J。在不同的实施例中,增益光纤可用于光纤放大器系统,所述光纤放大器系统产生输出脉冲,所述输出脉冲的脉冲宽度在约 100fs-100ps,100fs- 几纳秒,10ps- 几纳秒,10ps-100ns 的范围内或不同的其它范围内。增益光纤可用于具有频率转换器的系统中,所述频率转换器例如是二倍频器,三倍频器,四倍频器,五倍频器,用于多色光纤激光器结构,被设置成单独或与任何类型的移频器(包括拉曼频率转换器)结合使用。

[0137] 在下文的一些示例实施例中,一般优选相对于传统的镱光纤(例如, Yb 掺杂在非磷硅玻璃中)具有减少的长度的高度掺杂光纤。例如,不同的实施例可利用至少一种磷硅光纤。通过所述光纤可获得增大的峰值功率和/或脉冲能量。不过,在光纤激光器和放大器的各种应用中,所述增大可能不总是希望的,并且减少的掺杂或传统的镱光纤(例如, Yb 掺杂在磷硅玻璃中)可能用至少一些下文的实施例适于实现适当的性能。

[0138] 下文的某些实施例可采用大芯径磷硅光纤作为增益介质,例如具有上述成分的 LCF,并且光纤长度在约几 cm- 几米的范围内,例如约 5cm-10m。可以选择光纤长度以提供峰值功率、平均功率、脉冲能量和重复率的任意合适的组合。例如,可使用长度非常短的光纤以形成多 GHz 光纤振荡器,提供比通过使用石英增益光纤可获得的更高的脉冲能量。

[0139] 图 14 表示一实施例,示出了法布里-珀罗(Fabry-Perot)光纤激光腔 1400。光纤激光器由激光泵浦 1401(例如,单模二极管激光泵浦)进行泵浦,所述激光泵浦 1401 通过波分复用耦合器 1402 连接至所述腔。啁啾光栅 1403(例如,啁啾光纤布拉格光栅)充当法布里-珀罗激光腔的第一端镜。在一些实施例中,光纤光栅 1403 可提供色散控制。在一些实施例中,光纤光栅 1403 产生负色散。在一些实施例中,优选将光栅色散选择成与其它腔构件的色散相比要大,以便提供在腔内孤子脉冲的振荡,如也在 Fermann 等人的美国专利 No. 5, 450, 427 中所讨论的,上述专利文献对于本文具体引用的主题和对于其披露的所有其它主题以其全文形式被结合入本文作为引用。掺杂光纤 1404(例如,磷硅 Yb 掺杂光纤)被设置成增益介质,具有足够高的 Yb 掺杂水平以提供高泵浦吸收,例如在泵浦激光器二极管峰值波长(例如:976nm)的峰值吸收为至少约 600dB/m,1800dB/m,或更高。在不同的实施例中,光纤光栅 1403 和掺杂光纤 1404 是非保偏的。可通过四分之一波片 1405、腔内偏振分束器(PBS)1406、和一长度的保偏(PM)无掺杂光纤 1407 完成所述腔。在不同的实施例中,无掺杂光纤可以是标准 PM 光纤,低非线性 PM 光纤,包括但不限于大芯径光纤或具有孔或空间(包括空气等)的光纤。还可以使用其它类型的光纤。第二腔镜包括半导体可饱和吸收

镜(SA)1408,例如在Fermann等人的美国专利7,088,756中所讨论的,上述专利文献对于本文具体引用的主题和对于其披露的所有其它主题以其全文形式被结合入本文作为引用。

[0140] 在一些实施例中,可以在SA1408前插入可选的偏光器(未示出),与保偏光纤1407的轴线中的一个对齐。尽管图14示出了SA镜1408直接对接耦合至无掺杂光纤1407,在无掺杂光纤1407和SA1408之间还可以包括准直镜和聚焦透镜以调节SA1408上的光斑尺寸。如图14所示,对于本实施例的激光器有两种可能的输出,例如输出1和输出2。在一些实施例中,输出2是优选的。自输出2的输出可通过调节四分之一波片进行调节。输出1由啁啾光纤光栅1403的反射率确定。在一些实施例中,输出1可通过运用高反射率光纤光栅使之最小化。多种其它的结构是可行的,包括没有块状(体)光学偏振或非偏振部件的整体设计,例如在Fermann等人的美国专利No.6,072,811中所述,上述专利文献对于本文具体引用的主题和对于其披露的所有其它主题以其全文形式在此被结合入本文作为引用。在不同的实施例中,通过将输出1耦合入光纤可以以光纤形式获得输出。在不同的实施例中,可以利用标准全光纤波分复用耦合器表现所述结构。

[0141] 图14中所示的腔设计可被称为扭转腔。从左侧穿过PBS1406的光被线性偏振并且四分之一波片1405随后被用于从啁啾光栅1403反射后将偏振态转成椭圆偏振态,允许在PSB1406处输出耦合,产生输出2。由于具有适当高度掺杂Yb光纤的掺杂非PM光纤1404和非PM光纤光栅1403的组合长度可以短到几厘米,可提供整个结构的环境稳定性。本文所述的扭转腔具有至少三个有益的特征。例如,第一个优势是通过调节四分之一波片1405以产生大级别的输出耦合(例如, $>50\%$ ),可以构造较长的腔以允许高能量脉冲的振荡。这遵循由于高能量脉冲仅出现在短长度的掺杂光纤中,而在长的非掺杂光纤中脉冲能量低。扭转腔设计的另一个优势是在系统中完全消除了PM到PM接合,这可以使无掺杂光纤1407的两个偏振轴之间的相干相互作用最小化,例如,当两个偏振轴之间的群速度走离长度变得与脉宽相当时,相干极化相互作用可在激光输出功率中产生波动,例如在Fermann等人的美国专利No.7,088,756中所讨论的,上述专利文献对于本文具体引用的主题和对于其披露的所有其它主题以其全文形式在此被结合入本文作为引用。扭转腔设计的第三个优势是通过在腔内选择短长度的掺杂光纤,可以使脉冲和掺杂光纤之间的任何非线性相互作用最小化。结果,在输出2处可以从偏振分束器提取近带宽极限脉冲或稍微偏负的啁啾脉冲。相反的,通过光纤光栅传输并提取作为输出1的脉冲可以是正啁啾的并且是关于远离带宽极限的两个因素中的一个,如下文进一步解释。

[0142] 在扭转腔的一个实施例中,啁啾光纤光栅1403可具有的色散为 $-20\text{ps}^2$ ,中心波长为1037nm,和带宽为0.20nm;掺杂光纤峰值吸收可以为约3600dB/m,而增益光纤的长度可以是约10cm。无掺杂光纤长度1407可以是约10m。所有的光纤可以是单模的并且可具有 $6-7\mu\text{m}$ 的纤芯直径。在不同的实施例中,还可使用其它长度和类型的光纤。在10MHz的重复率,振荡器可产生10ps带宽极限脉冲,具有的脉冲能量可达到3nJ。在一些实施例中,通过结合低非线性光纤,例如具有较大纤芯直径的光纤,可获得更大的脉冲能量。例如,在一些实施例中,当无掺杂光纤1407用约30m长的无掺杂PM泄漏信道光纤代替,用约 $1500\mu\text{m}^2$ 的模面积代替1407(的模面积)时,对于约10ps近带宽极限的脉冲在重复频率为约3MHz下可获得脉冲能量为约30nJ的脉冲。扭转腔设计不同实施例可以通过长度在约100m-约5m之间的相应无掺杂光纤在约1MHz-20MHz之间的重复频率提供皮秒脉冲生成。在不同的

实施例中,通过利用较长长度的无掺杂光纤 1407 可产生较低重复频率的脉冲。

[0143] 图 14A 示出了法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 光纤激光腔 1400 的另一实施例。图 14A 中所示的实施例也可被称为双扭转腔设计。图 14A 所示的激光腔包括耦合至无掺杂光纤 1407 的一端的偏振旋转器 (例如,法拉第旋转镜) 1409。偏振旋转器 1409 以回复反射方式旋转偏振态 90 度。结果,从偏振旋转器反射的振荡光被引导朝向耦合至 PBS 1406 的可饱和吸收器 1408。在从可饱和吸收器 1408 反射后,光传播通过无掺杂光纤 1407 朝向偏振旋转器 1409 并且在从偏振旋转器 1409 第二次反射后传播通过无掺杂光纤 1407 朝向掺杂光纤 1404。因此,每次往返通过所述腔光传播通过无掺杂光纤 1407 四次。所述腔设计在构造低重复率锁模振荡器中可能是有优势的,所述振荡器例如在重复率为 100kHz-10MHz 之间并优选在 500kHz-5MHz 的范围内工作的振荡器。由于每次往返通过所述腔光传播通过无掺杂光纤 1407 四次,可以使用较短长度的无掺杂光纤 1407。例如,对于在重复率为 1MHz 下工作的腔,无掺杂光纤 1407 的长度可以为约 50m。在不同的实施例中,无掺杂光纤 1407 可由低非线性光纤构造,包括但不限于大芯径光纤、光子晶体光纤或泄漏信道光纤,具有孔或空间包括空气的光纤等,以获得可能更高的脉冲能量。上述低非线性光纤可能比较昂贵。由于双扭转腔设计采用较短长度的无掺杂光纤 1407,在其中无掺杂光纤 1407 包括上述低非线性光纤的实施例中采用双扭转腔设计可能是有优势的。在不同的实施例中,偏振旋转器 1409 可减少或基本阻止偏振漂移并因此允许在腔内使用非保偏光纤。相应的,耦合至 PBS 1406 的四个端口的光纤 1410a-1410d 可包括单模光纤,从而使得在制造上更容易。在不同的实施例中,可以通过使用接合或拉锥技术使单模光纤 1410a 和无掺杂光纤 1407 连接,使得光纤激光腔是紧凑的和 / 或易于制造。

[0144] 本文所述的振荡器可被结合作为高功率 ps 放大器的前端,如图 15 所示。例如,振荡器 1500 可以类似于针对图 14 所述的振荡器。在图 15 所示的实施例中,振荡器通过隔离器 1501 与增益光纤 1502 (Yb 掺杂的增益光纤) 隔离。在一些实施例中,增益光纤 1502 可包括镱掺杂的磷硅光纤。在一些实施例中,增益光纤 1502 可包括大芯径光纤,例如泄漏信道光纤。在一个实施例的实施中,增益光纤 1502 具有约 5m 的长度并提供约 1200dB/m 的峰值吸收。在不同的实施例中,在 Yb 光纤 1502 中放大后可提供多元件频率转换级 1504,用于三倍频、四倍频和五倍频。在一些实施例中,频率转换级 1504 可以接收来自泵浦源 1503 的泵浦信号。在图 16 中示出了光纤放大器中单个脉冲的频率增宽量作为光纤放大器中非线性相位延迟的函数。这里,上部曲线 322 表示当在输出 1 处取振荡器输出时引起的增宽量,而下部曲线 323 表示当在输出 2 处取振荡器输出时引起的增宽量。在一些实施例中,可能引起小于  $\pi$  的光纤内的非线性相位延迟。在输出 2 处取输出可产生比在输出 1 处取输出窄 3-4 倍的脉冲谱。由于三倍频对近带宽极限的脉冲最有效,此外它还可有利于将光纤放大器内的非线性相位延迟减少至小于  $\pi$ 。在孤子光纤激光器的一些实施例中,其中主要的色散由光纤光栅提供,最佳的是使信号脉冲从光栅反射的点和信号脉冲从输出耦合器提取的点之间的腔内传播长度最小化。在一些实施例中,该长度被称作提取长度。在一些实施例中,当提取长度对应于腔内往返长度时脉冲质量可能会较差。在一些实施例中,提取长度小于腔内往返长度的一半并优选小于腔内往返长度的四分之一。

[0145] 图 17 表示示例实施例 1700,示出了光纤 ps 放大系统,其中应力导引光纤 (SGF) 1701 中的非线性光谱展宽和随后的色散补偿 (D. C.) 1702 用于脉冲压缩。图 17 所示

的实施例还包括种子源 1703 和一个或多个泵浦源 1704a 和 1704b。种子源 1703 和一个或多个泵浦源 1704a 和 1704b 的输出被耦合入增益光纤 1705。在一些实施例中,增益光纤 1705 可包括镱掺杂的磷硅光纤。在一些实施例中,可将偏振控制器 (P. C.) 1706 设置到所述系统。

[0146] 应力导引光纤和不同的示例披露于申请日为 2008 年 8 月 28 日、发明名称为“玻璃大芯径光纤 (Glass Large-Core Optical Fibers)”的 PCT 国际专利申请 no. PCT/US2008/074668 的至少段落 [0205]-[0221] 和相应的附图 28-30 中,对于本文具体引用的主题和对于其披露的所有其它主题上述引用以其全文形式在此被结合入本文。应力导引一般是由于不同的热特性导致折射率的局部差异而引起的。图 17A 中示出了泄漏信道光纤的端视图。例如,在泄漏信道光纤中,可能出现结构 1752 和第一包层材料 1753 的折射率的不同。在一些实施例中,折射率调制被调整成不同包层结构的尺寸和 / 或间距以及材料的热膨胀系数的函数。通过折射率调制,可以在纤芯区域 1751 的一部分内导引模式,并且可发射输出光束,所述输出光束具有的模(式)大小的尺寸明显小于纤芯尺寸  $2\rho$ 。应力导引光纤和示例将在下文进一步讨论。

[0147] 图 17 的放大系统被构造成如图 15 所讨论的。在图 17 所示的实施例 1700 中,可使用星形耦合器 1707 将泵浦和信号光传送入光纤放大器。星形耦合器和其它耦合器的使用已经披露,例如在 Dong 等人的美国专利 No. 7, 016, 573 中,对于本文具体引用的主题和其披露的所有其它主题上述文献在此以其全文形式被结合入本文作为引用。在一些实施例中星形耦合器与泄漏信道光纤一起使用可能是有优势的,因为可获得近衍射极限的输出,而不需要使星形耦合器的信号臂中的模大小匹配泄漏信道光纤中的模大小。星形耦合器的使用可允许全光纤泵浦结构。一些实施例中,可以使用其它类型的耦合器。

[0148] 一些实施例中,还提供了真单模光纤或近单模光纤(例如,少模光纤)以展宽在放大器系统中产生的 ps 脉冲谱。在本示例中,单模光纤是无掺杂的。选择单模光纤的长度以便允许通过自相位调制实现显著的光谱展宽。可以选择  $1x\pi$  到  $50x\pi$  之间的自相位调制值。为了适应大脉冲能量,优选具有大芯面积的单模光纤。在一个或多个应力导引光纤中进行频率展宽后,光栅对可用于脉冲压缩。可替换的,棱镜对、棱栅对或啁啾反射镜可被设置用于色散补偿,其中色散补偿元件的合适组合还允许更高阶色散补偿。与其它大芯径光纤结构不同,应力导引光纤可被设计成提供模态面积可达到  $5000\mu\text{m}^2$  或更高的真单模工作,这意味着模态传播是对齐不敏感并且非常稳固的。在一些实施例中,非线性光谱展宽可能对对齐是敏感的并因此在没有真单模大芯径光纤的情况下可能难于实施。通过所述应力导引光纤,10-20ps 脉冲可被易于压缩成亚 ps 脉冲。

[0149] 除了 ps 光纤前端外,基于固态激光器的 ps 源也可以在应力导引光纤中被非线性脉冲压缩。例如,通过合适的色散补偿元件在应力导引光纤中利用非线性光谱展宽可以将薄盘固态振荡器从约 1ps 脉冲压缩到约 10fs。应力导引光纤用于非线性脉冲压缩可简化高平均功率 fs 激光器的结构并且对于在微加工(例如半导体和晶圆加工)中应用可能是理想的。

[0150] 在上述的示例中,无掺杂应力导引光纤用于非线性体系以供光谱展宽是有优势的。在一些实施例中,至少一部分应力导引光纤可包括有源、高度掺杂的磷硅玻璃作为增益介质,并且可选择性地提供缩短的光纤长度并增大非线性阈值。例如,可在有源部分中进行

短的高峰值功率脉冲（例如，ps 脉冲）的线性脉冲传播，所述短的高峰值功率脉冲具有近衍射极限的模式，但具有远小于纤芯直径的约 80% 的  $1/e^2$  直径。

[0151] 图 18 表示另一示例实施例，示出了高能量光纤激光腔 1800。实施例 1800 包括构成腔的一端的可饱和吸收器 1801 和构成腔的另一端的啁啾反射镜对 1802。在一些实施例中，啁啾反射镜对 1802 可用于色散补偿。图 18 所示的实施例还包括由泵浦源 1804 泵浦的增益光纤 1803。在一些实施例中，增益光纤 1803 可包括镱掺杂的磷硅光纤。在一些实施例中，泵浦源可通过一段长度的单模光纤 1805 耦合至增益光纤 1803。一些实施例可另外包括偏振控制器 1806。图 18 所示的设置与图 14 所示的设置相比的一个优势是，啁啾反射镜的群延迟和振幅纹波小于啁啾光纤光栅的群延迟和振幅纹波，因此与图 14 的设置相比通过图 18 的设置可获得更平滑的脉冲谱。在一些实施例中，通过利用两个匹配的啁啾反射镜用于色散补偿可以使反射镜中的群延迟纹波最小化。此外，可以设置高度 Yb 掺杂的光纤，所述光纤可以增大可能的脉冲能量。通过 Yb 掺杂水平提供峰值吸收，例如 1000dB/m, 2500dB/m, 5000dB/m, 或达到约 9000dB/m, 在激光腔内可使用非常短的 Yb 光纤。因此，腔内 Yb 光纤长度可以是约 3cm 或更短。在一些实施例中，高度掺杂的光纤可包括磷硅光纤，所述磷硅光纤可用作增益光纤。在一些实施例中，激光输出是通过 Yb 光纤右侧上的直劈 (cleave) 提取的，提供 96% 的输出耦合。在腔内既可使用通常的单模 Yb 光纤也可使用大模 Yb 光纤例如泄漏信道光纤。当使用单模 Yb 光纤时，泵浦可从通过耦合器耦合至腔的二极管激光器在 976nm 下发射传送。可替换的，在 976nm 下发射的单模光纤激光器（如下文所述）还可被用作泵浦源。此外，在一些实施例中，还可以设置光学带通滤波器 F 以及由偏振器和四分之一及二分之一波片构成的偏振控制器 (P. C.)。在一些实施例中，通过啁啾反射镜对 1802 中的反弹次数可以调节腔的色散。

[0152] 在一些实施例中，当使用泄漏信道光纤时，还可使用包层泵浦通过 Yb 光纤的右侧。

[0153] 因为泄漏信道光纤是多模的，将真单模光纤接合至泄漏信道光纤用于模态滤波是有优势的。所述用于多模光纤的模态滤波例如披露于 Fermann 等人的美国专利 No. 6, 275, 512, 上述专利文献对于本文具体引用的主题和其披露的所有其它主题以其全文形式在此被结合入本文作为引用。此外，高效率系统的一个实施例披露于发明名称为“玻璃大芯径光纤 (Glass Large-Core Optical Fibers)”的 PCT 国际申请 no. PCT/US2008/074668 中，其 PCT 公开号为 No. WO 2009/042347, 其中市场上可买到的单模光纤通过熔融耦合耦合至  $40\ \mu\text{m}$  的芯 LCF, 导致在基模能量中小于约 3dB 的损耗。由于泄漏信道光纤可具有大模面积 ( $1500\ \mu\text{m}^2$  和更大的量级), 可以选择具有大模面积的合适的单模光纤例如应力导引光纤用于模态滤波 (滤模)。在示例实施例中, 将模面积为  $5000\ \mu\text{m}^2$  的 0.3m 长的应力导引光纤接合至 0.70m 长的双包层 Yb 泄漏信道光纤。在 1030nm 的整个往返光纤色散随后被计算为  $40,000\text{fs}^2$ 。通过具有每个色散为  $-2,500\text{fs}^2$  的镜的啁啾反射镜对, 利用 10 次反射镜程 (通过) 产生  $-50,000\text{fs}^2$  的色散, 这足以用于色散补偿。激光器随后可产生脉冲能量可达到 50nJ 的高斯 (Gaussian) 形脉冲, 对应于 80MHz 的 4W 的平均功率。通过减少在啁啾反射镜上的反弹次数允许在腔内的正色散可以实现更高的脉冲能量。还可以利用例如赫里奥特多 (长) 程池 (Herriott multi-pass cell) 通过降低振荡器的重复频率来实现更高的脉冲能量, 其中赫里奥特多 (长) 程池可包括在啁啾反射镜和用于可饱和吸收器的聚焦透镜之间。

参见例如 Cho 等人的“Low repetition rate high peak power Kerr-lens mode-locked Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser with a multiple-pass cavity”, Opt. Lett. Vol. 24, pp. 417-419 (1999)。除了赫里奥特池 (Herriott cell) 外,还可以使用任何其它类型的多次通过 (多程) 池。通过赫里奥特池的添加,可减小腔内光纤长度同时保持激光器的重复频率不变。转而,这减小了腔内的非线性相互作用长度,使可能的脉冲能量最大化。

[0154] 图 19 表示示例实施例 1900, 示出了非常高的重复率的振荡器。在一些实施例中,振荡器被设置成在 500MHz-100GHz 之间的重复率下工作并优选在 10GHz 左右的重复率。使用了法布里-珀罗腔 (Fabry-Perot cavity), 腔的一端由可饱和吸收器反射镜 (SA) 1901 端接, 而另一端具有旋转接合 (器) 1902。可饱和吸收器反射镜 1901 可基于半导体、碳微管、或石墨烯。吉尔-图洛 (Gires Toumois) 反射镜或任何其它的色散反射镜 1903 可以直接涂覆在旋转接合 1902 内的腔内光纤端部用于色散补偿。可替换的, 还可以设置色散可饱和反射镜。在一些实施例中, 可以对振荡器 1900 设置光纤拉伸器 1904。光纤拉伸器 1904 可用于稳定振荡器的重复率。在一些实施例中, 光学振荡控制器 1905 可包括在振荡器 1900 中。激光振荡器 1900 还可包括泵浦源 1906, 所述泵浦源 1906 通过单模光纤 1907 连接至腔。

[0155] 在一些实施例中, 耦合至可饱和吸收器反射镜 1901 的光纤的一端可被防反射涂覆, 以减少来自可饱和吸收器反射镜和光纤端部之间的法布里-珀罗效应的任何反射率调制。可替换的, 通过应用楔形光纤端或楔形光纤端和防反射涂膜的组合还可减少法布里-珀罗效应。在不同的实施例中, 可将可饱和吸收器反射镜 1901 安装在压电元件上, 以允许快速调制可饱和吸收器反射镜 1901 和光纤端部之间的距离从而可以控制重复率。在不同的实施例中, 可以朝向或远离光纤的端部在约 0.5  $\mu\text{m}$  和约 5  $\mu\text{m}$  之间移动可饱和吸收器反射镜 1901。例如, 在某些实施例中, (例如, 在温度控制的环境中) 约 1-2  $\mu\text{m}$  的反射镜移动足以控制重复率。在不同的实施例中, 可以改变可饱和吸收器反射镜 1901 和光纤的端部之间的距离, 而不会对锁模造成不利的影响。在不同的实施例中, 其它控制重复率的技术可用于替代本文所述的技术或与本文所述的技术相结合。例如, 电控振荡器重复率的技术也可以用于本文所述的不同实施例, 所述电控振荡器重复率的技术披露于 Hartl 等人的发明名称为“Laser Based Frequency Standards and their Applications (基于激光的频率标准及其应用)”的美国公开 No. 2007/0086713A1, 和 Fermann 等人的发明名称为“Pulsed Laser Sources (脉冲激光源)”的美国专利 No. 7190705, 上述专利文献对于本文具体引用的主题和每篇文献所披露的所有其它主题以其全文形式在此被结合入本文作为引用。

[0156] 图 20 表示另一示例实施例 2000, 示出了非常高重复率的振荡器。这里, 微结构光纤 2005 被用于色散补偿。所述微结构光纤披露于申请日为 2007 年 3 月 27 日、发明名称为“Ultra high numerical aperture optics fibers (超高数值孔径光纤)”的美国专利申请 No. 11/691, 986 ('986 申请), 其美国公开号为 2008/0240663, 美国专利号为 7, 496, 260, 上述专利文献的每一篇对于本文具体引用的主题和每篇所披露的所有其它主题在此以其全文形式被结合入本文作为引用。微结构光纤 2005 可具有大到 1000  $\text{fs}^2/\text{cm}$  的反常色散; 因此短长度的所述光纤可用于补偿正常色散光纤的色散。这里, 泵浦源 2007 的泵浦光通过单模光纤 2001 和旋转接合 (器) 2002 被传送至腔, 所述旋转接合器 2002 被连接至光纤 2003, 所述光纤优选构成增益光纤并用稀土掺杂剂高度掺杂。低色散二向色镜可在旋转接合器 2002 内被直接涂覆到单模光纤侧或掺杂光纤侧上以便传输泵浦光并对信号光提供高反射率。可



以将用于泵浦光的二向色镜的反射率选择在例如 50%–99% 的范围内。光纤 2003 可具有正常色散,所述正常色散由微结构光纤 2005 的负色散补偿,这具有如'986 申请所述的设计。为了使光纤 2005 和光纤 2003 之间的接合损失最小化并且还密封微结构光纤 2005 的端部,可以使用光纤 2004,所述光纤 2004 接合在光纤 2003 和光纤 2005 之间并且还在光纤 2005 的另一端处。光纤 2004 随后被对接耦合至可饱和吸收器反射镜 2006。优选光纤 2004 的长度是非常短的,以便能够在高重复率下工作。光纤 2004 还可具有正常色散。光纤 2003, 2004 和 2005 的其它结构也是可行的并且可设置多于三种的不同光纤。在一些实施例中,光纤 2003 可具有 5mm 的长度,光纤 2005 可具有 3mm 的长度,而光纤 2004 各可具有 1mm 的长度。腔的基本往返时间因此为约 100ps,对应于 10GHz 的重复率。在一些实施例中,光纤 2003 和 2004 的色散可以是约  $400\text{fs}^2$ ,而光纤 2005 可贡献的色散为约  $-600\text{fs}^2$ 。腔的总体负色散可允许 100–300fs 脉冲的稳定振荡。在不同的实施例中,腔内损耗主要由接合损耗控制,所述接合损耗可低至 0.5dB/每接合。由于每单位 (unity) 长度的大增益,即使 2dB 的腔内损耗可由 5mm 长的大量 (高度) 稀土掺杂的磷硅酸盐 (磷硅) 光纤补偿。如下文进一步所解释的,5mm 长的大量 (高度) Yb 掺杂的磷硅光纤在 1027nm 可具有至少约 0.5dB/cm 并可达到约 5–10dB/cm 的增益。

[0157] 除了具有正常色散稀土掺杂和无掺杂微结构光纤的腔内结构外,可提供稀土掺杂的微结构光纤。不过,即使所述掺杂的微结构光纤优选在端部处密封以便提供长期可靠的工作。在一些实施例中,对于快速重复率控制,可将短长度的光纤粘接至电缩或磁缩元件。在一些实施例中,可以设置如还结合图 19 所述的光纤拉伸器,以稳定重复率。

[0158] 作为色散补偿的另一种替换,可设置啁啾光纤光栅。啁啾光纤光栅可被制造成具有约 5,000–15,000 $\text{fs}^2$  的色散、约 1% 的反射率,这允许构造在若干 GHz 的重复率下工作的光纤激光器。光纤用单模泵浦二极管在 976nm 的波长下经由光纤耦合器和单模光纤进行泵浦,所述单模光纤对接耦合至腔内光纤。在光纤耦合器之后可提取振荡器输出。在不同的实施例中,腔内光纤在两点处粘接至光纤拉伸器以允许重复率控制。光纤拉伸器可以是基于电缩或磁缩材料的。为了使光纤激光器能够在单偏振状态工作,如果在一次往返后重现光纤偏振是有优势的。否则可能出现偏振不稳定,这可能导致偏振状态从一次往返变化到下一次往返。对于几厘米的腔长度,因此还可设置偏振控制器。在一些实施例中,偏振控制器可由一个、两个或三个压电传感器构成,所述压电传感器可从不同角度向光纤的侧面施加压力。

[0159] 在 GHz 重复率的 Yb 光纤激光器的一个实施例中,可以使用峰值吸收为约 3600dB/m 的 Yb 光纤。Yb 光纤具有约  $400\text{fs}^2/\text{cm}$  的色散。Yb 光纤长度为 6cm 并且色散为  $-13,000\text{fs}^2$ 、反射率为 4% 的啁啾光纤光栅被用于色散补偿。因此,总腔色散为约  $-8000\text{fs}^2$ 。在 SA 镜之前还插入腔内 polarcor 膜偏振器 (偏振膜) (在图 19 中未示出) 以选择一个单偏振态。此外,设置了两个透镜光学成像系统,将 Yb 光纤的输出成像到 SA 镜上 (也未示出)。偏振还可通过扭转腔外的光纤输出光纤进行控制。由于光纤组件的刚性,光纤扭转可被传输至腔内光纤并且可因此匹配腔内偏振态,减少对腔内偏振器的需要,也如同所证实的。激光器在重复率为 1GHz 下产生约 250fs 脉冲,输出功率为 100mW。

[0160] 对于在重复率为 10GHz 下工作的激光器,可以使用约 1cm 长的腔内光纤。作为一个示例,高度掺杂的光纤,例如本文所述的 Yb 掺杂的磷硅光纤,可以在 1025–1030nm 的波长

区域具有至少约 0.5-10dB/cm 的单程增益,并且在双程中增益可达到 1-20dB/cm。因此,即使对于仅 1mm 的腔长度,可实现 1-2dB 的往返增益,这允许在 100GHz 重复率下进行被动锁模工作,具有小于约 0.3dB 的往返腔损耗。对于 Er-Yb 掺杂的磷硅光纤,在 1530nm 的往返增益可高达 10dB/cm,这也允许具有可实现的腔内损耗的在 50-100GHz 重复率下的被动锁模工作。根据腔内色散和可饱和吸收器特性,从所述振荡器可以获得 100fs 至达到几 ps 级的脉冲宽度。

[0161] 图 21 表示示例实施例 2100,示出了高重复率光纤频梳激光器。系统使用的振荡器 2101 可以类似于结合图 19 所述的振荡器。在放大器 2103 之前或放大器 2103 之后或放大器 2103 内设置的高度非线性光纤 2102 中光谱展宽脉冲。放大器 2103 可包括一段长度的增益光纤。在一些实施例中,增益光纤可包括镱掺杂的磷硅光纤。在放大器中放大后,在注入高度非线性超连续谱光纤 2104 之前脉冲被压缩,在所述光纤 2104 产生近倍频程超连续谱光谱。振荡器脉冲的重复率通过控制光纤长度或振荡器光纤温度进行控制并且载波包络偏移频率通过控制振荡器泵浦二极管的泵浦电流和可饱和吸收器温度进行控制。用于电控振荡器重复率和载波包络偏移频率的技术进一步披露于 Hartl 等人的发明名称为“Laser based frequency standards and their applications(基于激光的频率标准及其应用)”美国专利公开号 No. 2007/0086713A1,和 Fermann 等人的发明名称为“Pulsed laser sources(脉冲激光源)”的美国专利 No. 7190705,上述文献的每一篇对于本文具体引用的主题和每篇所披露的所有其它主题在此以其全文形式被结合入本文作为引用。所述多个 GHz 重复率的光纤频梳源对于在频率计量学、光谱学、尤其是傅里叶变换光谱学、和波分复用中的许多应用是理想的,因为可以将光纤频梳激光器的输出选择在光纤通信的 ITU 栅极上。一些实施例可包括偏振控制器 2105 和 / 或色散控制器 2106。

[0162] 在不同的实施例中,通过高度掺杂镱的石英光纤(例如磷硅光纤)实现的短腔长度可实现单频激光器。所述激光器可用短长度的有源光纤制成,所述短长度的有源光纤可以是几厘米,位于两个反射器之间,其中至少一个反射器仅在窄光谱宽度上进行反射。在一个实施例中,例如所述激光器可通过在两个光纤布拉格(Bragg)光栅之间接合有源光纤而体现。两个光栅可具有重叠的光谱特性并且一个光栅可具有较少的反射而另一个可具有高反射率。具有较少反射的光栅可用于输出耦合器的目的。这个结构被称为分布式布拉格激光器(DBR)。泵浦可通过光栅中的任何一个被耦合。可替换的设计是分布式反馈(DFB)设计。在这种情况下,光纤布拉格光栅被直接写入有源光纤,其中在光栅中还作了  $\pi$  相移。在一些实施例中,该相移可以是近中心的,但不必然如此。

[0163] 利用高度掺杂光纤得到的短的放大器长度对于产生高功率脉冲可提供很强的益处,这是由于非线性阈值的增大。在一些实施例中,双包层的光纤可用于放大器中,以便能够使用高功率多模泵浦激光器。不过,由于较小的泵浦和掺杂的玻璃重叠,包层泵浦可增大泵浦吸收长度。这可导致光纤放大器长度的增大。芯泵浦与在  $\sim 976\text{nm}$  利用高度掺杂光纤和高功率单模泵浦结合可以实现更短的放大器长度和因此从放大器的高的多的峰值功率生成。在  $976\text{nm}$  工作的高功率单模光纤激光器例如披露于 Rösler 等人的“94W 980nm high brightness Yb-doped fiber laser”, Optics Express, vol.16, pp.17310-17318, 2008。所述泵浦源可通过高功率光学隔离器与芯泵浦的放大器隔离。可替换的,二向色分束器可用于提供光学隔离。例如,在一些实施例中,在  $\sim 1030\text{nm}$  反射 ASE(HR1030)和在  $\sim$

980nm 透射 (HT980) 的二向色镜可被设置在 980nm 泵浦光纤激光器和镜光纤放大器之间呈不垂直于 980nm 光束的角度,以便将 ASE 与镜光纤放大器隔离。所述实施在图 22 中示出。这里,示出了由泵浦激光器 2201 (例如,976nm Yb 光纤 cw 振荡器) 泵浦的反向泵浦的 Yb 放大器。信号 (例如,1030nm 信号) 在一端被注入放大器 2203 并在另一端经由二向色分束器 2202 被提取。在一些实施例中,二向色分束器 2202 可以在信号波长 (例如,1030nm) 是高反射性的 (HR) 并在泵浦波长 (例如,976nm) 是高透射性的 (HT)。泵浦还可以通过相同的分束器 2202 被提供至放大器。在光纤泵浦激光器 2201 和光纤放大器 2203 之间可以插入多于一个的二向色分束器 2202,以便使得没有信号光泄漏入泵浦激光器,所述泵浦激光器可通过信号光被饱和。

[0164] 在一些实施例中,放大器 2203 可以足够长以便吸收大部分的泵浦光,以防止整个系统在泵浦波长产生激光。在一些实施例中,当通过利用二向色分束器在泵浦和信号之间提供高水平的隔离时,可以除去光纤泵浦激光器和光纤放大器之间的隔离器。在一些实施例中,例如泵浦激光器可在波长范围小于约 1030nm 下工作,例如在一些实施例中波长范围为从约 970nm 到约 1030nm。在一些实施例中,放大器可以在波长范围大于约 1030nm 下放大信号,例如在一些实施例中波长范围从约 1030nm 到约 1150nm。在一些实施例中,当泵浦激光器和放大器所工作的波长范围不重叠时,可以改动分束器 2202 以分离泵浦和信号波长。

[0165] 在不同的实施例中,利用单模光纤泵浦激光器泵浦单模光纤放大器是有优势的,如前披露于 Galvanauskas 等人的美国专利 No. 5, 847, 863, 该文献对于本文具体引用的主题和其披露的所有其它主题在此以其全文形式被结合入本文作为引用。在不同的实施例中,利用单模磷硅 Yb 光纤泵浦激光器用于泵浦 Yb 铝硅酸盐光纤放大器是有优势的,因为与铝硅酸盐光纤相比对于小于约 1030nm 的波长磷硅酸盐 Yb 光纤的增益截面更高。在不同的实施例中,大芯径光纤的芯泵浦可能有利于通过增益引导提高任何放大光束的模式质量,如披露于 Fermann 的美国专利 No. 5, 818, 630 中所述的一些实施例,该文献对于本文具体引用的主题和其披露的所有其它主题在此以其全文形式被结合入本文作为引用。

[0166] 在一些实施例中,大芯径光纤 (例如高度稀土掺杂光纤) 可被设置成提供高功率脉冲或 CW 泵浦源。所述源可向磷硅酸盐增益级或其它的光纤增益级提供泵浦能量。在不同的实施例中,可能开发磷硅酸盐 (磷硅) 光纤的高吸收效率用于一个或多个泵浦和信号放大。所述芯泵浦结构 (如下文所示例的) 可与基于磷硅酸盐的结构或石英增益光纤一起使用。

[0167] 在高功率光纤激光器的不同实施例中,可以使用通过多模泵浦二极管包层泵浦双包层稀土掺杂的光纤。包层泵浦允许使用高功率多模泵浦二极管。不过,如上文所指出,泵浦吸收的减少源于泵浦光和稀土掺杂的纤芯之间减少的重叠。因此,使用长的多的光纤以获得高功率。

[0168] 另一方面,可以对光纤进行直接芯泵浦,所述光纤可以短约一到两个量级。缩短的光纤长度使非线性阈值增大一到两个量级。不过,优选通过在几种模式工作的泵浦源或最优选在单横向模工作的泵浦源进行直接芯泵浦以使效率最大化。目前,市场可买到的单模泵浦二极管限于约 1W, 并从而限制了从直接芯泵浦可获得的输出功率。

[0169] 如果在单横向模下更高的泵浦功率被提供用于直接芯泵浦,可通过直接放大产生高功率光学脉冲,并可减少或消除对啁啾脉冲放大 (CPA) 和用于时域脉冲展宽和 / 或

压缩脉冲的相关部件的需要。可替换的,在利用 CPA 的不同实施例中,由包括光纤放大器的系统提供的峰值功率可以进一步增大,尤其是通过使用体压缩器以便压缩用光纤放大器放大的展宽脉冲。在不同的实施例中,例如利用磷硅光纤的实施例中,通过较短长度的光纤可以增大光纤输出处的峰值功率。

[0170] 图 23A 示意性地示出了在泵浦波长为约 976nm 下获得放大的单横向模泵浦束的结构。通过所述结构,泵浦可以 CW 或脉冲方式工作,并且可获得在几瓦到几千瓦范围内的泵浦功率。在本示例中,放大的泵浦源被注入高度稀土掺杂的光纤,并且相对于由种子产生的信号反向传播。所述泵浦结构可用于不同的光纤激光器和放大器,包括高功率光纤振荡器,或共同传播种子源,或其任何的组合。

[0171] 在本示例中,使用在波长为约 976nm 的多模泵浦二极管 (MM 泵浦) 2301 来泵浦双包层光纤 (DC 光纤) 2302。在一些实施例中,泵浦 2301 可被设置成在约 915nm 发射泵浦输出。两个光纤布拉格光栅 (FBG) 2303a 和 2303b 被直接写入稀土掺杂的 DC 光纤 2302。光栅 2303a 提供在 ~ 976nm 的高反射率 (HR),而光栅 2303b 被设置成输出耦合器 (OC)。成角度的劈 (cleave) 被用于光纤的两端以减少反射。

[0172] 在三级别增益峰值为 ~ 976nm 工作的泵浦激光器的两个元件是高逆的,以提供足够的增益,以及在更长的波长 (> 1010nm) 减小或最小化的反射以抑制更有效的四级系统的激光产生。内部光纤布拉格光栅减小或最小化四级系统的反射,并且提供相对于利用外部介质镜的结构的首选紧凑结构 (例如,披露于 Bouillet 等人 (Optics Express, vol. 16, 17891-17902, 2008) 和 Rösler 等人 (Optics Express, vol. 16, 17310-17318, 2008))。在一些实施例中,可使用外部介质镜 2304。介质镜 2304 可被设置成透射波长在 976nm-980nm 的范围内而反射波长在 1020nm-1100nm 的范围内。具有单横向模式在几瓦到几千瓦 (kW) 级别的泵浦激光器的输出可用于芯泵浦短的放大器光纤 2305,所述光纤 2305 的长度可以是约 1 厘米到几十厘米。可以产生平均功率为几瓦到几千瓦的高峰值功率光学泵浦脉冲。

[0173] 为了在 DC 光纤 2302 中实现优选的高逆级别,包括了小泵浦导引件以获得高泵浦强度。在至少一个实施例中,小泵浦导引件包括全玻璃双包层光纤,或空气包层双包层光纤,例如披露于 Dong 等人的申请日为 2008 年 8 月 28 日、发明名称为“Glass Large-Core Optical Fibers (玻璃大芯径光纤)”的 PCT 国际申请 no. PCT/US2008/074668, PCT 公开号为 WO 2009/042347,该文献对于本文具体引用的主题和该文献所披露的所有其它主题在此以其全文形式被结合入本文作为引用。

[0174] 图 23B 示出了制备的全玻璃双包层泄漏信道光纤,而图 23C 示出了制备的空气包层泄漏信道光纤。两种光纤可具有在 100-400  $\mu\text{m}$  外径尺寸范围内的泵浦导引件。图 23D 示出了与图 23C 所示空气包层泄漏信道光纤相似的光纤的扫描电子显微镜 (SEM) 截面。图 23E 示出了大芯径光纤的另一 SEM 视图,示出了大芯径多孔光纤的网尺寸。图 23F 示出了在空气包层泄漏信道光纤的一个实施例中模传播的分布图。

[0175] 参见图 23A,光纤 2305 可包括稀土掺杂的光纤或大芯径光纤。在至少一个实施例中,增益光纤包括大芯径磷硅光纤,具有至少约 1500dB/m 的高泵浦吸收和不大于几十米的长度。芯泵浦的光纤可以工作以产生在皮秒范围内具有至少几百微焦的脉冲能量的输出脉冲,而不需要使用脉冲展宽。许多其它的变形是可行的,包括相对于传统的 Yb (例如, Yb 掺杂在非磷硅酸盐玻璃) 掺杂的光纤激光器和 / 或放大器在功率和重复率上按比例向上增大

的变形。

[0176] 通过为无锆玻璃开发的已知技术,例如在室温下的高压载氢或在光栅写入前升高温度,可将磷硅光纤的镜掺杂纤芯制成光敏性的。

#### [0177] 应力导引光纤的示例

[0178] 如 PCT 国际申请 PCT/US2008/074668 所披露的,在一些实施例中披露了 LCF 和其它光纤,其中 PCT/US2008/074668 的发明名称为“Glass Large-Core Optical Fibers(玻璃大芯径光纤)”,申请日为 2008 年 8 月 28 日,公开号为 WO 2009/042347,该文献对于本文具体引用的主题和其披露的所有其它主题在此以其全文形式被结合入本文作为引用。进行了 LCF 折射率变化的测量,并且结果表明折射率变化值可由 LCF 光纤的不同特性引起,包括例如包层结构的尺寸和 / 或间距,包层和 / 或包层结构的热膨胀系数,等等。

[0179] 图 24 示出了 LCF 的折射率 2004 的已测量的二维图,示出了具有掺杂的中心部分 2403 和低折射率结构 2401 的芯 2402。围绕低折射率结构 2401 的区域 2404 具有增大的折射率。折射率增大可由石英和氟掺杂的石英的不同材料特性导致,尤其是由于不同的热膨胀系数  $\delta T$ 。由于光纤在高温下拉制,具有较高热膨胀系数的氟掺杂石英试图比周围的石英玻璃收缩更多。不过,这种收缩受到周围的石英限制。在室温下氟掺杂的石英在光纤中处于张力下而周围的石英处于压力下。由于应力光学效应,该应力明显地引起应力折射率指数的变化。

[0180] 由于结构和第一包层材料的热特性,在一些光纤实施例中可能出现折射率的局部变化。不过,在用 LCF 光纤的一些示例实验中观察到 LCF 导引机制。在一些情况,较大结构尺寸、排列、和结构的数量作为主要的机制提供 LCF 导引。

[0181] 在一些实施例中,结构尺寸和排列结构可以影响芯区域(或其它光纤区域)的折射率分布,例如增大折射率的相对变化。增大结构尺寸和间距(例如,提高整体尺寸)一般可导致更大的相对折射率变化(例如,更大的最大折射率调制)。由应力光学效应引起的净折射率变化可包括由附近结构贡献的补偿,并且在一些情况,最终结果取决于结构间距。例如,在一起间距较紧密的较小结构一般可产生减小的折射率调制。在不同的实施例中,可以预先选择结构尺寸和 / 或间距,以调整适应包层和 / 或芯区域的折射率分布。在一些实施例中,材料包括包层并且包层结构可以预先选择以调整适应包层和 / 或芯区域的折射率分布。例如,在一些实施例中,材料至少部分根据它们的热膨胀系数的值进行选择。在一些实施例中,包层结构可包括氟掺杂的石英而包层可包括石英。在其它的实施例中,可使用其它的材料,例如掺杂和 / 或无掺杂的玻璃。

[0182] 在不同的实施例中,其中如图 17A 所示的包层结构被设置在单层(例如,环)中, $d/\Lambda$  的值可在约 0.65-0.9,0.7-0.9,或 0.75-0.85 的范围内。在一些实施例中,至少第二层结构( $N \geq 2$ )可设置在包层结构 1752 外,并且在一些情况  $d/\Lambda$  的范围可以在约 0.3-0.9,0.4-0.8,0.5-0.7,或 0.5-0.8 的范围内。对于包层结构的层中的任意一层,可使用其它范围的  $d/\Lambda$ 。如果使用多于一层的包层结构,对于包层结构的每一层  $d/\Lambda$  的比率可以(但非必须)是不同的。

[0183] 如上文所指出的,结构尺寸和排列结构、材料热特性、和其它因素中的一个或多个(单个或不同的组合)可影响芯区域(或其它光纤区域)的折射率分布,例如增大相对变化。局部变化可导致折射率(非 PCF)导引。在一些实施例中,如果没有适当地考虑这个出

人意外的导引机制,所得到的输出模态可能偏离希望或预期的形状。当适当考虑时,折射率导引可能提供新的和令人感兴趣的导引机制用于 PCF。下文的示例示出了在 PCF 光纤的一个实施例中折射率调制对导引和模态分布的影响。

[0184] 制备了全玻璃 PCF,其中  $d/\Lambda = 0.35$  并且纤芯直径为  $47\ \mu\text{m}$ 。图 25A 示出了光纤的剖面 2500,而图 25B 示出了其折射率分布 2501。由于热特性的不匹配,围绕每个低折射率结构 2802 示出了低折射率结构 2502 沿着上升的折射率环 2504。凸起的折射率环 2504 还在芯 2503 中产生高折射率部分。一端长度的该光纤保持成直的,而输出模态在不同波长进行测量。图 28C 分别示出了在波长 780nm,800nm,910nm,980nm,1000nm 和 1100nm 的模态 2510,2511,2512,2513,2514 和 2515。由于较低波长截止的存在,PCF 导引朝向更短的波长变得更弱。示例光纤实施例在 780nm 以下不能很好地导引,给出最大常态纤芯直径  $2\rho/\lambda \approx 60$ 。

[0185] 将图 25A 所示的光纤的一部分预成型件拉制成直径为  $\sim 700\ \mu\text{m}$  和芯直径为  $\sim 130\ \mu\text{m}$  的光纤。光纤的中心处直径为  $\sim 80\ \mu\text{m}$  的上升折射率部分开始导引图 26 所示的单模。分别在波长为 780nm,800nm,850nm,910nm,1000nm and 1050nm 测量模态 2601,2602,2603,2604,2605 和 2606。在  $1\ \mu\text{m}$  的基模工作是非常强的并且看到更高阶模成分低于 850nm。模态 2611,2612,2613,2614,2615 和 2616 是在  $1\ \mu\text{m}$  波长调节注入条件时捕捉到的模态。在本示例中没有其它模态可以在该调节范围内被引导。在任何情况,由图像 2620 最显而易见,模态不是由正常的 PCF 导引引导的。图像 2620 是通过照亮光纤剖面得到的。在图 26 中,可以清楚地看到模态 2621 没有延伸至低折射率结构 2622。此外,模态 2621 基本很好地居于光纤的芯区域内(例如,由低折射率结构 2622 的内层限定的区域)。模态形状不表现包层结构的特点,例如图 25C 中模态分布 2514 所示,其形状表示通过包层结构导引的模态。

[0186] 图 27 测量和示出了沿着穿过光纤中心的线和多个氟掺杂棒在光纤的剖面中的折射率变化。升高的折射率芯 2701 具有直径  $2\rho$ 。还示出了由于氟掺杂玻璃的折射率降低 2702 连同由于应力效应围绕它的上升的折射率环 2703。在一些实施例中,在芯的一部分中折射率变化可以是近似抛物线形的。折射率变化可能允许在具有不均匀折射率的芯的一部分内引导基模。例如,模直径可以是芯直径的一部分,例如约 50%。

[0187] 非 PCF 导引是实验的出人意料的结果。它暗示了大芯径光纤中的 PCF 导引可能限于仅小空气孔形成在第一包层区域中的光纤实施例,使用非玻璃的材料的结构,或孔填充有气体的可能的结构。结果还表明一些可能的 PCF 设计并不对全玻璃、大芯径光纤是优选的。在一些大芯径实施例中,可使用具有很好匹配的热膨胀系数的玻璃。将芯尺寸减少至例如  $50\ \mu\text{m}$  一般也可以在一些情况改进性能。

[0188] 与各种 LCF 实施例不同,为该 PCF 示例选择的排列结构和较小的结构尺寸增大了局部折射率变化。所述局部变化可用于非 PCF 引导。

[0189] 在至少一个实施例中,全玻璃光纤可包括具有第一热膨胀系数的第一包层材料。可以在第一包层材料上设置其它层 ( $N \geq 2$ ) 的包层结构,并且这些结构与 LCF 包层结构尺寸相比可能在尺寸上减小。包层结构可包括具有第二热膨胀系数的第二包层材料。可能存在靠近包层结构的折射率的局部增大。此外,芯区域可由包层结构的第一内层限定。芯区域的一部分可能表现如图 27 所示的不均匀折射率分布,形成折射率梯度。参见图 27,由上升

的折射率芯区域 2701 的峰值到局部最小处 2705 测得的示例相对折射率差小于约  $5 \times 10^{-4}$ ，并且可能小于约  $1 \times 10^{-3}$ 。每个局部最小处 2705 外的增大的局部折射率对应于向低折射率包层结构的过渡。从峰值到局部最小处的局部梯度足够大以便在芯区域的至少一部分内引起基模的折射率导引。相对折射率差可由应力光学效应引起。

[0190] 在不同的实施例中，大芯径光纤的直径可在约  $30 \mu\text{m}$  至  $200 \mu\text{m}$  的范围内。所述光纤的应用可以在例如高功率啁啾脉冲放大系统、非线性放大器、和连续谱发生器以展宽输入脉冲的光谱中找到。所述高峰值功率脉冲可具有足够高的强度以超过光纤介质的非线性阈值。在一些实施例中，通过掺杂芯可以形成前置放大器或功率放大器。

[0191] 示例实施例

[0192] 如下文进一步所述，稀土掺杂的光纤和包括这些光纤的系统的其它实施例是可行的。

[0193] 在不同的实施例中，披露了包括高度稀土掺杂的玻璃的光纤，所述高度稀土掺杂的玻璃包括石英、稀土掺杂剂和磷。在不同的实施例中，光纤还可包括铝。在不同的实施例中，光纤可被设置成使得光暗化损耗的饱和值在发射波长不大于约  $10\text{dB/m}$ 。

[0194] 在一些实施例中，光纤可包括磷硅酸盐（磷硅）玻璃。在一些实施例中，光纤可包括至少约  $10\text{mol}\% \text{P}_2\text{O}_5$ 。在一些实施例中，光纤可包括约  $10\text{--}30\text{mol}\%$  的磷，小于约  $25\text{mol}\%$  的硼，和约  $0.5\text{--}15\text{mol}\%$  的铝。在一些实施例中，光纤可包括约  $0.01\text{--}15\text{mol}\%$  的镱。在不同的实施例中，光纤可包括约  $0.01\text{--}15\text{mol}\%$  的镱，和约  $0.001\text{--}1\text{mol}\%$  的铒。在不同的实施例中，光纤可包括约  $0.01\text{--}15\text{mol}\%$  的镱。在不同的实施例中，光纤包括约  $0.001\text{--}1\text{mol}\%$  的铒。在一些实施例中，光纤可包括约  $0.5\text{--}15\text{mol}\%$  的铝或约  $1\text{--}10\text{mol}\%$  的铝或约  $5\text{--}10\text{mol}\%$  的铝。在一些实施例中，稀土掺杂剂可具有至少约  $0.5\text{mol}\%$  的浓度。

[0195] 在一些实施例中，光纤在泵浦功率为最大泵浦功率的至少大于约  $50\%$  下工作期间光暗化损耗的饱和值在发射波长可能不大于约  $10\text{dB/m}$ 。在一些实施例中，光暗化损耗的饱和值在大多数发射波长可能不大于约  $10\text{dB/m}$ 。在一些实施例中，光暗化损耗的饱和值在基本所有的发射波长可能不大于约  $10\text{dB/m}$ 。在一些实施例中，光暗化损耗在发射波长可能不大于约  $10\text{dB/m}$ 。

[0196] 在一些实施例中，光纤在反转能级大于约  $50\%$  工作期间光暗化损耗的饱和值在发射波长可能不大于约  $10\text{dB/m}$ 。在一些实施例中，对于在发射波长范围中的至少一些波长，光暗化损耗的饱和值小于约  $10\text{dB/m}$ 。在一些实施例中，对于在发射波长范围中的大多数或基本上所有波长，光暗化损耗的饱和值小于约  $10\text{dB/m}$ 。在一些实施例中，发射波长范围是从约  $1.0 \mu\text{m}$  到约  $1.1 \mu\text{m}$ ，从约  $0.95 \mu\text{m}$  到约  $1.2 \mu\text{m}$ ，或一些其它适用的范围。在不同的实施例中，光纤可被设置成使得光暗化损耗的饱和值在泵浦波长不大于约  $10\text{dB/m}$ 。在一些实施例中，泵浦波长在从约  $0.9 \mu\text{m}$  到约  $1.0 \mu\text{m}$  的范围内。在不同的实施例中，光纤可被设置成使得光暗化损耗的饱和值在探测波长测得不大于约  $10\text{dB/m}$ 。在一些实施例中，当光纤在泵浦波长（例如，约  $976\text{nm}$ ）泵浦时，光暗化损耗的饱和值在探测波长（例如，约  $675\text{nm}$ ）确定。在其它实施例中，探测波长可包括发射波长。在其它实施例中，探测波长可在从约  $0.6 \mu\text{m}$  到约  $1.1 \mu\text{m}$  的范围内，从约  $0.95 \mu\text{m}$  到约  $1.2 \mu\text{m}$  的范围内，从约  $1 \mu\text{m}$  到约  $1.1 \mu\text{m}$  的范围内，或一些其它适用的范围。可以使用其它的探测、发射和泵浦波长。

[0197] 在本文所述的光纤的不同实施例中，泵浦波长可在从约  $0.9 \mu\text{m}$  到约  $1.0 \mu\text{m}$  的范

围内。在一些实施例中,泵浦波长可在从约 0.91  $\mu\text{m}$  到约 0.99  $\mu\text{m}$  的范围内。在一些实施例中,泵浦波长可在从约 0.97  $\mu\text{m}$  到约 1.03  $\mu\text{m}$  的范围内。在一些实施例中,发射波长可在从约 0.95  $\mu\text{m}$  到约 1.2  $\mu\text{m}$  的范围内。在本文所述的光纤的不同实施例中,发射波长可在从约 1.0  $\mu\text{m}$  到约 1.1  $\mu\text{m}$  的范围内。在本文所述的光纤的其它实施例中,在发射波长、泵浦波长和 / 或探测波长的光暗化损耗的饱和值可小于约 1dB/m, 小于约 5dB/m, 小于约 15dB/m, 小于约 20dB/m, 或小于约 30dB/m。在光纤的其它实施例中饱和光暗化损耗的其它值是可行的。

[0198] 在不同的实施例中,光纤可包括纤芯和包层并且在纤芯和包层之间表现低折射率差。在不同的实施例中,高度稀土掺杂玻璃的有效折射率在石英折射率的  $\pm 0.003$  或更小内。在不同的实施例中,光纤在泵浦波长可具有至少约 1000dB/m 的峰值吸收。在一些实施例中,光纤在泵浦波长可具有至少约 3000dB/m 的峰值泵浦光吸收。

[0199] 在不同的实施例中,披露了包括增益光纤的光学放大器,所述增益光纤包括光纤,所述光纤包括高度稀土掺杂的玻璃,所述高度稀土掺杂的玻璃包括石英、稀土掺杂剂、磷和泵浦源。在一些实施例中,增益光纤还可包括铝。在一些实施例中,当增益光纤通过高泵浦功率泵浦并在高反转能级工作时,增益光纤可在发射波长表现具有小于约 10dB/m 的饱和值的光暗化损耗。在一些实施例中,增益光纤可包括至少约 0.5mol% 的稀土掺杂剂浓度。在不同的实施例中,增益光纤可以是芯泵浦的并且泵浦源可包括大芯径光纤放大器。在不同的实施例中,增益光纤可以是包层泵浦的。在一些实施例中,泵浦源可包括多个光纤。在一些实施例中,增益光纤可包括大芯径光纤。在不同的实施例中,泵浦源和增益光纤可被设置成在不使用体(分立式, bulk) 光学部件的情况下将泵浦能量耦合至增益光纤。在不同的实施例中,放大器可具有在几厘米到几米范围内的增益介质长度,和至少约 0.5dB/cm 到 10dB/cm 的每单位长度的增益。在一些实施例中,每单位长度的增益可在约 2dB/cm 到 10dB/cm 的范围内。在不同的实施例中,放大器可被设置为大芯径放大器,所述放大器可操作以产生具有脉冲能量在约 100  $\mu\text{J}$  到 10mJ 的范围内、脉冲持续时间在约 100fs 到几 ns (例如, 20ns) 的范围内的输出脉冲。不同的实施例可包括光纤激光器,所述光纤激光器包括光学放大器,所述光学放大器包括增益光纤,所述增益光纤包括光纤,所述光纤包括高度稀土掺杂的玻璃,所述高度稀土掺杂的玻璃包括石英、稀土掺杂剂、磷、和铝、和泵浦源。在一些实施例中,放大器可被设置为光学共振器内的增益介质。在一些实施例中,光学放大器可具有约 1mm 到约 20cm 的长度。

[0200] 在不同的实施例中,披露了一种系统,所述系统包括高度稀土掺杂的光纤放大器,例如光纤,所述光纤包括高度稀土掺杂的玻璃,所述高度稀土掺杂的玻璃包括石英、稀土掺杂剂、磷、和铝。光纤放大器可被设置为下述中的至少一个的元件:高重复率光纤激光器(例如,重复率在约 100MHz- 约 10GHz 的范围内),高重复率放大器,飞秒至纳秒脉冲放大器,由脉冲源注入的功率放大器,产生高峰值输出功率或高能量(例如,约 100 微焦-1 毫焦)的体(bulk)放大器的种子源,泵浦源和在千瓦平均功率应用中表现低光暗化的 CW 源,向频率转换器提供输入用于短波长脉冲产生的脉冲源,连续谱发生器,基于光纤的相干光束组合器的增益元件,频梳源,单频光纤激光器,材料加工应用中的增益元件,激光雷达应用中的增益元件,和电信放大器。在不同的实施例中,光纤放大器可包括磷硅增益光纤。

[0201] 在不同的实施例中,披露了高度稀土掺杂的光纤、光纤放大器、光纤激光器、或包



括光纤的系统（所述光纤具有高度稀土掺杂的玻璃，所述高度稀土掺杂的玻璃包括石英、稀土掺杂剂、磷、和铝）。在不同的实施例中，高度掺杂稀土光纤被设置成同时提供高泵浦吸收，高增益（例如，约 0.5dB/cm 到约 500dB/m），低光暗化损耗，纤芯和包层之间的较低折射率差，和相对于具有相同近似的稀土掺杂水平的石英光纤的高非线性阈值。

[0202] 不同的实施例披露了具有掺杂玻璃的光纤，所述掺杂玻璃包括具有折射率的石英，石英中至少约 10mol% 的磷；石英中的稀土离子，所述稀土离子在石英中的浓度为至少约 1000mol ppm，其中其内具有磷和稀土离子的石英的折射率在石英的折射率的约  $\pm 0.003$  或更小内，并且其中在泵浦波长的光纤的峰值吸收为至少约 3000dB/m 到约 9000dB/m。在不同的实施例中，在泵浦二极管波长的光纤的峰值吸收在约 3000dB/m 到约 9000dB/m 的范围内。

[0203] 不同的实施例披露了阶跃折射率光纤，所述阶跃折射率光纤包括：具有纤芯半径  $\rho$  的稀土掺杂的纤芯；设置围绕纤芯的第一包层；和设置围绕第一包层的第二包层，第一包层具有外半径  $\rho_1$ ，纤芯和第一包层具有折射率差  $\Delta n$ ，而第一包层和第二包层具有折射率差  $\Delta n_1$ ，其中 (i) 纤芯中支持小于 10 种模式，(ii) 第一包层半径  $\rho_1$  大于约  $1.1\rho$  并小于约  $2\rho$ ，和 (iii) 第一包层和第二包层之间的折射率差  $\Delta n_1$  大于约  $1.5\Delta n$  并小于约  $50\Delta n$ ，并且其中光纤的峰值吸收至少为约 300dB/m。在不同的实施例中，光纤的峰值吸收在泵浦波长可以在约 3000dB/m 到约 9000dB/m 的范围内。在一些实施例中，光纤的峰值吸收在泵浦二极管波长可在约 3000dB/m 到 9000dB/m 的范围内。

[0204] 在不同的实施例中，披露了包括高度稀土掺杂的增益光纤（例如包括石英、稀土掺杂剂、磷和铝的光纤）的光纤激光振荡器。在一些实施例中，振荡器可被设置成在多个输出产生输出脉冲，其中从至少一个输出发射的脉冲包括近带宽极限的脉冲。

[0205] 不同的实施例披露了光纤激光振荡器，所述光纤激光振荡器包括高度稀土掺杂的增益光纤（例如包括石英、稀土掺杂剂、磷和铝的光纤），用于泵浦增益光纤的泵浦源，接收从增益光纤的第一输出端发射的能量的第一反射器，所述反射器被设置为高反射率 (HR) 腔端镜，或为发射第一输出脉冲的第一输出耦合器 (OC)，所述反射器还被设置成能够控制腔内色散，光学连接至掺杂的增益光纤并接收从增益光纤的第二输出端发射的能量的无掺杂光纤，被设置为高反射率 (HR) 腔端镜并可操作以对光纤振荡器进行锁模的可饱和吸收器，其中所述可饱和吸收器被设置成接收和反射从增益光纤的第二输出端和无掺杂光纤的一端发射的能量，并且腔内偏振控制器光学连接至增益光纤和无掺杂光纤，所述控制器的输出发射第二输出脉冲，其中第二输出脉冲包括近带宽极限的脉冲或略微啁啾脉冲，和相对于第二输出脉冲光谱展宽的第一输出脉冲。在一些实施例中，第一反射器可包括啁啾布拉格光栅。在一些实施例中，偏振控制器可包括偏振分束器 (PBS)，和四分之一波片，并且所述四分之一波片可被调节以控制第二输出脉冲的输出耦合。在一些实施例中，第一反射器可以是高反射率的并且偏振控制器可被设置成用于高输出耦合。在不同的实施例中，高度稀土掺杂的增益光纤的长度可能足够短，使得光纤内的非线性相互作用足够低，使得第二输出脉冲是近带宽极限的。在一些实施例中，光纤振荡器可支持孤子。

[0206] 不同的实施例披露了基于激光的系统，所述系统包括光学脉冲源，所述源可包括如上文所述的光纤振荡器。在一些实施例中，光学脉冲可通过腔内偏振控制器从第二输出获得。在一些实施例中，基于激光的系统可包括光纤放大器，所述光纤放大器包括高度稀土

掺杂的大芯径光纤,所述放大器可被设置成提供高峰值功率、近带宽极限的输出脉冲。在一些实施例中,基于激光的系统还可包括接收来自光纤放大器的输出脉冲的频率转换器。在一些实施例中,提供给基于激光的系统的光纤放大器可被设置成将高峰值功率输出脉冲的非线性相位限制成 $< \pi$ 。

[0207] 不同的实施例披露了基于激光的系统,所述系统包括光学脉冲源,光纤放大器,所述光纤放大器包括光纤(例如包括石英、稀土掺杂剂、磷和铝的光纤)和被设置成光谱展宽从光纤放大器发射的脉冲的非线性光纤,所述非线性光纤包括应力引导光纤,所述应力引导光纤被设置成通过应力光学效应在光纤内引导模态。在一些实施例中,基于激光的系统还可包括从高度非线性光纤接收脉冲的脉冲压缩器,并将所述脉冲压缩至约 10fs-1ps 的范围内的脉冲宽度。

[0208] 不同的实施例披露了一种非常高重复率的光纤激光振荡器,所述光纤激光振荡器包括泵浦,高度稀土掺杂的增益光纤(例如包括石英、稀土掺杂剂、磷和铝的光纤)和色散补偿器,所述色散补偿器包括一个或多个具有色散的光纤,其中所述增益光纤和一个或多个光纤具有的总长度足够短以提供在约 100MHz 至 10GHz 的范围内的重复率,并且所述色散补偿器提供亚皮秒输出脉冲的产生。在一些实施例中,亚皮秒脉冲宽度可以在约 100fs 至约 300fs 的范围内。在一些实施例中,色散补偿器可包括光纤布拉格光栅。

[0209] 本文所述的不同实施例披露了一种频梳源,所述频梳源包括光脉冲源,所述光脉冲源可包括本文所述的高重复率振荡器的实施例和被设置成光谱展宽从增益光纤发射出的脉冲的非线性光纤。

[0210] 本文所述的不同实施例披露了基于激光的系统,所述系统包括至少一个多模泵浦二极管,从所述泵浦二极管接收能量并发射包括单个或几个模态的泵浦输出的大芯径光纤,接收所述泵浦输出的激光器或光学放大器,其中大芯径光纤或激光器或光学放大器中的至少一个包括高度稀土掺杂的光纤(例如包括石英、稀土掺杂剂、磷和铝的光纤)。在一些实施例中,泵浦二极管可以是脉冲的。在一些实施例中,大芯径光纤可以是泵浦高度稀土掺杂的光纤(例如包括石英、稀土掺杂剂、磷和铝的光纤)并且泵浦输出可以是放大的输出。

[0211] 本文所述的不同实施例披露了单频、短腔光纤激光器,所述激光器包括高度稀土掺杂的增益光纤(例如包括石英、稀土掺杂剂、磷和铝的光纤),被设置成 DBR 或 DFB 激光器。

[0212] 不同的实施例披露了一种光纤,所述光纤包括石英、浓度为至少约 0.5mol% 的稀土掺杂剂和磷。在一些实施例中,光纤在泵浦波长可具有的峰值吸收在约 3000dB/m-9000dB/m 的范围内。在一些实施例中,光纤在发射波长可具有约 0.5dB/cm 至 1000dB/m 范围内的增益。在一些实施例中,光纤在发射波长可具有约 0.5dB/cm 至 500dB/m 范围内的增益。在一些实施例中,光纤可具有的增益大于约 10dB/m,大于约 20dB/m,大于约 50dB/m,大于约 100dB/m,大于约 500dB/m,大于约 1000dB/m,或一些其它增益值。在一些实施例中,光纤在发射波长可表现不大于约 10dB/m 的饱和光暗化损耗。在一些实施例中,光纤在高泵浦功率和高反转能级工作期间在发射波长的光暗化损耗可以不大于约 10dB/m。在一些实施例中,上述光纤在至少大于最大泵浦功率的约 50% 的泵浦功率工作期间在发射波长的光暗化损耗可以不大于约 10dB/m。在一些实施例中,光纤可包括磷硅玻璃。在一些实施例

中, 光纤可包括至少约 10mol% 的  $P_2O_5$ 。在一些实施例中, 光纤可具有约 10-30mol% 的磷, 少于约 25mol% 的硼, 和约 0.5-15mol% 的铝。在一些实施例中, 光纤可包括约 0.5-15mol% 的镱。在一些实施例中, 光纤包括约 0.5-15mol% 的镱, 和约 0.001-1mol% 的铒。在一些实施例中, 光纤可包括约 0.5-15mol% 的铒。在一些实施例中, 光纤可具有约 0.5-15mol% 的铝。在一些实施例中, 光纤可具有约 1-10mol% 的铝。在一些实施例中, 光纤可具有约 5-10mol% 的铝。在一些实施例中, 光纤可具有纤芯和包层, 和纤芯和包层之间的低折射率差。在一些实施例中, 高度稀土掺杂的玻璃的折射率可以在石英的折射率的  $\pm 0.003$  或更小的范围内。

[0213] 本文所述的不同实施例披露了一种光学放大器, 所述光学放大器包括增益光纤, 所述增益光纤包括石英、浓度为至少约 0.5mol% 的稀土掺杂剂和磷, 和泵浦源。在一些实施例中, 增益光纤可以是芯泵浦的, 并且泵浦源可包括大芯径光纤放大器。在一些实施例中, 增益光纤可以是包层泵浦的。在一些实施例中, 泵浦源可包括多个光纤。在一些实施例中, 增益光纤可包括大芯径光纤和泵浦源并且增益光纤可被设置成在不使用体 (bulk) 光学部件的情况下将泵浦能量耦合至增益光纤。在一些实施例中, 放大器可具有在几厘米到几米范围内的增益介质长度。在一些实施例中, 每单位长度的增益可以在约 2dB/cm 到 10dB/cm 的范围内。在一些实施例中, 光学放大器可被设置成大芯径放大器, 所述放大器可操作以产生具有脉冲能量在约 100  $\mu$ J 到 10mJ 的范围内、脉冲持续时间在约 100fs 到几 ns 的范围内的输出脉冲。一些实施例披露了包括上述光学放大器的气纤激光器, 其中所述放大器被设置成在光学共振器内的增益介质。在一些实施例中, 光纤放大器可具有约 1mm 到约 20cm 的长度。

[0214] 本文所述的不同实施例披露了包括高度稀土掺杂的气纤放大器的系统 (例如气纤包括石英、浓度为至少约 0.5mol% 的稀土掺杂剂和磷)。在一些实施例中, 气纤放大器可被设置成下述中的至少一种的元件: 高重复率气纤激光器 (例如, 气纤激光器具有的重复率在约 100MHz 至约 100GHz 的范围内), 高重复率放大器, 飞秒至纳秒脉冲放大器, 由脉冲源注入的功率放大器, 产生高峰值输出功率或高能量 (例如, 约 100 微焦 -1 毫焦) 的体 (bulk) 放大器的种子源, 泵浦源, 在千瓦平均功率应用中表现低光暗化的 CW 源, 向频率转换器提供输入用于短波长脉冲生成的脉冲源, 连续谱发生器, 基于气纤的相干光束组合器的增益元件, 频梳源, 单频气纤激光器, 材料加工应用中的增益元件, 激光雷达应用中的增益元件, 和电信放大器。在一些实施例中, 实施例 83 的系统, 气纤放大器可包括磷硅增益气纤。

[0215] 本文所述的不同实施例披露了一种系统, 所述系统包括气纤放大器, 所述气纤放大器包括放大器材料和气纤泵浦激光器, 所述气纤泵浦激光器包括激光器材料, 所述激光器材料被设置成在具有泵浦波长的波长范围内产生辐射。所述气纤泵浦激光器被设置成芯泵浦气纤放大器。在不同的实施例中, 在泵浦波长的泵浦激光器材料的发射剖面比在泵浦波长的放大器材料的发射剖面大大约 10% - 约 50%。在不同的实施例中, 在泵浦波长的泵浦激光器材料的发射剖面比在泵浦波长的放大器材料的发射剖面要大大约 25% - 约 50%。在一些实施例中, 气纤放大器包括 Yb 气纤放大器。在一些实施例中, 气纤放大器包括 Yb 铝硅酸盐气纤。在一些实施例中, 气纤放大器包括单模 Yb 气纤泵浦激光器。在不同的实施例中, 气纤泵浦激光器包括 Yb 磷硅 (酸盐) 气纤。在一些实施例中, 泵浦波长可小于约 1030nm。在不同的实施例中, 在泵浦波长的泵浦激光器材料的发射剖面比在泵浦波长

的放大器材料的发射剖面大大约 20%，25%，30%，35%，40%，45% 或 50%。

[0216] 本文所用的条件性语言，例如，其中，“可以 (can)”，“可能 (could)”，“可能 (might)”，“可 (may)”，“例如”等等，除非另行说明或在所用的上下文中可以理解，一般旨在表达某些实施例包括而其它实施例不包括某些特征、元件和 / 或步骤。因此，所述条件性语言一般不旨在暗示特征、元件和 / 或步骤无论如何对于一个或多个实施例是需要的或者一个或多个实施例必然包括用于在有或没有作者输入或提示的情况下决定这些特征、元件和 / 或步骤是否在一具体实施例中包括或执行。术语“包括 (comprising)”，“包括 (including)”，“具有 (having)”以及类似的词语是同义的并且是包括性、以开放的方式使用的，并且不排除其它的元件、特征、动作、操作，等等。此外，术语“或 (or)”以其包含性（而非排除性词义）的词义使用，从而在使用时，例如连接一系列元件，术语“或”表示系列中元件的一个、一些、或全部。

[0217] 为了总结公开内容的各个方面的目的，披露了具体实施例的某些目的和优势。应当理解，按照任一具体的实施例，不必然所有所述的目的或优势可实现。因此，例如，本领域的技术人员会认识到实施例可被提供和实施使得本文所教授的一个优势和一组优势可以实现或最佳化，而不必然实现本文所教授或启示的其它目的或优势。

[0218] 尽管已经描述了本发明的某些实施例，这些实施例只是以示例方式呈现，并不旨在限制本发明的范围。在一具体实施例中没有一个特征或一组特征是必需或要求被包括的。本文中提及的“一些实施例”，“实施例”或类似术语表示，结合实施例所述的具体特征、结构、步骤、过程（工艺）、或特点包括在至少一个实施例中。因此，本文中出现的短语“在一些实施例中”，“在实施例中”或类似短语并不必然都指相同的实施例，并且可能指相同或不同的实施例中的一个或多个。实际上，本文所述的新颖的方法和系统可通过各种其它的形式体现；此外，可在不偏离本文所述的本发明精神的情况下可以本文所述实施例的形式进行各种省略、添加、替换、等同、重新排列、和改变。

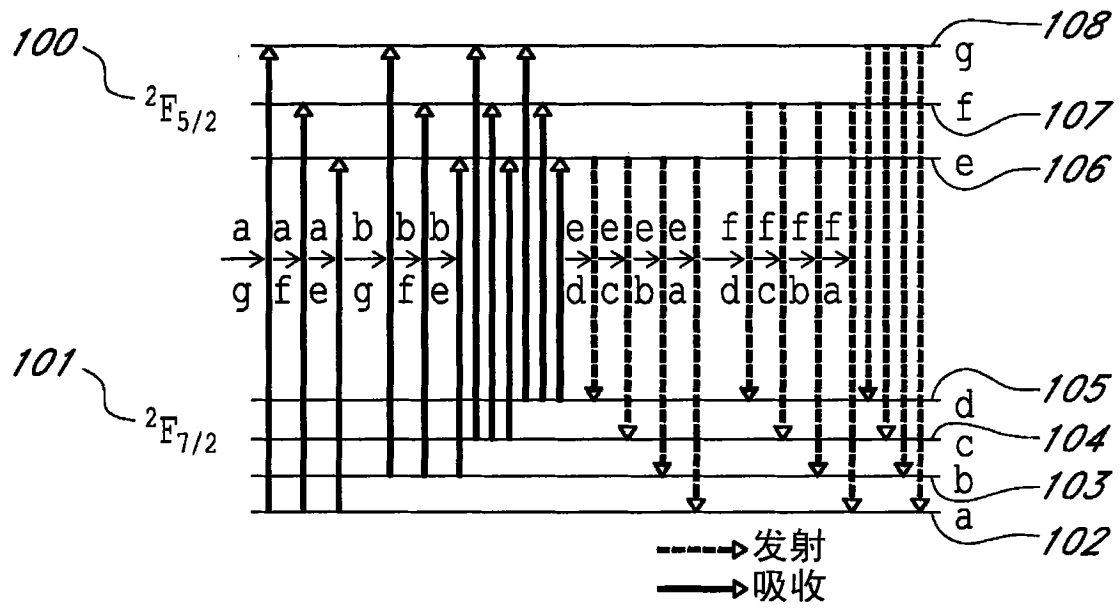


图 1

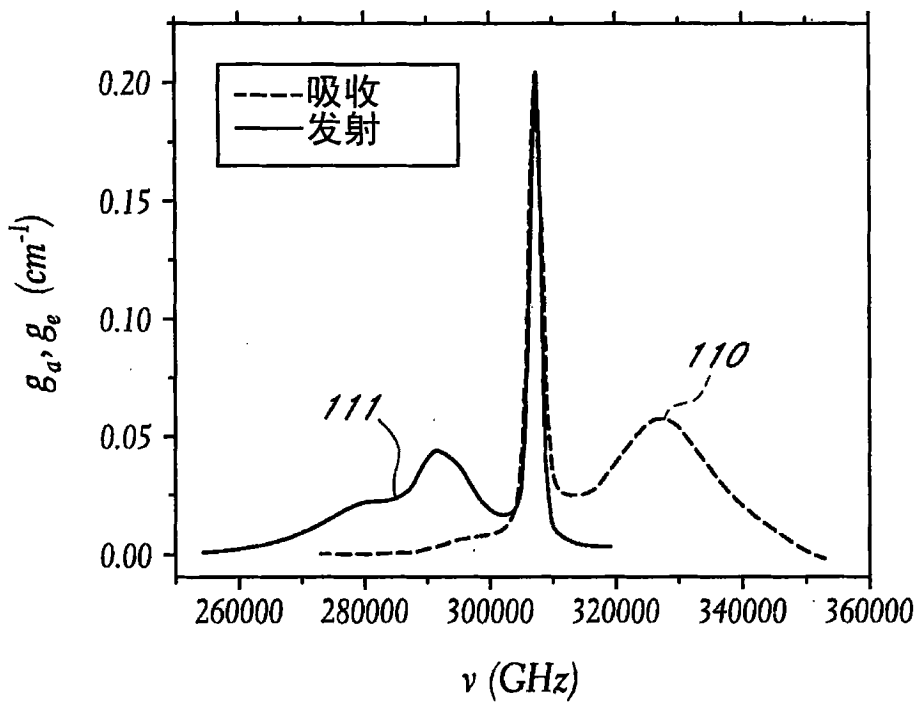


图 2

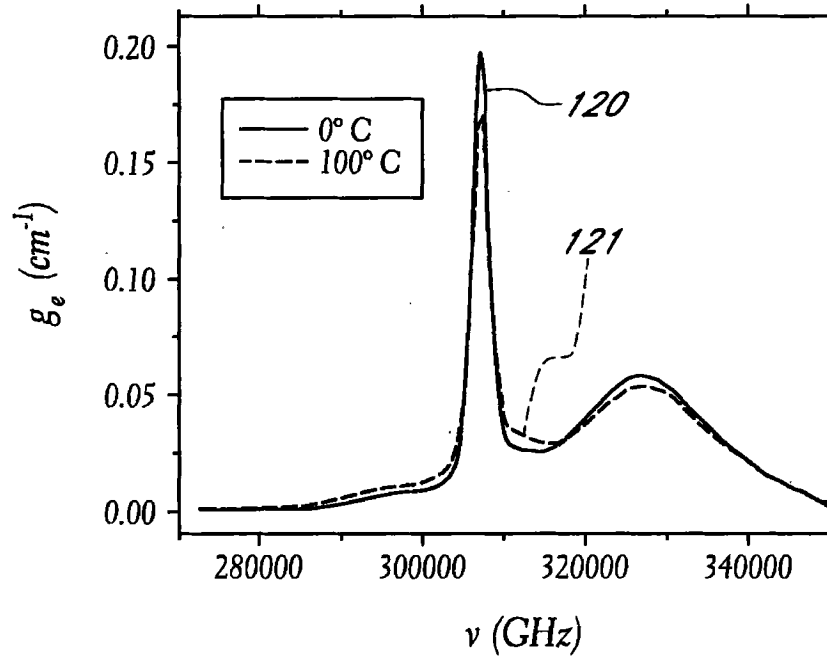


图 3A

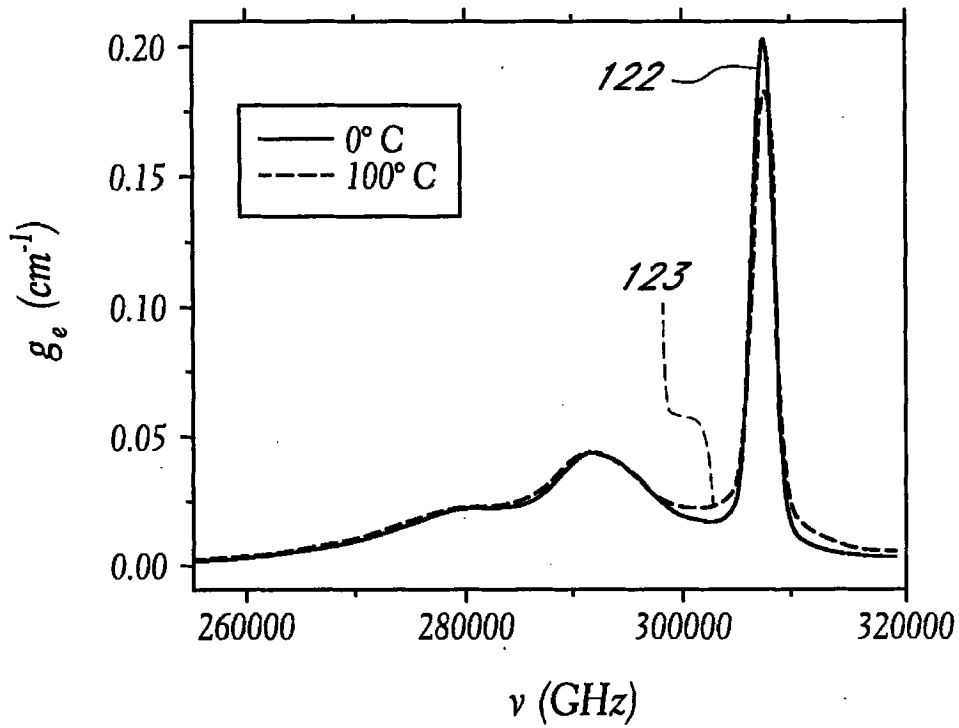


图 3B

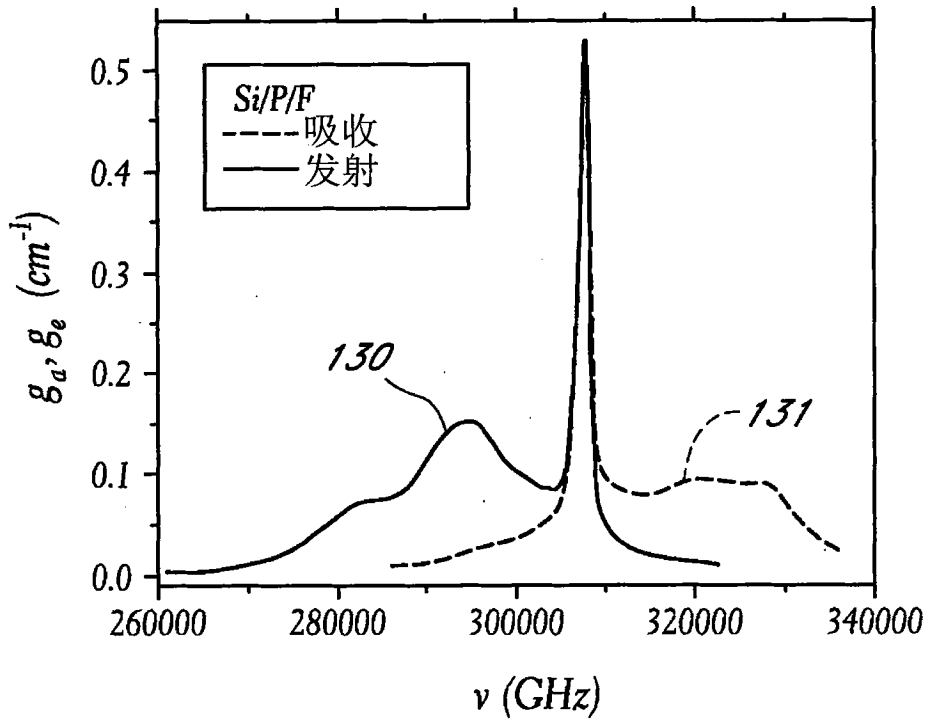


图 4

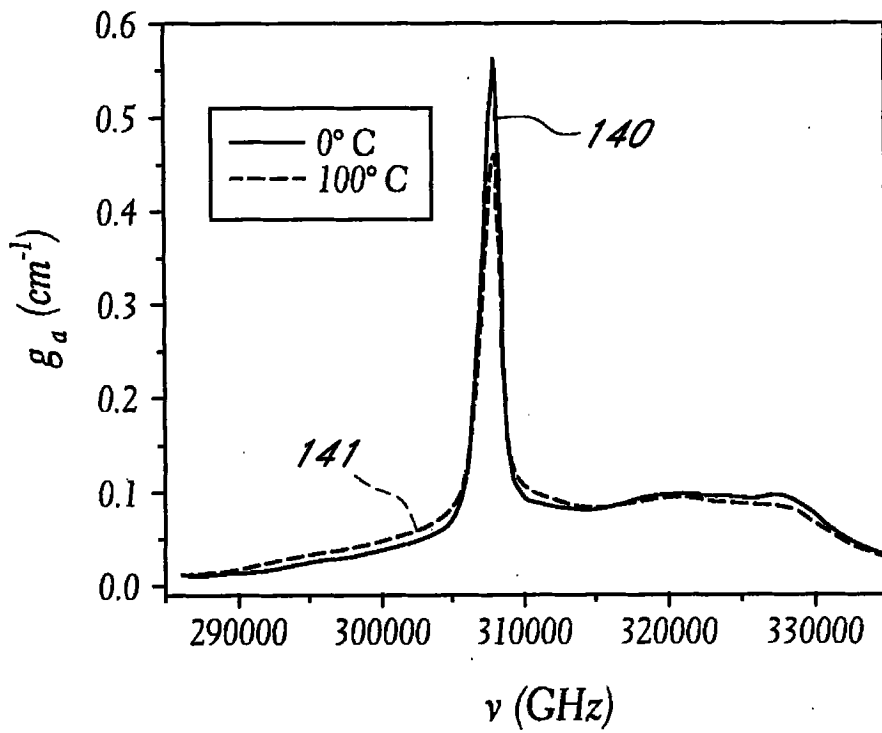


图 5A

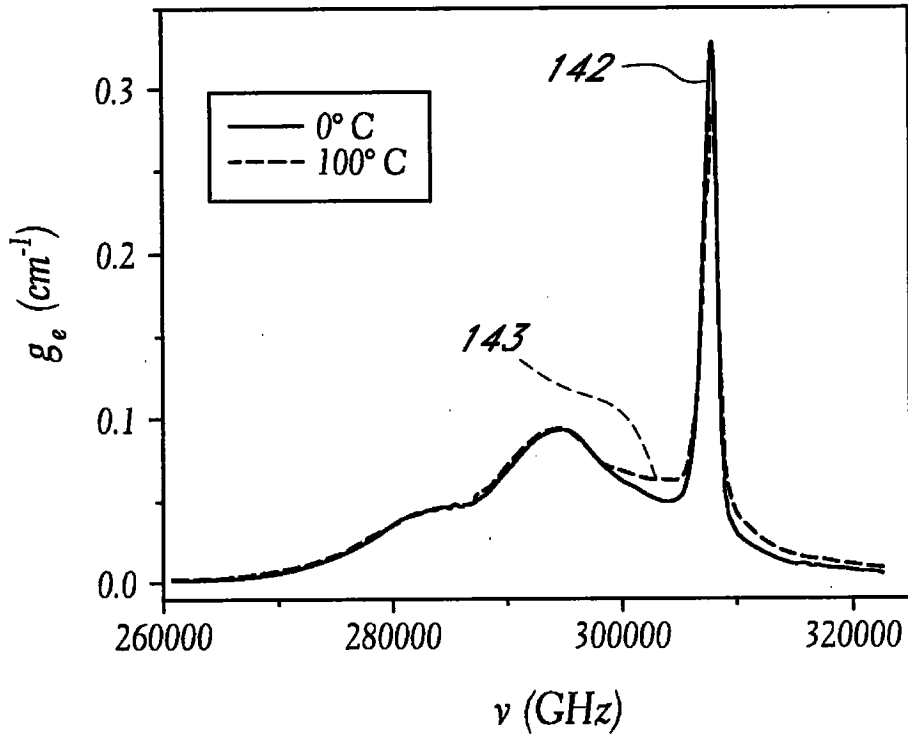


图 5B

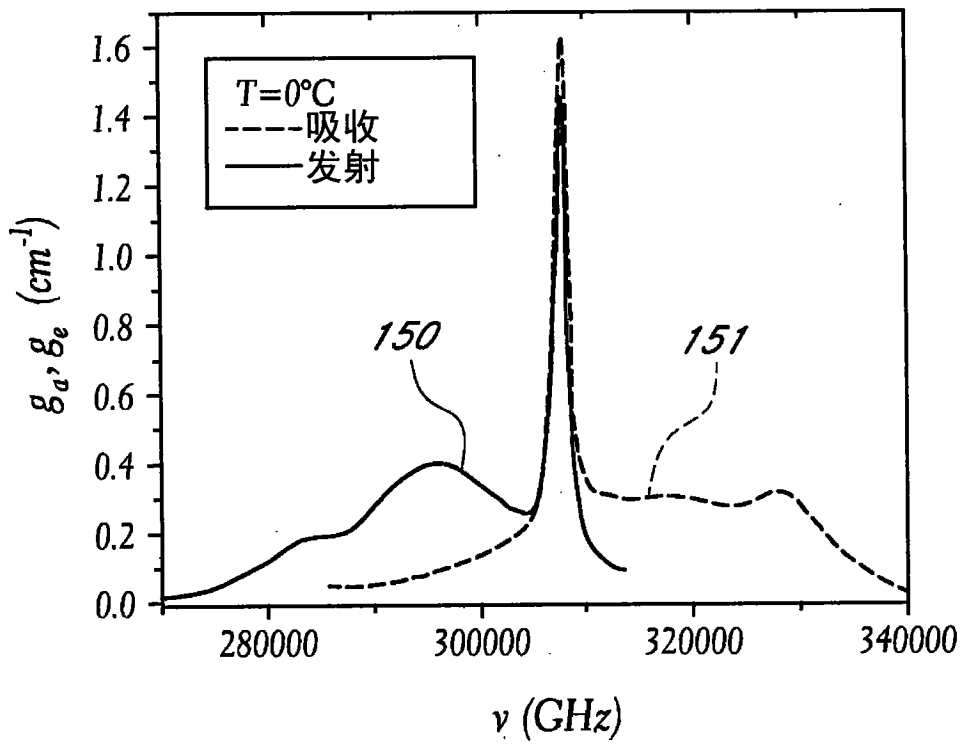


图 6



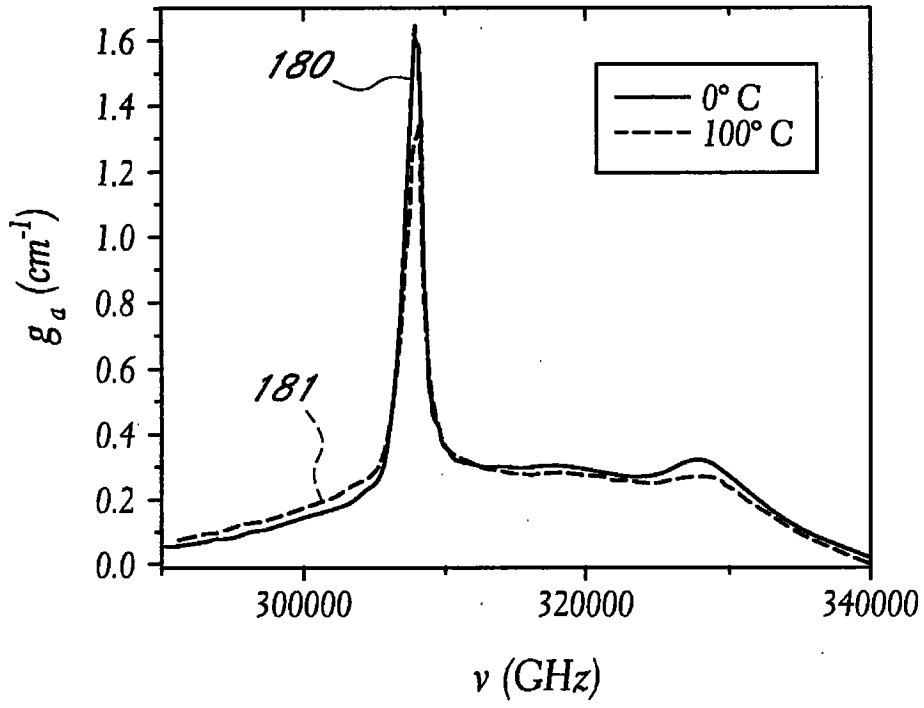


图 7A

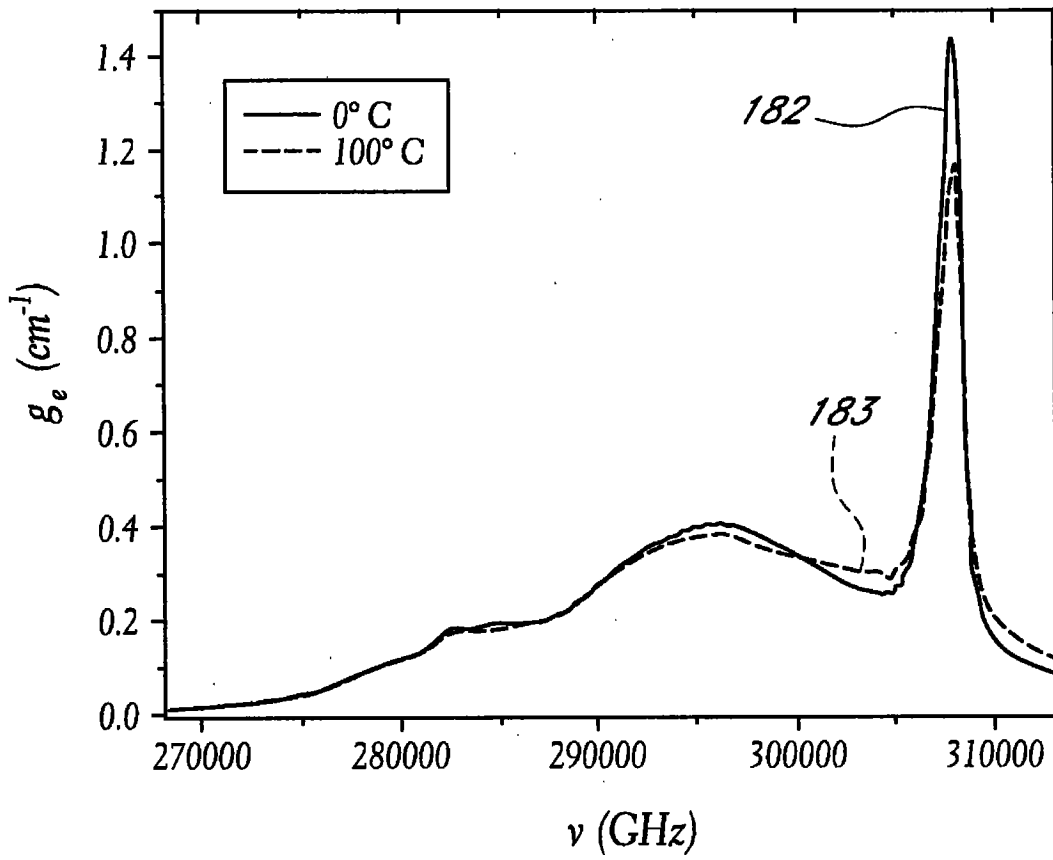


图 7B

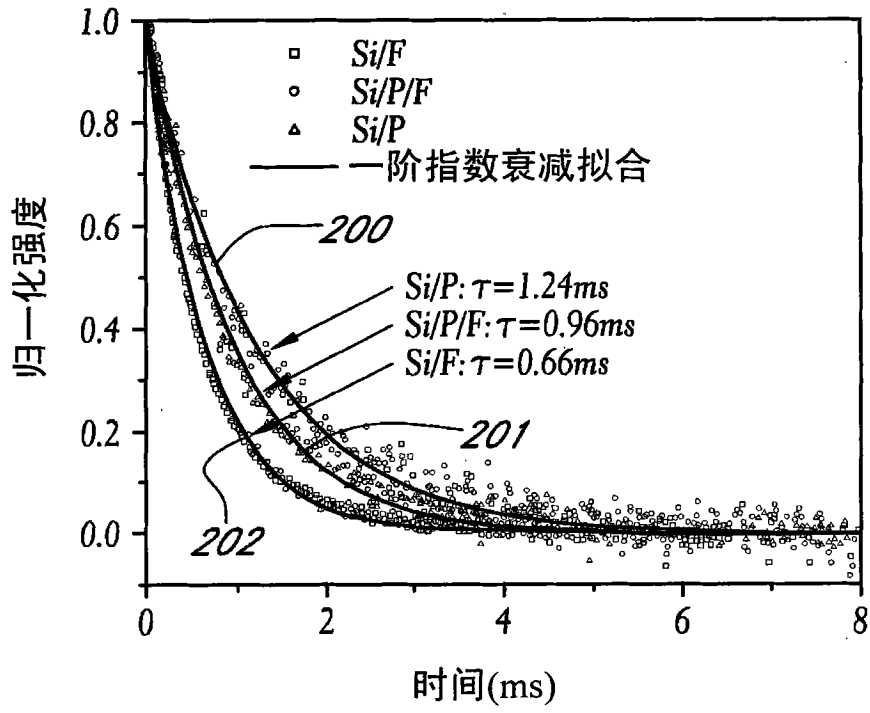


图 8

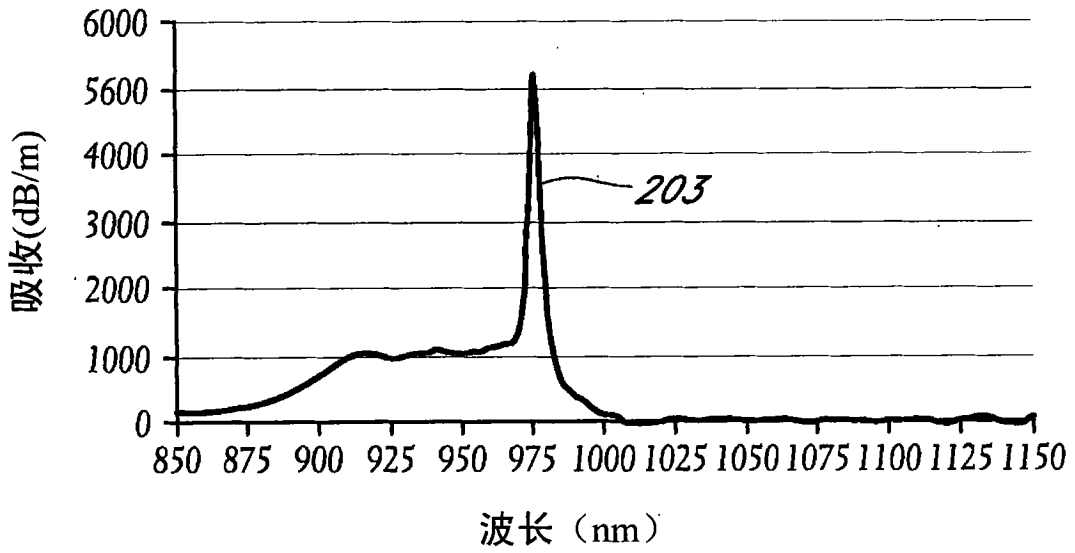


图 9

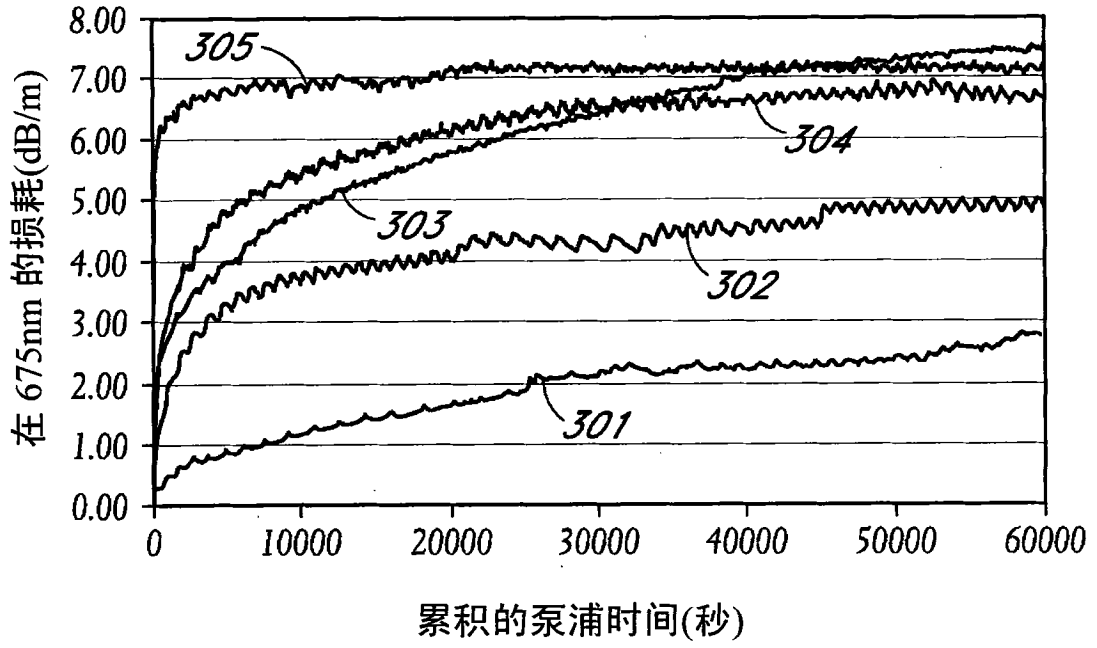


图 10

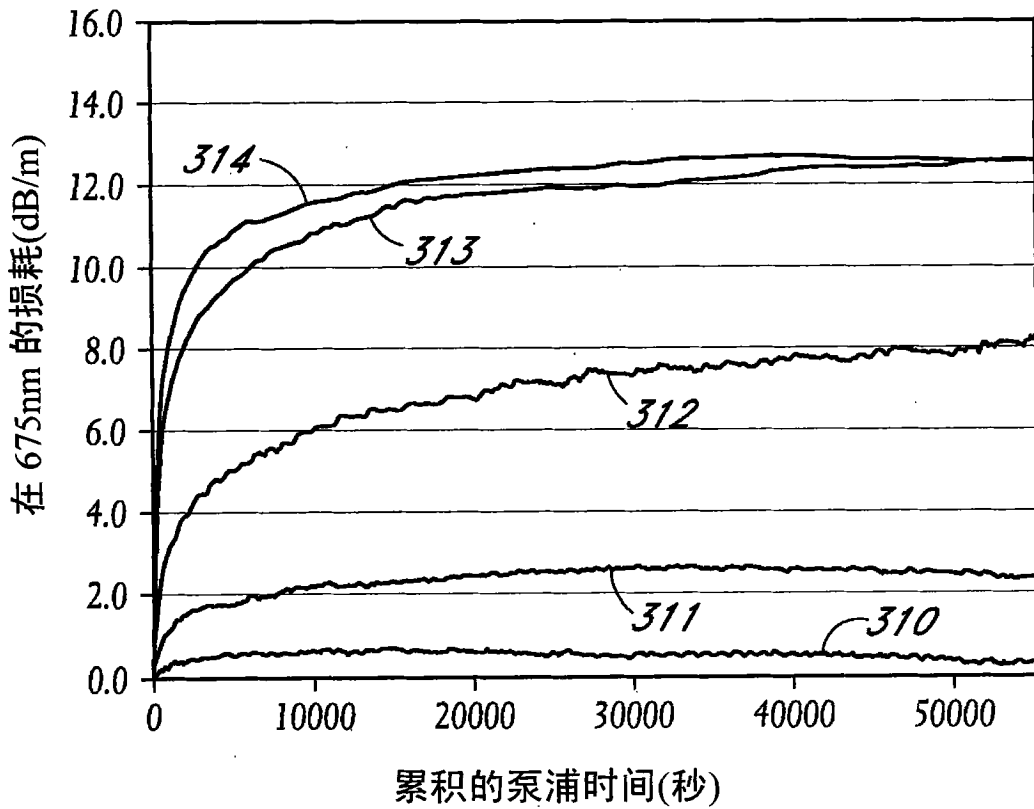


图 11

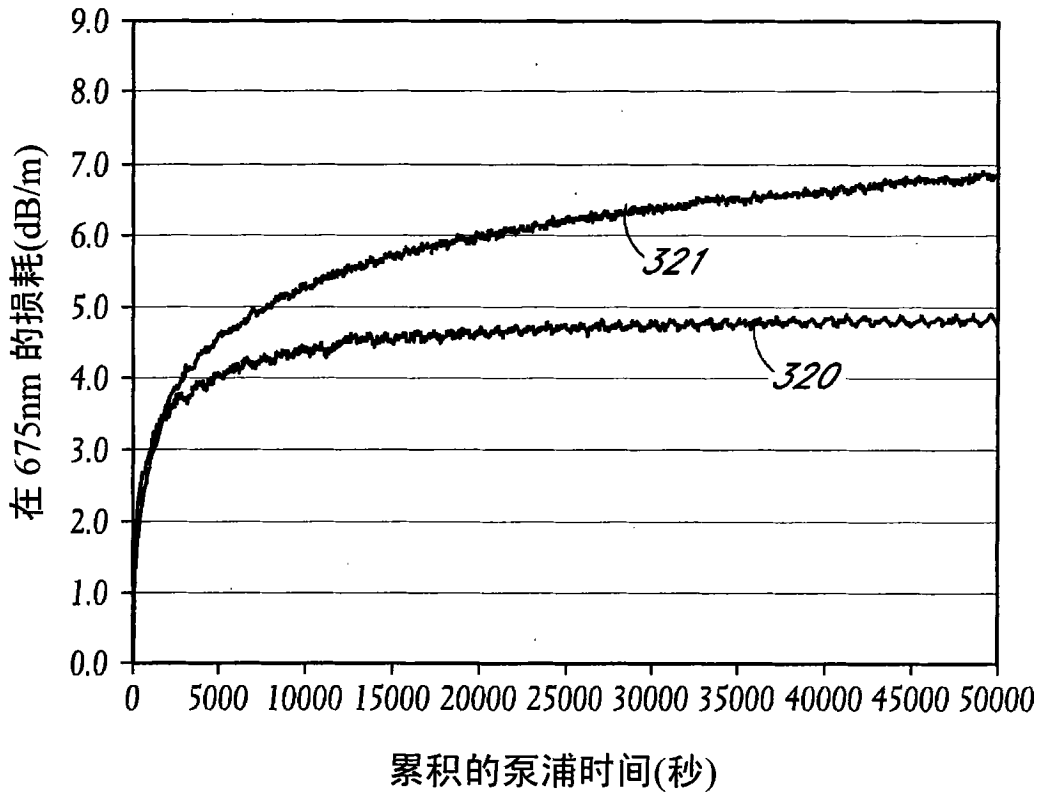


图 12

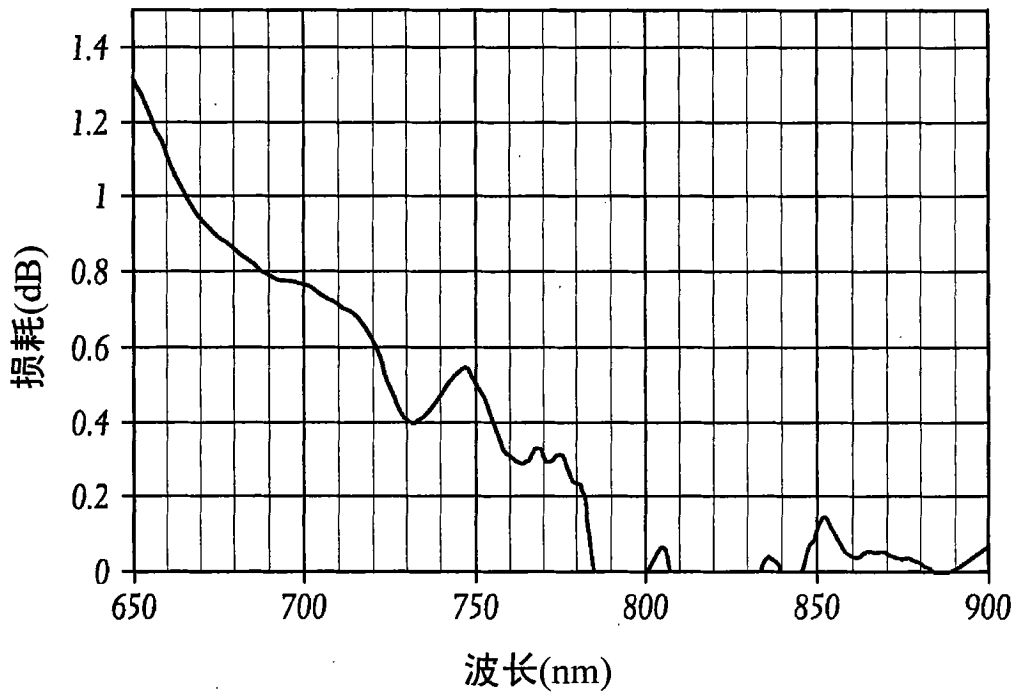


图 13

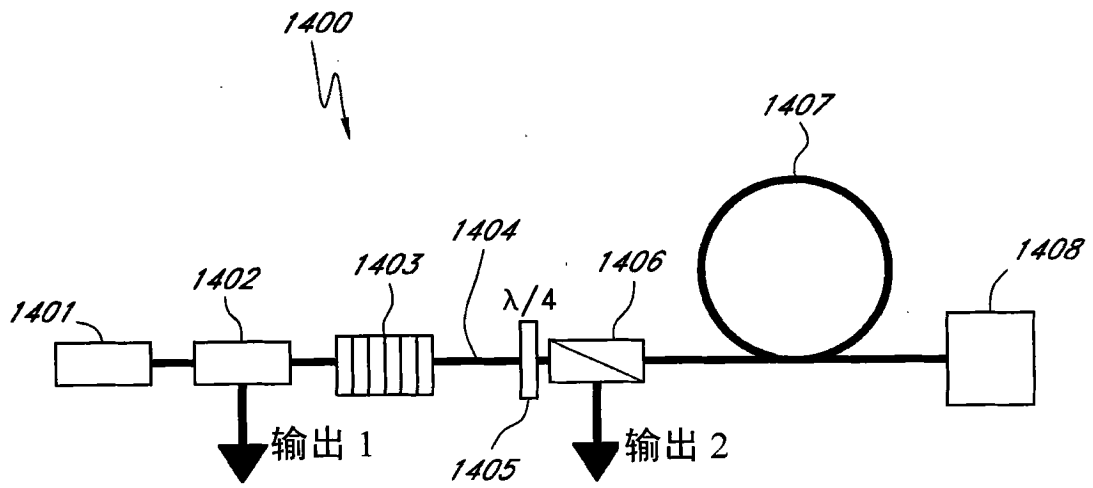


图 14

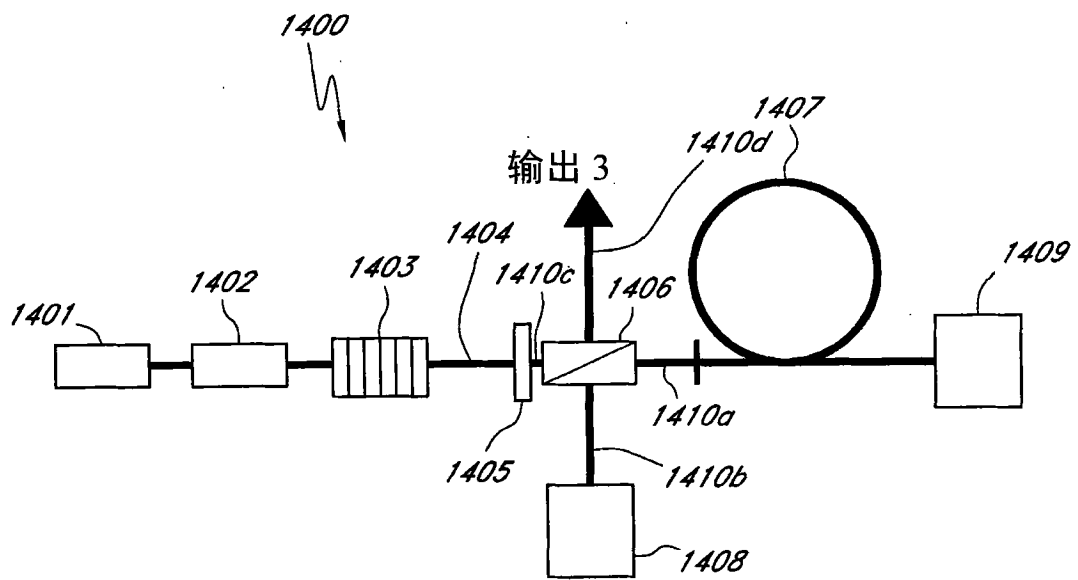


图 14A

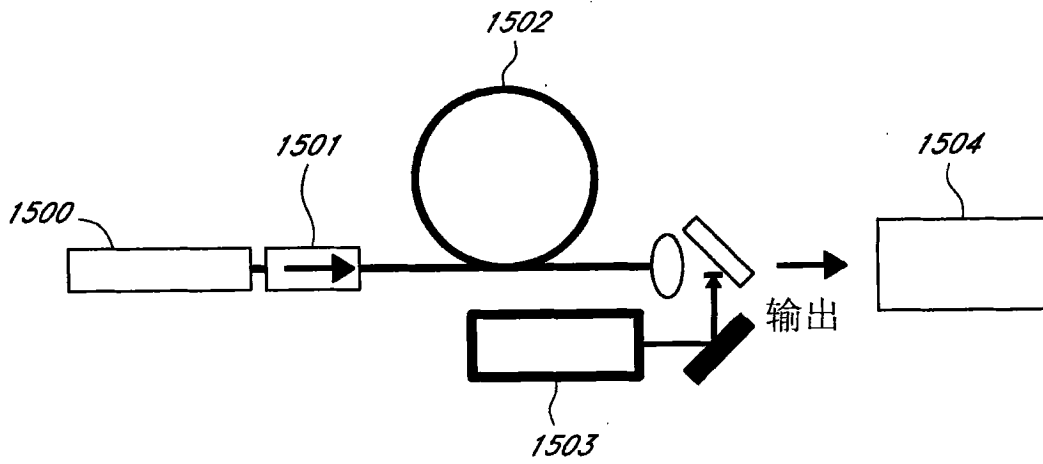


图 15

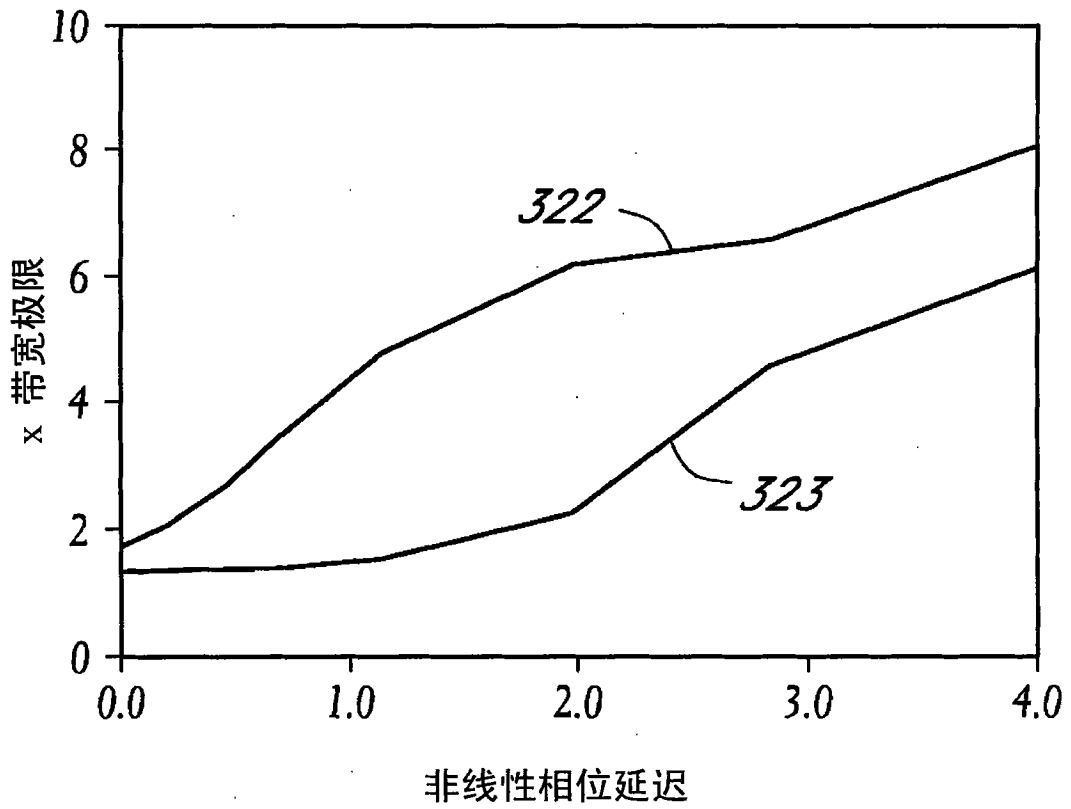


图 16

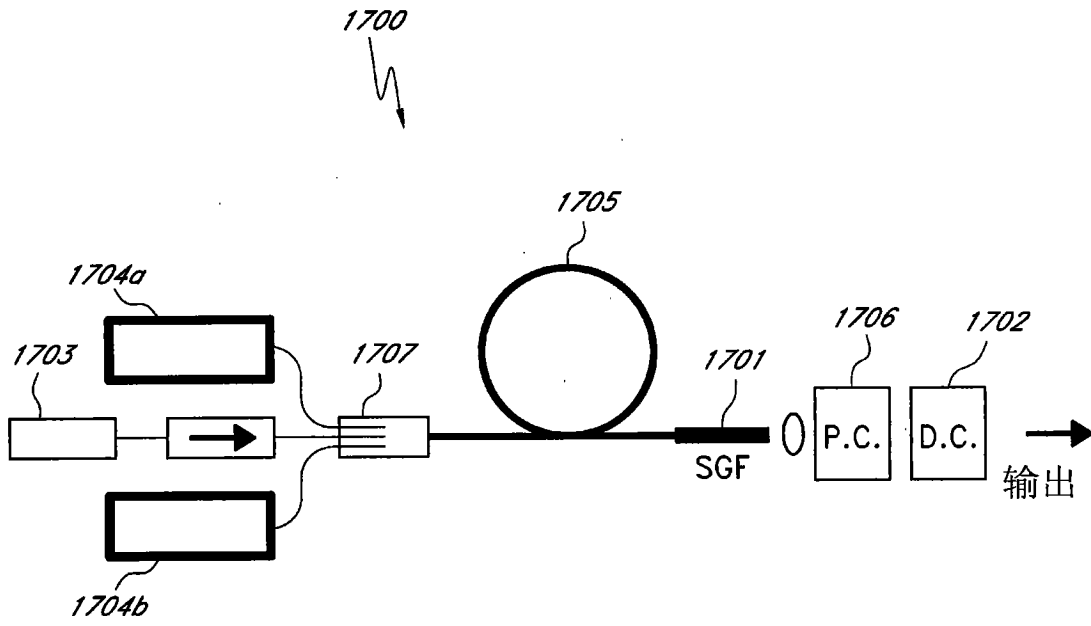


图 17

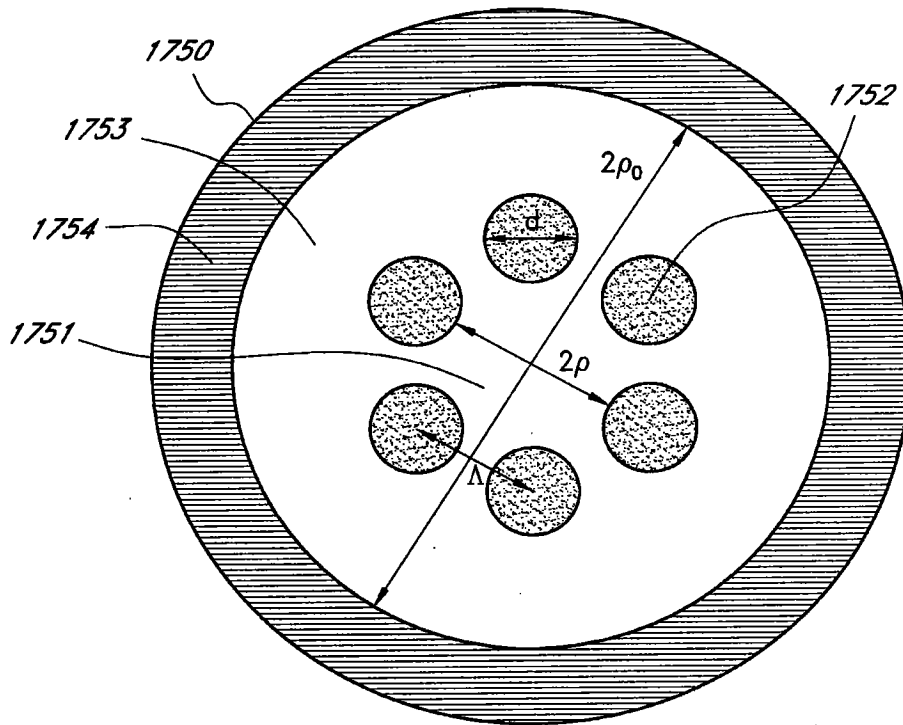


图 17A

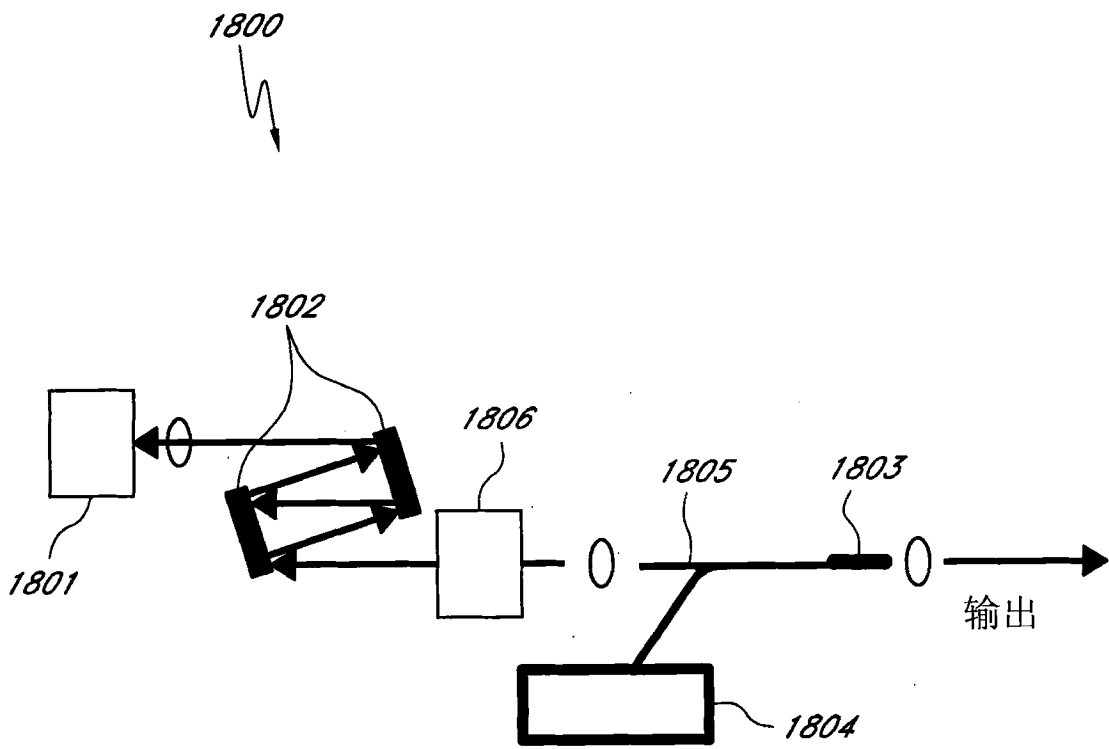


图 18



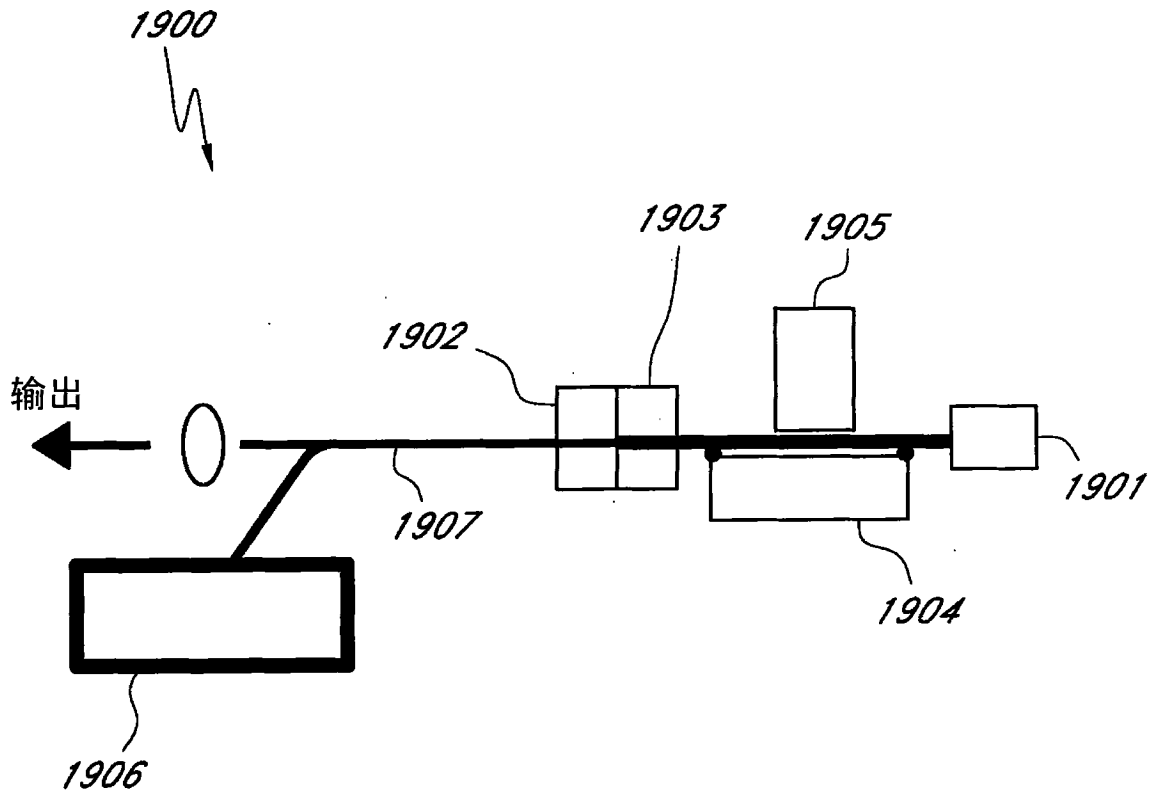


图 19

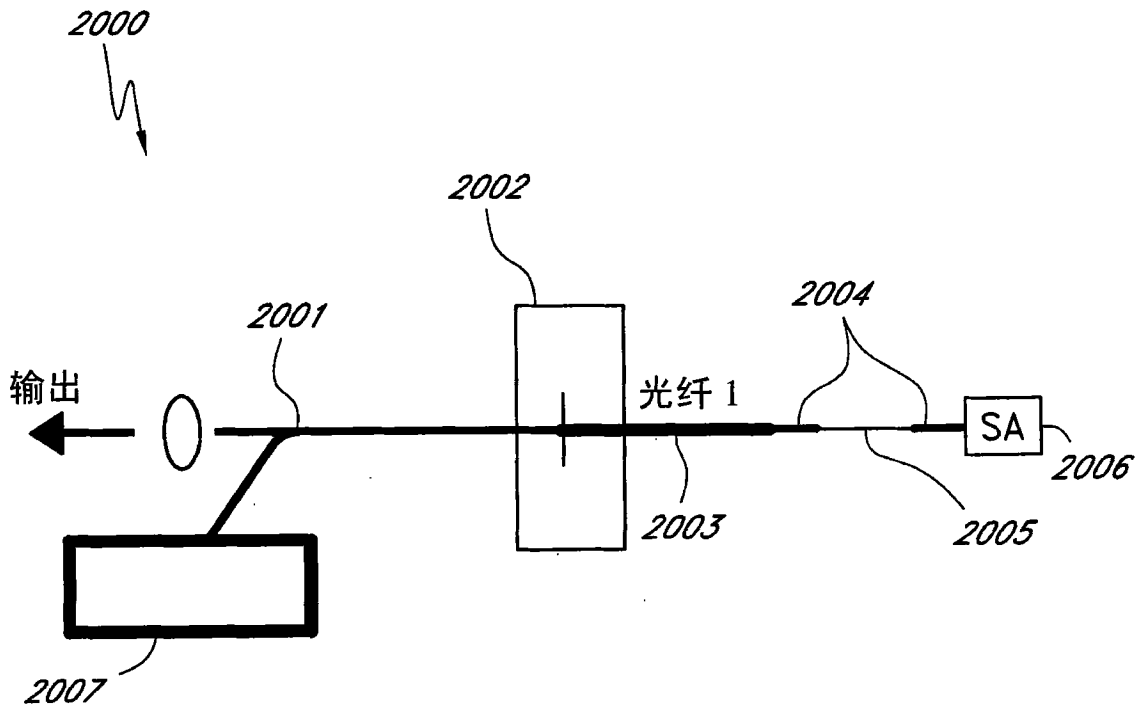


图 20

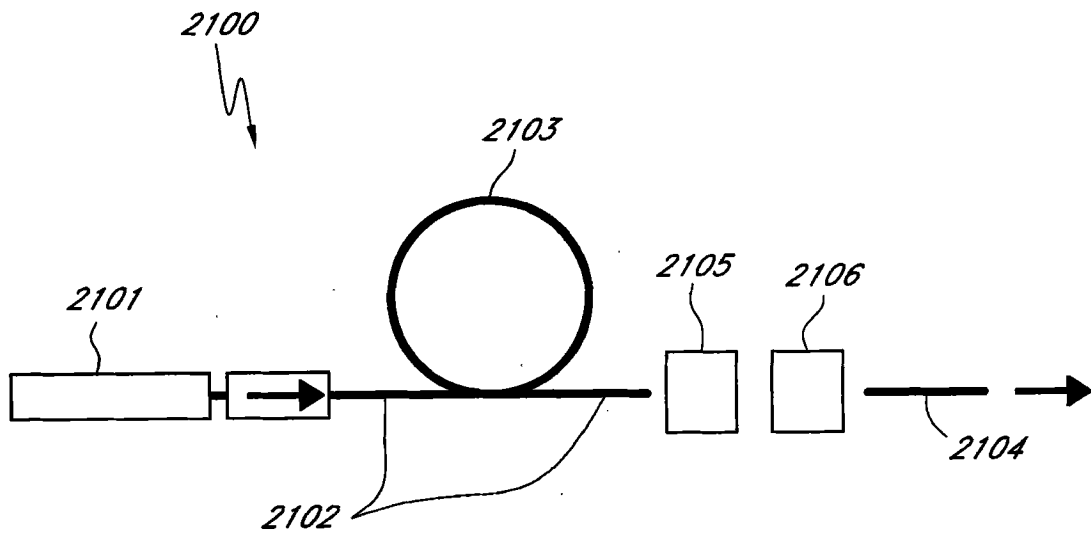


图 21

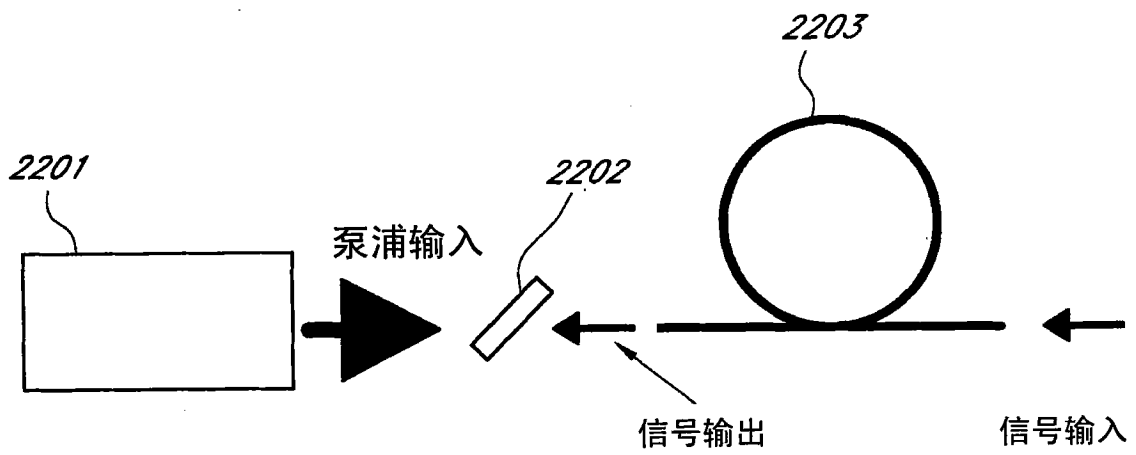
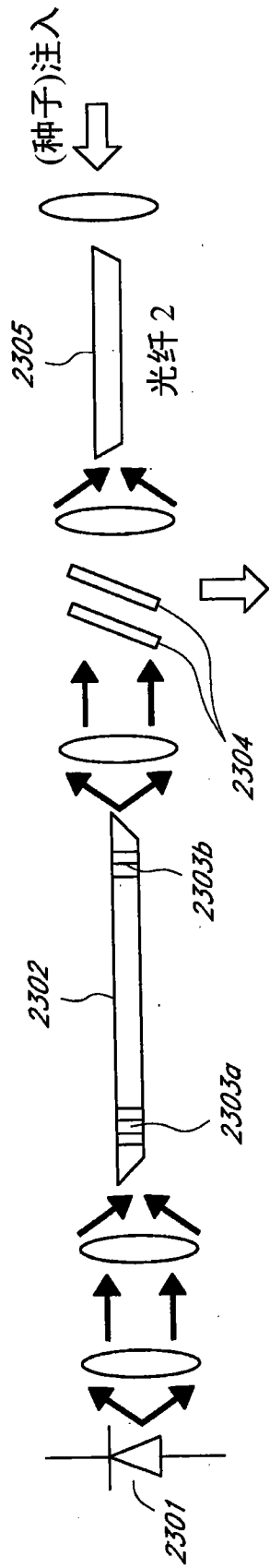


图 22



放大的种子

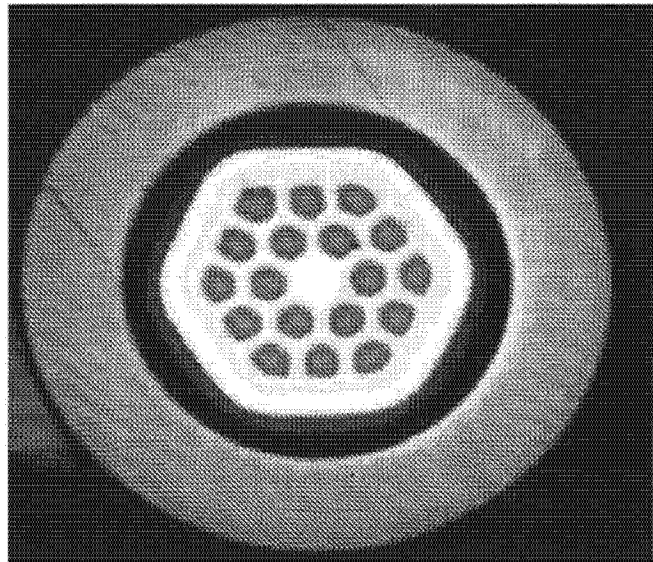


图 23B

图 23A

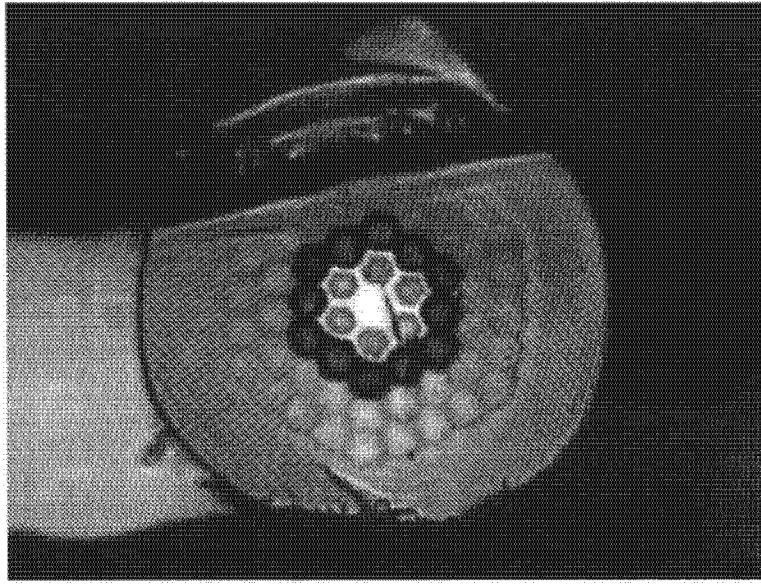


图 23C

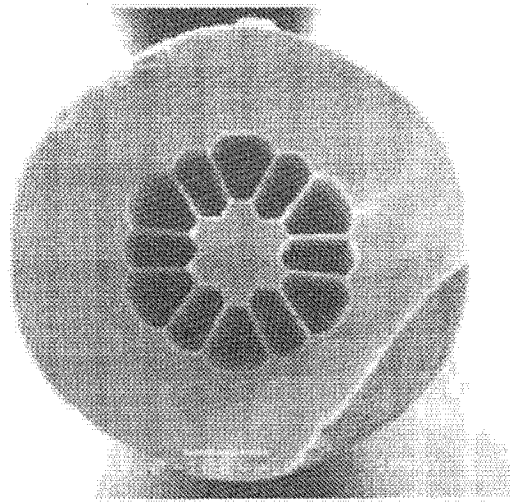


图 23D

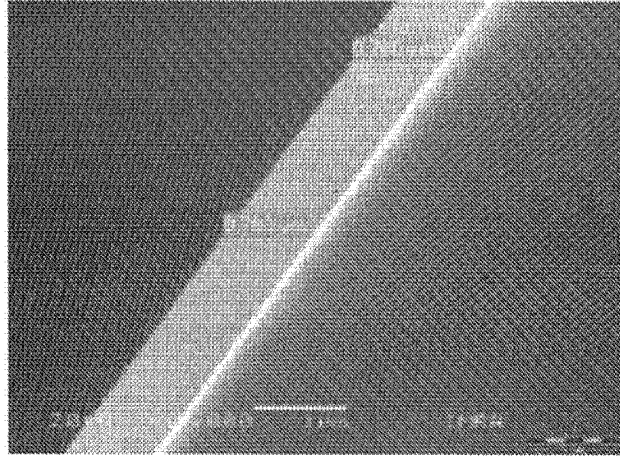


图 23E

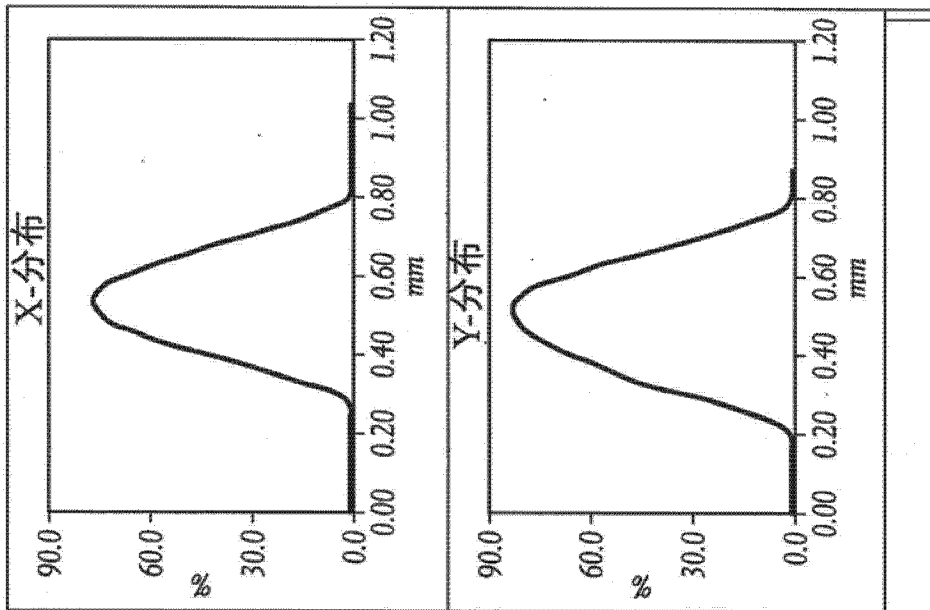
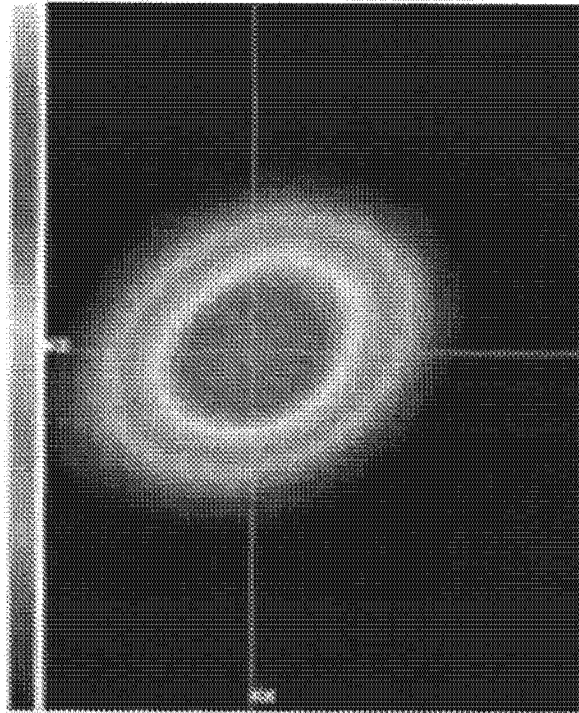


图 23F

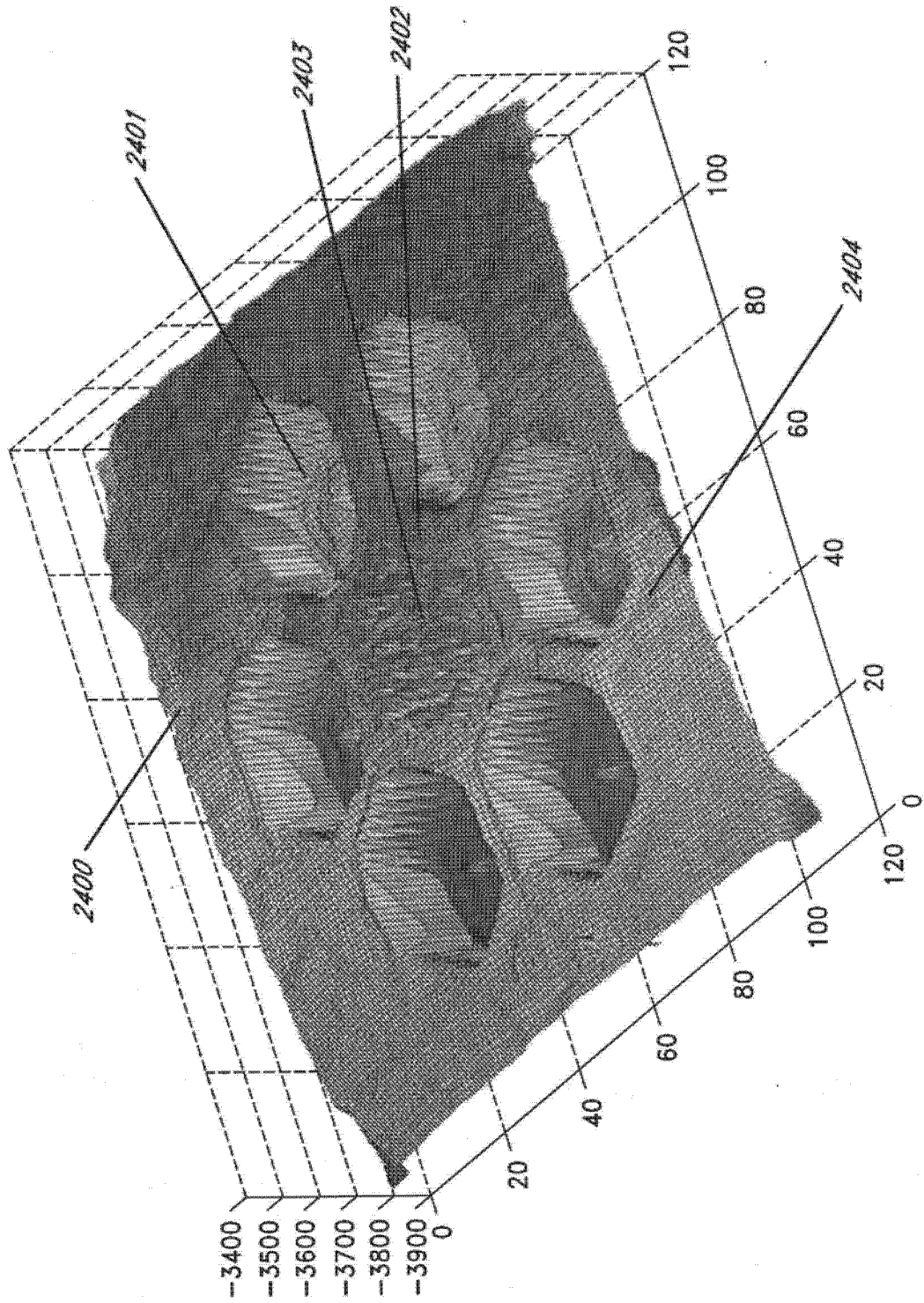


图 24

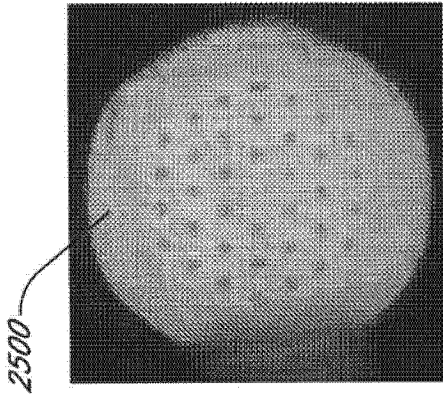


图 25A

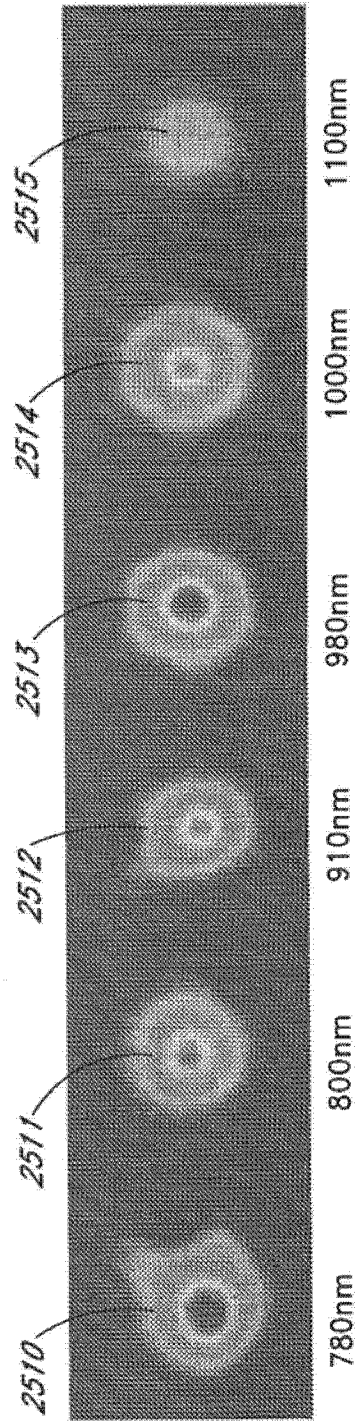


图 25C



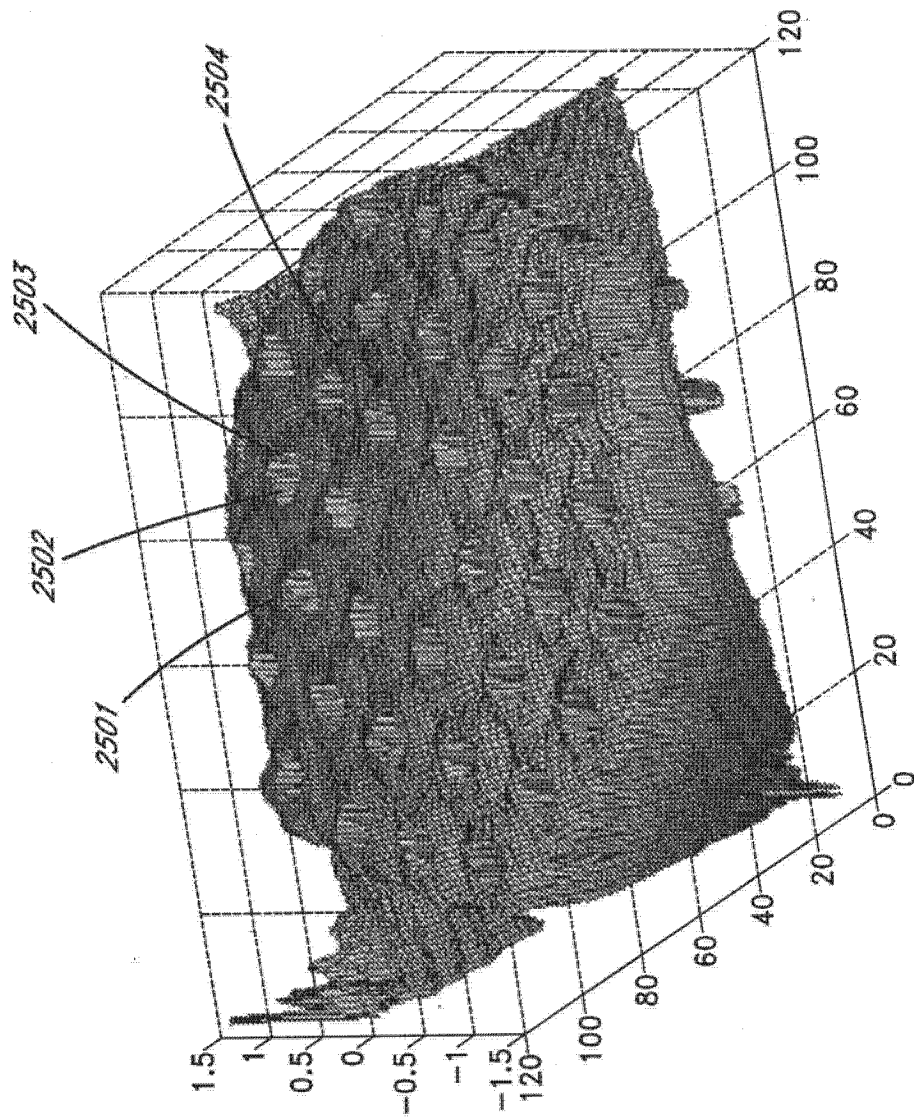


图 25B

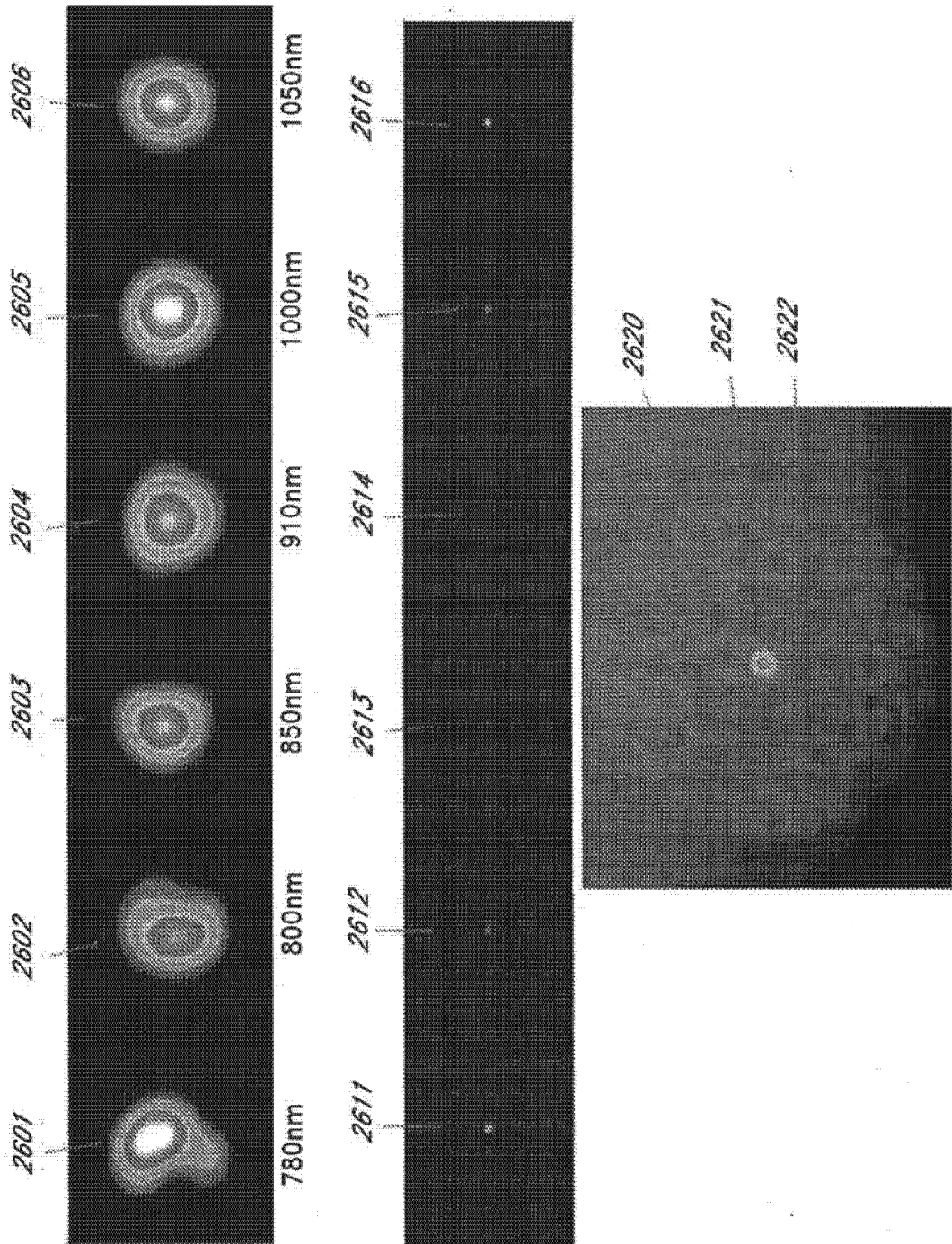


图 26

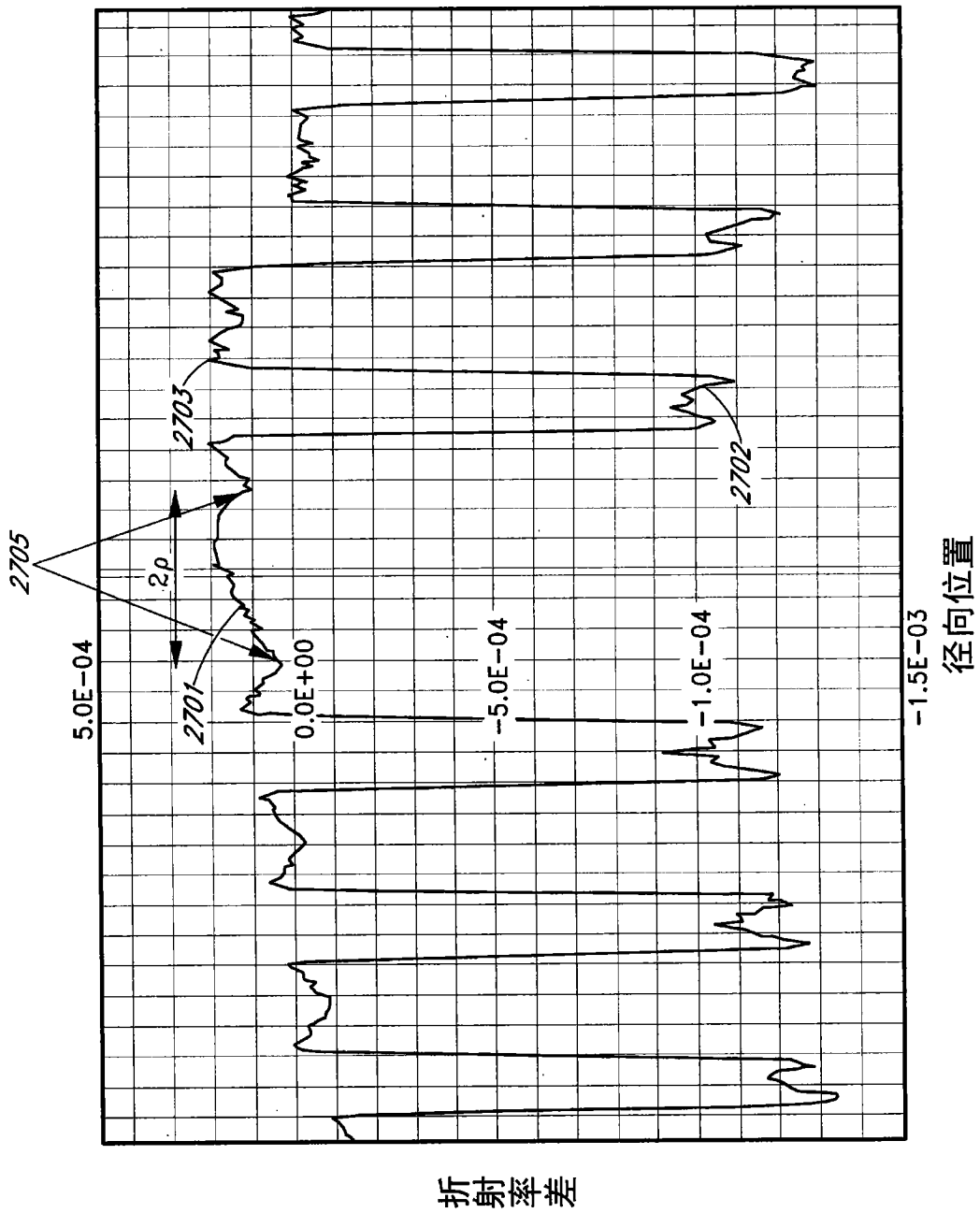


图 27