



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113228431 A

(43) 申请公布日 2021. 08. 06

(21) 申请号 201980086951.6

(74) 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司
72002

(22) 申请日 2019.12.19

代理人 蔡洪贵

(30) 优先权数据

62/786,182 2018.12.28 US

(51) Int.Cl.

H01S 3/098 (2006.01)

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2021.06.28

H01S 3/067 (2006.01)

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2019/067549 2019.12.19

(87) PCT国际申请的公布数据

WO2020/139708 EN 2020.07.02

(71) 申请人 恩耐公司

地址 美国华盛顿州

(72) 发明人 T·L·洛德 D·A·V·克莱尔

C·G·范宁

权利要求书2页 说明书9页 附图7页

(54) 发明名称

用于减少来自谐振腔的受激拉曼散射 (SRS) 光发射的光纤装置和方法

(57) 摘要

用于减少来自谐振腔的发射中的拉曼光谱的光纤激光器装置、系统和方法。生成光束的光纤激光振荡器可以包括拉曼反射输出耦合器,拉曼反射输出耦合器强烈反射在谐振腔内泵浦的拉曼分量,并且部分地反射信号分量以维持振荡器并发射具有减少的拉曼分量的信号。拉曼滤波输出耦合器可以包括超结构光纤光栅,并且这样的光栅可以被线性调频或者以其他方式被设计成具有所需带宽。

100



1. 一种生成光束的光纤激光振荡器,所述光纤激光振荡器包括:
光纤的一段长度,所述光纤的一段长度包括纤芯和一个或多个包层,其中所述光纤的一段长度的至少一部分掺杂有增益介质,所述增益介质能够操作以激发所述光束的至少信号分量,所述信号分量与第一峰值波长相关联;
接近所述光纤的一段长度的第一端的第一反射器;和
至少通过所述光纤的一段长度与所述第一反射器分离的输出耦合器,其中所述输出耦合器在所述第一峰值波长处的反射率低于在与所述光束的拉曼分量相关联的第二峰值波长处的反射率。
2. 根据权利要求1所述的光纤激光振荡器,其中,所述第一反射器在所述第一峰值波长处的反射率高于在所述第二峰值波长处的反射率。
3. 根据权利要求2所述的光纤激光振荡器,其中,所述第一反射器具有比所述输出耦合器窄的带宽。
4. 根据权利要求1所述的光纤激光振荡器,其中:
所述拉曼分量以所述光纤的一段长度的基芯模传播;和
所述输出耦合器包括超结构光纤光栅(SS-FG),所述超结构光纤光栅将所述拉曼分量反射到所述光纤的一段长度的反传播芯模中。
5. 根据权利要求4所述的激光振荡器,其中,所述SS-FG包括一个或多个线性调频的折射率调制,所述线性调频的折射率调制具有在所述SS-FG的长度上变化的折射率调制的周期性或量值。
6. 根据权利要求5所述的光纤激光振荡器,其中,所述线性调频折射率调制具有第一端和第二端,所述第一端具有接近所述光纤的一段长度的最短光栅周期,所述第二端具有接近光纤的第二长度的最长周期,所述光纤的第二长度通过所述SS-FG与所述光纤的第一长度隔开。
7. 根据权利要求4所述的光纤激光振荡器,其中,所述SS-FG在拉曼带内具有单个反射率峰值。
8. 根据权利要求4所述的光纤激光振荡器,其中,所述SS-FG在拉曼带内具有多个反射率峰值。
9. 根据权利要求4所述的光纤激光振荡器,其中:
所述第一峰值信号波长或第二峰值信号波长中的至少一个位于1000nm与1200nm之间;
所述第二峰值信号波长比所述第一峰值信号波长长至少40nm;和
所述光纤的一段长度的所述一个或多个包层还包括内包层和与所述内包层接触的外包层。
10. 根据权利要求9所述的光纤激光振荡器,其中,所述光纤的一段长度仅支持一个纤芯传播模,并且所述SS-FG包括所述纤芯内的折射率调制。
11. 一种光纤激光系统,包括:
根据权利要求1所述的光纤激光振荡器;和
光纤功率放大器,所述光纤功率放大器被耦合以通过所述输出耦合器接收所述信号光谱的一部分。
12. 根据权利要求11所述的系统,还包括

耦合到所述光纤功率放大器的传送光纤;和
处理头,所述处理头耦合到所述传送纤维以将光束发射到自由空间中。

13. 一种光纤激光系统,包括:

用于生成光束的光纤激光振荡器,其中所述光纤激光振荡器包括:

光纤的一段长度,所述光纤的一段长度包括纤芯和一个或多个包层,其中所述光纤的一段长度的至少一部分掺杂有增益介质,所述增益介质能够操作以激发所述光束的至少信号分量,所述信号分量与第一峰值波长相关联;

接近所述光纤的一段长度的第一端的第一反射器,其中所述第一反射器在所述第一峰值波长处的反射率高于在所述第二峰值波长处的反射率;和

输出耦合器,所述输出耦合器至少通过所述光纤的一段长度与所述第一反射器分离,其中所述输出耦合器在所述第一峰值波长处的反射率低于在与所述光束的拉曼分量相关联的第二峰值波长处的反射率;和

光纤功率放大器,所述光纤功率放大器被耦合以通过所述输出耦合器接收所述信号光谱的一部分。

14. 一种生成光束的方法,所述方法包括:

激励光纤的第一长度内的光的基本传播模,其中所述光纤包括掺杂有光增益介质的纤芯和至少一个包层,并且其中所述光包括与第一峰值波长相关联的信号分量和与第二峰值波长相关联的拉曼分量;

在所述光纤的第一端通过第一反射器将所述光反射到基模中;

在丧尸光纤的第二端通过第二反射器将所述光反射到基模中,其中所述第二反射器在所述第二峰值波长处的反射率高于在所述第一峰值波长处的反射率;

在光纤的第二长度中传播与通过所述第二反射器传输的所述信号分量相关联的能量的一部分;和

释放与通过所述第一反射器传输的拉曼分量相关联的能量。

15. 根据权利要求14所述的方法,其中,所述第一反射器在所述第一峰值波长处的反射率高于在所述第二峰值波长处的反射率。

16. 根据权利要求14所述的方法,其中,所述第一反射器具有比所述第二反射器更窄的带宽。

17. 根据权利要求14所述的方法,其中,所述第二反射器包括超结构光纤光栅(SS-FG)。

18. 根据权利要求17所述的方法,其中,所述SS-FG包括一个或多个线性调频折射率调制,所述线性调频折射率调制具有随着接近所述光纤的第一长度的最短光栅周期和接近所述光纤的第二长度的最长周期而变化的周期性。

19. 根据权利要求17所述的方法,其中,所述SS-FG在拉曼带内具有多个反射率峰值。

20. 根据权利要求14所述的方法,其中:

第一峰值信号波长或第二峰值信号波长中的至少一个在1000nm与1200nm之间;

所述第二峰值信号波长比所述第一峰值信号波长长至少40nm;

所述光纤的一段长度的一个或多个包层还包括内包层和与所述内包层接触的外包层;

所述信号分量具有至少为1kW的光功率;和

所述光纤的第一长度仅支持一种传播模。

用于减少来自谐振腔的受激拉曼散射 (SRS) 光发射的光纤装置和方法

[0001] 优先权声明

[0002] 本申请要求于2018年12月28日提交的题为“用于减少来自谐振腔的受激拉曼散射 (SRS) 光发射的光纤装置和方法”的美国临时专利申请第62/786,182号的优先权,其全部内容通过引用结合于本文。

[0003] 背景

[0004] 光纤激光器工业继续增加激光器性能度量,例如平均功率、脉冲能量和峰值功率。脉冲能量和峰值功率与光纤中能量的存储和提取相关联,同时减轻可能对输出脉冲的时间和光谱内容具有不利影响的非线性过程。受激拉曼散射 (SRS) 光是与光纤介质(例如玻璃)的振动相关联的一个这样的非线性过程的结果。SRS通常是通过这些系统所包括的光纤的光纤激光器和/或光纤放大器信号光的不想要的副产品。

[0005] SRS光的生成可以降低预期信号输出波长中的功率。SRS的生成还可能使激光发射不稳定,导致不期望的输出功率波动。SRS的生成也可能对激光系统发射的空间分布有不利影响。也可以通过从激光系统内部或外部的物体(例如用于操纵激光器或放大器输出的光装置或被施加激光输出的工件)的反射,在激光器和放大器系统中再引入SRS。这种反射还会使激光发射不稳定。一旦生成,光纤系统的激光器和/或放大器可以将SRS光放大到对系统内部的部件(例如光纤激光器或光纤放大器)造成灾难性损坏的程度。SRS光也可能对光纤系统外部的部件有害,因为可能没有为SRS光的波长指定外部分量。所递送的波长与所期望的波长之间的这种不匹配可导致工件性能不理想,或者可导致具有集成光纤系统的外部系统造成眼睛安全问题。同样地,可能期望抑制光纤系统内的SRS的生成,从光纤系统移除SRS光,和/或以其他方式减轻SRS光的一个或多个不想要的影响。

附图说明

[0006] 在附图中通过举例而非限制的方式示出了在此描述的材料。为了说明的简单和清楚,图中所示的元件不必按比例绘制。例如为了清楚起见,一些元件的尺寸可能相对于其他元件被夸大。此外,在认为适当的情况下,在图中重复参考标号以指示对应或类似元件。图中:

[0007] 图1是示出根据一些实施例的用于降低谐振腔发射中的拉曼分量的功率的方法的流程图;

[0008] 图2是根据一些实施例的包括用于降低谐振腔发射中的拉曼分量功率的输出耦合器的光纤激光振荡器的示意图;

[0009] 图3A和3B是根据一些实施例的用于谐振腔的光纤的纵向和横向截面图;

[0010] 图4是示出根据一些实施例的适用于降低谐振腔发射中的拉曼分量功率的输出耦合器的透射谱的曲线图;

[0011] 图5A是根据一些实施例的超结构光纤光栅 (SS-FG) 的纵向截面图;

[0012] 图5B是根据一些实施例的SS-FG内的折射率调制的曲线图;

- [0013] 图5C是根据一些实施例的线性调频SS-FG的纵向截面图；
- [0014] 图5D是根据一些实施例的线性调频SS-FG内的折射率调制的曲线图；
- [0015] 图6是示出根据一些实施例的SS-FG的反射率和来自采用SS-FG的光纤激光振荡器的输出的功率谱分布 (PSD) 的曲线图；
- [0016] 图7是示出根据一些实施例的光纤激光振荡器的SS-FG和高反射器的反射率的曲线图；
- [0017] 图8是示出根据一些替换实施例的光纤激光振荡器的SS-FG和高反射器的反射率的曲线图；
- [0018] 图9是示出根据一些替换实施例的光纤激光振荡器的SS-FG和高反射器的反射率的曲线图；
- [0019] 图10是示出根据一些可选实施例的光纤布拉格光栅 (FBG) 和光纤激光振荡器的高反射器的反射率的曲线图, 和
- [0020] 图11是根据一些实施例的具有减少的拉曼光谱泵浦的主振荡器功率放大器 (MOPA) 系统的示意图。

具体实施方式

[0021] 参考附图描述一个或多个实施例。虽然详细示出和讨论了具体的构造和布置, 但是应当理解, 这仅仅是为了说明性目的。相关领域的技术人员将认识到, 在不脱离本描述的精神和范围的情况下, 其他配置和布置是可能的。对于相关领域的技术人员显而易见的是, 本文所述的技术和/或布置可用于除本文详细描述以外的各种其他系统和应用中。

[0022] 在以下对附图的详细描述中参考了附图, 附图形成了描述的一部分并且示出了示例性实施例。此外, 应当理解, 在不脱离所要求保护的的主题的范围的情况下, 可以利用其他实施例并且可以进行结构和/或逻辑改变。还应当注意的是, 例如向上、向下、顶部、底部等的方向和参考仅仅是为了便于描述附图中的特征。因此, 以下详细描述不应被理解为限制意义, 并且所要求保护的的主题的范围仅由所附权利要求及其等效替换来限定。

[0023] 在下面的描述中, 阐述了许多细节。然而, 对于本领域技术人员显而易见的是, 可以在没有这些具体细节的情况下实施本发明。在一些实例中, 以块图形式而非详细地示出了公知的方法和装置, 以避免模糊本发明。在整个说明书中对“实施例”或“一个实施例”的引用意味着, 在本发明的至少一个实施例中包括结合该实施例描述的特定特征、结构、功能或特性。因此, 在本说明书各处出现的短语“在实施例中”或“在一个实施例中”不一定指的是本发明的同一实施例。此外, 特定特、, 结构、功能或特性可以以任何合适的方式组合在一个或多个实施例中。例如第一实施例可以与第二实施例组合, 其中与两个实施例相关联的特定特征、结构、功能或特性不相互排斥。

[0024] 如在本发明的说明书和所附权利要求中所使用的, 单数形式“一 (a)”、“一 (an)”和“该”也旨在包括复数形式的情况, 除非上下文另外明确指出。还应当理解, 本文所用的术语“和/或”指代并涵盖一个或多个相关所列的项目的任何和所有可能的组合。

[0025] 术语“耦合”和“连接”连同它们的变体在本文中可用于描述部件之间的功能或结构关系。应当理解, 这些术语不旨在作为彼此的同义词。更确切地说, 在特定实施例中, “连接”可用于指示两个或两个以上元件彼此直接物理、光或电接触。“耦合”可用于指示两个或

两个以上元件彼此直接或间接(其间具有其他介入元件)物理或电接触,和/或指示所述两个或两个以上元件彼此协作或相互作用(例如以引起效应关系)。

[0026] 如在此使用的,术语“在…之上”,“在…之下”,“在…之间”和“在…上”是指一个部件或材料相对于其他部件或材料的相对位置,其中这样的物理关系是值得注意的。

[0027] 如贯穿本说明书和权利要求书所使用的,由术语“中的至少一个”或“中的一个或多个”结合的项目的列表可以意指所列出的项目的任何组合。例如短语“A、B或C中的至少一个”可以意指A;B;C;A和B;A和C;B和C;或A、B和C。

[0028] 术语“亮度”是在给定方向上行进的光的每单位面积的发光强度的光度量度。术语光系统的“数值孔径”或“NA”是表征该系统可以接受或发射光的角度范围的无量纲数字。术语“光强度”不是官方(SI)单位,而是用于表示在表面上或通过平面的每单位面积的入射功率。术语“功率密度”是指每单位面积的光功率,尽管这也称为“光强度”和“光通量”。术语“径向光束位置”是指在垂直于光纤轴的方向上相对于纤芯中心测量的光束在光纤中的位置。术语“辐射率”是由光源(例如激光器源)的单位面积在给定方向上每单位立体角发射的辐射。可以通过改变光束强度分布和/或光束发散剖面或分布来改变辐射度。术语“折射率分布”或“RIP”是指根据沿垂直于光纤轴的线(1D)或平面(2D)的位置的折射率。许多光纤是根据方位角对称的,在这种情况下,对于任何方位角来说,该一维的RIP都是相同的。术语“光功率”是每单位时间的能量,例如由激光束传递的能量。术语“导向光”描述被限制为在光波导内传播的光。术语“包层模”是由光纤的一个或多个包层内的波导支持的导向传播模。术语“芯模”是由光纤的一个或多个纤芯内的波导支持的导向传播模。

[0029] 本文描述了适用于抑制光纤系统内的SRS生成、从光纤系统移除SRS光和/或减轻光纤系统内的SRS的一个或多个不想要的影响中的一者或多者的光纤装置、系统和方法。如下面进一步描述的,生成光束的光纤激光振荡器可以包括拉曼反射输出耦合器220,拉曼反射输出耦合器220强烈反射在谐振腔内泵浦的拉曼分量,并且部分地反射信号分量以维持振荡器并发射具有减少的拉曼分量的信号。拉曼滤波输出耦合器可以包括超结构光纤光栅,并且这样的光栅可以被线性调频或者被设计成具有所需带宽。

[0030] 图1是示出根据一些实施例的用于降低谐振腔发射中的拉曼分量功率的方法100的流程图。方法100可以用光纤激光振荡器实现,其中谐振腔的信号功率和/或纤维长度足以生成具有显著功率的拉曼分量。方法100可以实现为减少从光纤激光振荡器耦合到例如谐振腔外部的另一光纤的长度中的光的拉曼分量的能量的装置。

[0031] 方法100开始于块105,其中例如通过任何光泵浦技术来激励包括掺杂光纤的一段长度的光纤激光振荡器。该光纤用于支持至少一个纤芯传播模。在受激时,振荡器生成具有信号分量 I_s 的光束。信号分量 I_s 可以在预定信号功率谱上具有每频率或波长(W/nm)的任何范围的光功率。信号功率谱可以与某个最大光功率的峰值波长 λ_s 相关联。第一信号光谱可以具有任何频带特性,并且可以例如包括已知适合于连续波(CW)和/或脉冲光纤激光系统的频带(例如其具有微米峰值波长 λ_s ,例如1050nm、1060nm、1070nm、1080nm等)。在一些示例性实施例中,信号分量 I_s 具有单模态光谱,该单峰光谱具有单峰功率。例如峰值波长 λ_s 可以是单峰光谱的中心波长。尽管信号分量 I_s 可以具有任何光功率,但是在一些示例性光纤激光器实施例中,信号分量 I_s 的功率至少为50W,有利地至少为100W,并且更有利地至少为250W。

[0032] 在谐振腔内激发的光束可以还包括第一拉曼分量 I_r 。例如拉曼分量 I_r 可以由于与光纤传播介质相关联的散射现象而在谐振腔内形成。拉曼成分 I_r 在包括一个或多个拉曼波长的“SRS”或“拉曼”功率谱上具有一定范围的每频率或波长的一定功率(W/nm)。拉曼功率谱可以与最大光功率的峰值波长 λ_r 相关联。拉曼分量 I_r 横跨的波长比信号分量 I_s 的那些波长偏移得更长(例如约50nm)。例如由于噪声,拉曼分量 I_r 还可以具有比信号分量 I_s 更宽的频带。在第一信号分量 I_s 具有1080nm的峰值波长 λ_s 的一些说明性实施例中,导数拉曼分量 I_r 可以具有在1135nm附近的拉曼峰值波长 λ_r 。拉曼峰值波长 λ_r 的功率可以根据激励第一拉曼分量 I_r 的信号功率谱而变化。

[0033] 如下面进一步描述的,在块105处激励的振荡器还包括部分地由第一光反射器限定的谐振腔,该第一光反射器强烈反射拉曼光谱内的一个或多个波长。在有利的实施例中,在块105,信号光谱内的波长也被反射,但是与信号光谱内的一个或多个波长相比,一个或多个拉曼波长被更强烈反射。这样,在块110,通过第一反射器从谐振腔输出的信号光谱的一部分可以大于通过第一反射器传播的拉曼光谱的一部分。因此,该信号选择反射器可以进一步用作振荡器和另一光纤的长度之间的信号输出耦合器。

[0034] 强烈反射信号光谱内的一个或多个波长的第二反射器可以进一步限定谐振腔。第二反射器可以是强烈反射信号光谱的“高反射器”。第二反射器不需要反射拉曼光谱。与拉曼光谱内的一个或多个波长相比,该第二反射器可以更强烈反射一个或多个信号波长。这样,在块115,一部分拉曼光谱可以通过第二反射器被发射出谐振腔。得意离开谐振腔一端的任何SRS能量可以被转储到例如合适的光吸收器和/或热沉中。因此,根据这里的一些实施例,限定激光振荡器的第一反射器和第二反射器的相对强度可以被调整为拉曼光谱和信号光谱之间的互补,以便于这两个光谱的分离,其中光谱中的单个光谱主要从谐振腔的光纤传播介质的相对端发射出去。

[0035] 图2是根据一些实施例的包括用于降低来自振荡器的信号发射的拉曼分量功率的输出耦合器的激光振荡器200的示意图。振荡器200通过激发光的信号谱来生成光束。振荡器200包括在传播光纤205内由靠近光纤205的第一端的第一光纤光栅215和靠近光纤205的第二端的第二光纤光栅220限定的光腔。光纤205适用于支持至少一个导芯模(即,光纤205可以是单模或多模光纤)。例如在光纤205内,信号分量 I_s 和拉曼分量 I_r 可以各自以芯导模 $1m_1$ 传播。在一些例子中,芯导模是线性偏振模 LP_{1m} ,一个实施例是光纤芯的线性偏振横向基模 LP_{01} 。 LP_{01} 在射束形状、通过自由空间传播期间的最小射束扩展(通常称为“衍射受限”)以及最佳聚焦能力方面具有所需特性。因此,在光纤激光器工业中,基模 LP_{01} 传播通常是有利的。利用足够的纤芯直径 $D_{core,1}$ 和/或NA对比度,光纤205可以支持多于一个横向光模的传播。例如光纤205可以包括可在LMA机制等中操作的大模面积(LMA)光纤。

[0036] 图3A和图3B分别是根据一些多包层光纤实施例的光纤205的纵向和横向截面图。尽管示出了双包层光纤实施例,但是光纤205可以具有已知适合于光纤的任何数量的包层(例如单包层、三包层等)。在图3A和3B所示的例子中,光纤205具有中心纤芯305和包围纤芯305的环形内包层310。环形外包层315包围内包层310。纤芯305和内包层310可具有任何合适的组分(例如任何各种材料的玻璃,例如 SiO_2 、用 GeO_2 掺杂 SiO_2 、锗硅酸盐、五氧化二磷、磷硅酸盐、 Al_2O_3 、铝硅酸盐等,或其任何组合)。例如外包层315可以是聚合物或玻璃。尽管未示出,一个或多个保护(非光学)涂层可以进一步包围外包层315。

[0037] 光纤205可以具有任何合适的折射率分布(RIP_v)。这里使用的“折射率分布”或“RIP”是指根据沿着与光纤轴(图3A中的z轴)垂直的线(例如图3B中的x轴或y轴)或面(例如图3B中的x-y平面)中的位置的折射率。在图3B所示的示例中,RIP是径向对称的,在这种情况下,RIP对于任何方位角都是相同的。或者,例如对于双折射光纤结构,RIP可以根据方位角而变化。纤芯305、内包层310和外包层315可以各自具有任何RIP,包括但不限于阶跃折射率和渐变折射率。“阶跃折射率型光纤”具有在纤芯305内基本上平坦的RIP(折射率与位置无关)。内包层310还可以在 $D_{\text{Clad},1}$ 上具有基本平坦的折射率(RI),RI在纤芯305和内包层310之间的界面处阶跃。图3A示出了适用于光纤激光器的一个示例性阶跃RIP的示例。或者,纤芯305和内包层310中的一个或多个可以具有“渐变折射率”,其中RI随着径向位置的增加(即随着与纤芯和/或包层轴的距离的增加)而变化(例如减小)。

[0038] 内包层310可以具有大于纤芯305的面积,并且还可以具有更高的NA。尽管将芯305和内包层310示出为同心的(即中心纤芯),但它们不必是同心的。纤芯305和包层310中的一个或多个也可以是除圆形之外的各种形状,例如但不限于环形、多边形、弓形、椭圆形或不规则形状。所示实施例中的纤芯305和内包层310是同轴的,但也可以具有相互偏置的轴。虽然 $D_{\text{Clad},1}$ 和 $D_{\text{Core},1}$ 被示为在纵向(图3A中的z轴)上围绕中心纤维轴是常数。直径 $D_{\text{Clad},1}$ 和 $D_{\text{Core},1}$ 可替代地在纵向纤维长度上变化。在一些示例性实施例中,芯直径 $D_{\text{Core},1}$ 在10-100微米(μm)的范围内,并且内包层直径 $D_{\text{Clad},1}$ 在100-1000 μm 的范围内,尽管每者也可以具有其他的值。

[0039] 返回图2,光纤205包括掺杂的纤维长度210,其可以包括任何合适的光学有源增益介质。在一些实施例中,掺杂纤维长度210包括稀土离子,例如 Er^{3+} (铒离子)、 Yb^{3+} (镱离子)、 Nd^{3+} (钕离子)、 Tm^{3+} (铥离子)、 Ho^{3+} (钬离子)等,或其任何组合。一个或多个包层可以包围光纤205的纤芯和/或掺杂的纤维长度210。激光振荡器200光耦合到泵浦光源225,泵浦光源225例如可以是固态二极管激光器或灯。在掺杂纤维长度210包括多包层光纤的情况下,泵浦光源225可以以共传播或反传播的方式耦合到包层中。

[0040] 拉曼反射输出耦合器220可操作为信号输出耦合器(OC),信号输出耦合器将在光纤205的芯模中传播的信号光谱 I_s 的一部分发射出振荡器200。拉曼反射输出耦合器220还可操作为SRS抑制光栅,SRS抑制光栅将在光纤205的芯模(例如基模)中传播的拉曼光谱 I_r 反射到光纤205的反传播芯(例如基模)中。拉曼反射输出耦合器220对波长足够敏感,以区分一个或多个信号波长与一个或多个拉曼波长。在所示实施例中,拉曼反射输出耦合器220是超结构光纤光栅(SS-FG),超结构光纤光栅包括彼此邻近放置的多个较小光纤光栅,如下文进一步描述。拉曼反射输出耦合器220可以有利地至少在峰值信号波长 λ_s 处具有比在峰值拉曼波长 λ_r 处更低的反射率。图4是示出根据一些实施例的光纤光栅的根据波长的透射百分比的曲线图,该光纤光栅适于降低谐振腔发射中的拉曼分量功率。拉曼反射输出耦合器220可以显示图4所示的透射特性,例如在包括峰值信号波长 λ_s 的第一波段上具有高(例如大于50%)的透射率,而在包括峰值拉曼波长 λ_r 的第二波段上具有低(例如小于5%)的透射率。

[0041] 邻近光纤205的与拉曼反射输出耦合器220相对的一端的光纤光栅215也将强烈反射至少信号分量 I_s ,并且因此可以作为在峰值信号波长 λ_s 处具有较高反射率的“高反射器”来操作。在示例性实施例中,光纤光栅215还可以在峰值信号波长 λ_s 处具有高于其在峰值拉

曼波长 λ_r 处的反射率的反射率。在一些这样的实施例中,光纤光栅215在峰值拉曼波长 λ_r 处的反射率低于拉曼反射输出耦合器220在峰值拉曼波长 λ_r 处的反射率。因此,光纤光栅215还可用于将在光纤205的芯模中传播的一部分拉曼光谱 I_r 透射出振荡器200。光纤光栅215还可以对波长足够敏感,以从一个或多个拉曼波长中区分出一个或多个信号波长,其反射率与拉曼反射输出耦合器220的反射率互补。光纤光栅215可以具有比拉曼反射输出耦合器220更宽或更窄的带宽。在所示实施例中,光纤光栅215是单光纤布拉格光栅(FBG)。然而,可选地,光纤光栅215可以具有更复杂的架构(例如包括超结构、线性调频或变迹中的一个或多个)。

[0042] 图5A是根据一些实施例的包括超结构光纤光栅(SS-FG)521的光纤的一段长度的放大截面图。例如SS-FG 521可以用作拉曼反射输出耦合器220(图2)。SS-FG 521可以从不依赖于多个相位掩模的单个光栅写入过程生成多个反射峰,并且可以比多个FBG占用更少的光纤长度。SS-FG 521与芯模电场相互作用并在长周期(LP)结构内引起幅度或相位的调制。相互作用可以是直接的或渐逝的。因此,光栅的结构调制可以位于包层内或者甚至包括外表面扰动。然而,在所示的示例中,SS-FG 521在超结构光栅长度 L_1 上至少在纤芯305内包括折射率(RI)扰动405。在所说明的实例中,SS-FG 521在双包层光纤内,例如具有上文针对光纤205所描述的属性中的一个或多个。RI扰动405的折射率 n_4 高于标称纤芯折射率 n_3 。对于外包层315具有折射率 n_1 并且内包层310具有折射率 n_2 的实施例,模式SS-FG 521内的RI可以变化为 $n_1 < n_2 < n_3 < n_4$ 。RI扰动405可以在目标波长范围内影响在纤芯305内引导的光,而目标波段外的光可以基本上不受RI扰动405的影响。如图所示,SS-FG 521包括多个子光栅510,每个子光栅具有短周期。子光栅510彼此相邻并由一些间隔隔开以具有长周期。

[0043] 图5B是根据一些实施例的在SS-FG 521的长度上的折射率的曲线图。如图所示,RI具有幅度调制,其中周期 P 定义为一个子光栅的长度 L_2 和一个非光栅间隙的长度 L_{gap} 之和。SS-FG 521具有占空比 D ,该占空比 D 是子光栅长度 L_2 与超结构周期 P 的比率。每个子光栅510可以具有周期 Λ 。子光栅部分510限定宽反射带,并且多个子光栅510一起限定宽反射带内的峰。通过定义SS-FG 521的周期和占空比,可以获得适合于拉曼成分 I_r 的反射的各种反射峰。可以预先确定子光栅参数(例如周期 Λ 、RI调制幅度)以指定在峰值信号波长 λ_s 和峰值拉曼波长 λ_r 中的每一个处反射的光的分数。可以通过适合于信号输出耦合和强拉曼反射两者的量来控制子光栅周期 Λ 和/或RI调制幅度以反射信号分量 I_s 和拉曼分量 I_r 。

[0044] 子光栅周期 Λ 可以根据拉曼光谱而变化,但是通常小于峰值拉曼波长 λ_r 的一半,该峰值拉曼波长 λ_r 是足够短的周期,使得拉曼分量 I_r 内的波长将满足布拉格条件并被反射回反传播芯模。因此,SS-FG 521也可以被称为超结构光纤布拉格光栅(SFBG或SS-FGB)。在一些另外的实施例中,超结构周期 P 显著大于峰值拉曼波长 λ_r 的一半,并且可以是峰值拉曼波长 λ_r 的一半的十倍或更多倍。在其中峰值拉曼波长 λ_r 为1135nm的一些特定实例中,子光栅周期 Λ 小于570nm(例如如果 n_{eff} 假定为1.45,则周期为391nm),而超结构周期 P 可在10 μm 与1000 μm 之间。

[0045] 图6是示出根据一些实施例的示例性SS-FG的反射率和使用SS-FG的光纤激光器的功率谱分布(PSD)的曲线图。例如示出的光谱函数可以从激光振荡器200的模型生成。示出了适用于高功率光纤激光器的代表性波长,但是图6中传送的信息适用于各种应用中可能相关的各种其他波长。在图6中,根据波长的反射率绘制在左边的相关轴上,根据波长的PSD

绘制在右边的相关轴上。SS-FG的反射率的频谱分布显示了以峰值拉曼波长 λ_r 为中心的一次反射峰620(例如 $\sim 1135\text{nm}$)。该“拉曼”反射峰620在峰值拉曼波长 λ_r 处具有 ~ 1.0 的强光栅反射率,使得SS-FG能够抑制来自激光振荡器发射的拉曼。以虚线示出的拉曼PSD光谱650表示由信号PSD光谱660泵浦的拉曼功率光谱,所述信号PSD光谱660具有峰值信号波长 λ_r (例如 $\sim 1080\text{nm}$)以及将从没有拉曼反射峰620的振荡器发射的信号。相反,在存在反射峰620的情况下,通过SS-FG离开振荡器的拉曼功率谱665具有显著较低的功率,并且根据SS-FG反射和拉曼PSD谱之间的带宽重叠被刻槽到多模态(例如双峰值)谱中。由SS-FG反射的剩余拉曼功率谱可以透射通过另一反射器,例如其中该反射器具有以峰值信号波长 λ_s 为中心的窄带反射率。

[0046] 在拉曼带之外的波长处的二次反射峰621以更低的反射率值(例如 ~ 0.2)周期性地达到峰值。所说明的实例展示可如何将SS-FG设计成具有以预定峰值信号波长 λ_s (例如 $\sim 1080\text{nm}$)为中心的二次反射峰621中的一者,从而使SS-FG能够具有用于振荡器操作的足够反射并服务于信号输出耦合器的额外功能。信号PSD光谱660表示可以通过SS-FG从谐振腔输出的信号,该SS-FG在峰值信号波长 λ_s 处具有所需反射率。

[0047] 因此,图6中所示的SS-FG响应非常适合于激光振荡器200(图2),其中拉曼反射输出耦合器220补充光纤光栅215,光纤光栅215具有也以峰值信号波长 λ_s 为中心的高反射器FBG架构。例如在图7中,由光纤光栅215在峰值信号波长 λ_s 处显示的强反射峰710以虚线示出,用于与由SS-FG显示的较弱反射峰621相比较。进一步示出了由SS-FG在峰值拉曼波长 λ_r 处显示的强反射峰620,用于与信号反射峰进行比较。在该示例中,光纤光栅215被设计为具有比SS-FG稍微更多的反射带宽,这可以有利地捕获SS-FG 0C的整个信号带宽。

[0048] 在一些其他实施例中,激光振荡器包括非周期性(即线性调频)超结构光纤光栅。相对于周期性超结构实施例,包括折射率幅度调制或周期的线性调频的实施例可以在每个反射峰处提供更宽的反射带宽,更好地抵消拉曼光谱的更大宽度,以更好地抑制来自振荡器发射的拉曼分量。

[0049] 图5C是根据一些实施例的包括线性调频SS-FG 522的光纤的一段长度的扩展截面图。线性调频SS-FG 522可用作拉曼反射输出耦合器220(图2)。在所示示例中,线性调频SS-FG 522还包括在超结构光栅长度L1上的至少纤芯305内的折射率(RI)扰动405。如上所述,光栅的结构调制可以位于包层内,或者甚至包括附加于或替换所示的芯调制的外表面扰动。在双包层光纤内,RI扰动405具有高于标称纤芯折射率 n_3 的折射率 n_4 ,对于示例性的周期线性调频SS-FG,这两者在图5D中进一步示出。对于外包层315具有折射率 n_1 ,内包层310具有折射率 n_2 的实施例,模式线性调频SS-FG 522内的RI可以变化为 $n_1 < n_2 < n_3 < n_4$ 。

[0050] 如在图5D中进一步示出的,RI扰动405具有随子光栅长度L2变化的周期。各个子光栅510可以是相同线性调频的子光栅,或者每个子光栅可以具有不同的线性调频。在所示实施例中,线性调频在超结构光栅长度L1上连续变化。在一个例子中,子光栅周期 Λ 以最小周期 Λ_1 在线性调频SS-FG 522的蓝端开始,并且在整个光栅长度L1上线性增加到最大周期 Λ_2 ,就好像没有间隙一样。在另一个例子中,光栅折射率调制类似地在整个光栅长度L1上变化。在任一示例中,可以通过用间隙周期性地分裂线性调频来创建超结构,在所示示例中,间隙在光栅长度L1上是均匀的(相等的)。具有在整个光栅长度L1上变化的线性调频的超结构光栅将加宽反射峰(例如以生成图8中所说明且在下文进一步描述的反射光谱)。这

样的超结构光栅也可以用单个线性调频相位掩模和单个振幅掩模来制造,以在子光栅510之间生成间隙。相反,单个子光栅510的相同线性调频可以加宽反射峰的包络,但不必加宽反射峰本身。这种光栅的制造例如可以是通过逐点写入。

[0051] 每个子光栅510纵向不对称,具有第一“蓝”端和第二“红”端。因此,线性调频SS-FG 522与都面对线性调频SS-FG 522的蓝色端的子光栅的蓝色端是不对称的。光栅周期 Λ_1 和 Λ_2 可以各自基于线性调频SS-FG522被调谐到的拉曼光谱而变化。在示例性实施例中,最短光栅周期 Λ_1 小于中心拉曼波长的一半。因此,在中心拉曼波长为1080nm左右的一些示例中,最短光栅周期 Λ_1 为200-5500nm。根据光栅长度L上的任何函数(例如线性),光栅周期可以在最短和最长周期之间变化,例如变化例如变化10s或100s的nm。长的超结构光栅周期P也可以是线性调频的,例如其中间隙长度 L_g 是z的函数(未示出)。光栅周期P的线性调频可以例如使目标拉曼波长处的反射峰变窄,然后使其他旁瓣处的峰变宽。可替换地或附加地,折射率调制的幅度可以是线性调频的,例如其中 n_4 和/或 n_3 是z的函数(未在图中描绘)。

[0052] 图8是示出光纤激光振荡器的线性调频SS-FGOC和高反射器的反射率的曲线图。图8所示的反射率响应表示适用于光纤激光振荡器200(例如图2)的光纤光栅。与图7所示的相应反射率响应相比,在由线性调频SS-FG OC在峰值拉曼波长 λ_r 处显示的强反射峰820中,线性调频SS-FG的较宽反射带宽是明显的。强反射峰820的宽度也大于在峰值信号波长 λ_s 处由光纤光栅215显示的强反射峰710的宽度。SS-FG显示的较弱的反射峰621也较宽。在该示例中,光纤光栅215被设计为具有比线性调频SS-FG略小的信号反射带宽,这对于定义振荡器的信号带宽可能是有利的。

[0053] 对于上述SS-FG实施例,在拉曼带内有一个反射峰。在可选实施例中,SS-FG可以在拉曼带内显示多于一个这样的反射峰。对于这样的实施例,高反射率带宽实际上更宽,这提供了没有线性调频结构的更大拉曼抑制的优点。图9是示出根据一些这样的实施例的光纤激光振荡器的拉曼反射输出耦合器和高反射器的反射率的曲线图。图8所示的反射率响应表示适用于光纤激光振荡器200(例如图2)的光纤光栅。多个强反射峰920被紧密地间隔(例如以小于5nm的距离)并且跨越拉曼带。如图所示,最强的一组峰值以峰值拉曼波长 λ_r 为中心,更接近峰值拉曼波长 λ_r 的每个反射峰具有更大的反射性。由光纤光栅215显示的强反射峰710进一步用虚线示出,以用于比较。如图所示,一个较小的反射峰921位于峰值信号波长 λ_s 处以保持OC功能。在该示例中,光纤光栅215被设计为具有比SS-FG稍大的信号反射带宽,这对于捕获SS-FG的所有信号带宽可能是有利的。

[0054] 即使在折射调制的幅度指数受到限制(例如小于 10^{-2})的情况下,上述拉曼反射输出耦合器提供了良好的SRS抑制和信号OC功能。对于可以进行较大RI调制的材料系统(例如 10^{-2} 或更大RI调制),较短的均匀FBG变得更能够实现可接受的SRS抑制和信号OC性能。对于这样的实施例,单个短强光栅可以提供以拉曼波长为中心的宽反射率以及反射光谱的旁瓣内的信号OC的部分反射率。对于线性调频SS-FG,可以针对窄的光谱带宽制造高反射器光栅以完成振荡器腔。为了发射信号功率的所需部分,也可以采用变迹来进一步调整旁瓣的强度。图10是示出根据具有大光栅折射率对比度的一些替换实施例的光纤激光振荡器中的FBG和高反射器的反射率的曲线图。宽拉曼反射峰1020以峰值拉曼波长 λ_r 为中心。在光栅折射率对比度为 $\sim 10^{-2}$ 的该示例中,拉曼反射峰1020在超过50nm的带宽上接近1.0。旁瓣之一提供以峰值信号波长 λ_s 为中心的反射峰1021。为了比较,高反射器反射峰710再次用虚线示

出。对于这些实施例,可以制造具有窄带宽的高反射器以完成振荡器腔并限定从腔发射的信号谱。

[0055] 根据广泛的应用,可以在各种激光器装置和系统中实现上述激光振荡器腔结构。作为一个示例,图11描绘了具有减少的拉曼光谱泵浦的主振荡器功率放大器(MOPA)系统1100的示意图。MOPA系统1100可适用于高功率光纤激光器应用,例如材料处理等。系统1100包括生成基本上如上所述的光束的光纤激光振荡器221。拉曼滤波OC 220可以是适于将信号光谱耦合出谐振腔的任何拉曼反射光栅,并且可以例如具有上述任何属性。光纤激光振荡器221通过拉曼滤波OC 220光耦合到光纤功率放大器1122。光纤放大器1122用于增加至少由振荡器221激发的信号谱的辐射亮度。光纤放大器1122包括一定长度的掺杂纤维长度1105,其可以具有上述用于掺杂纤维长度210的任何特性。例如在一些实施例中,掺杂纤维长度1105包括稀土离子,例如 Er^{3+} (铒离子)、 Yb^{3+} (镱离子)、 Nd^{3+} (钕离子)、 Tm^{3+} (铥离子)、 Ho^{3+} (钬离子)等,或其任何组合。功率放大器可由任何泵浦光源235(例如激光二极管、灯等)泵浦,因为本文的实施例不限于此方面。在一些实施例中,掺杂光纤1105包括支持纤芯内的多个传播模的多模光纤。在掺杂纤维长度210包括能够在纤芯内仅支持一个导向传播模的单模光纤的一些有利实施例中,掺杂光纤1105包括能够在纤芯内支持多个传播模的多模光纤。

[0056] 根据所示实施例,光纤放大器1122位于拉曼滤波OC 220和传送光纤1150之间。传送光纤1150还耦合到处理头250,在处理头250中,在传送光纤1150中传播的光束可以发射到自由空间传播中。

[0057] 虽然已经参照各种实施方式描述了本文阐述的某些特征,但是该描述不旨在被解释为限制性的。因此,对于本发明所属领域的技术人员而言很清楚的是,对本文描述的实现方式的各种修改以及其他实现方式被认为落入本发明的精神和范围内。应当认识到,本发明不限于如此描述的实施例,而是可以在不脱离所附权利要求的范围的情况下进行修改和改变。上述实施例可以包括仅仅采用这些特征的子集、采用这些特征的不同顺序、采用这些特征的不同组合,和/或采用与明确列出的那些特征不同的附加特征。因此,本发明的范围应当参照所附权利要求以及这些权利要求所赋予的等效物的全部范围来确定。

100
↘



图1

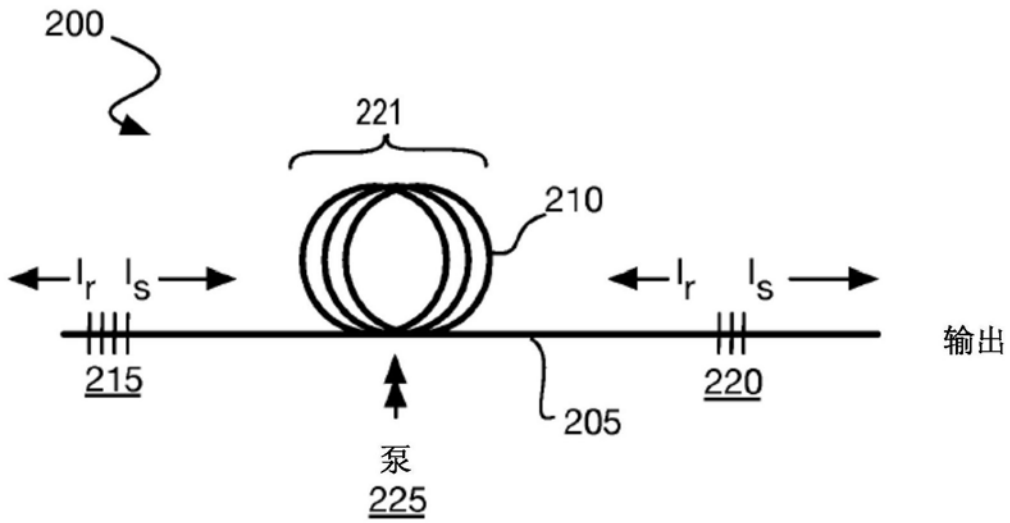


图2

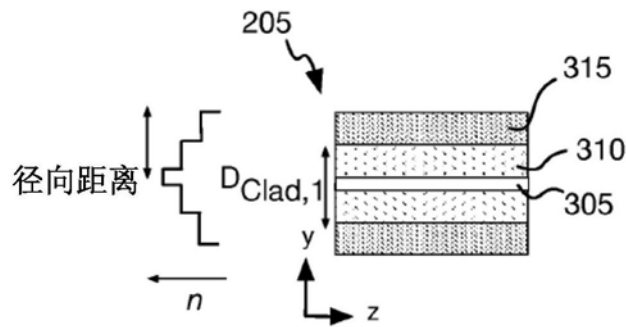


图3A

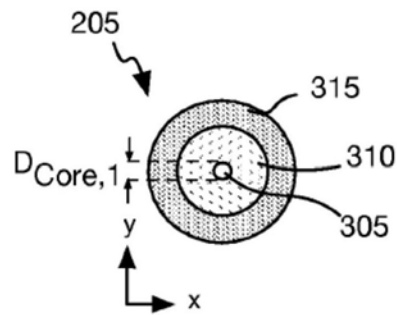


图3B

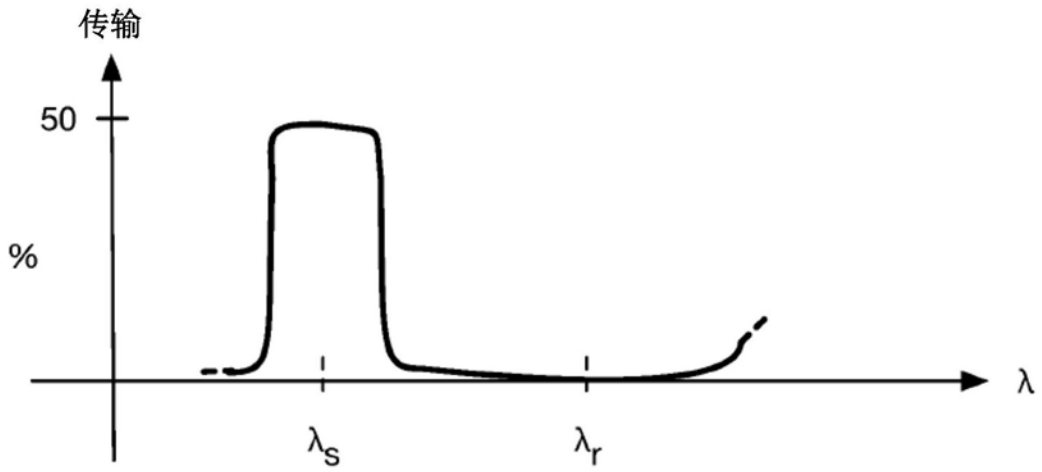


图4

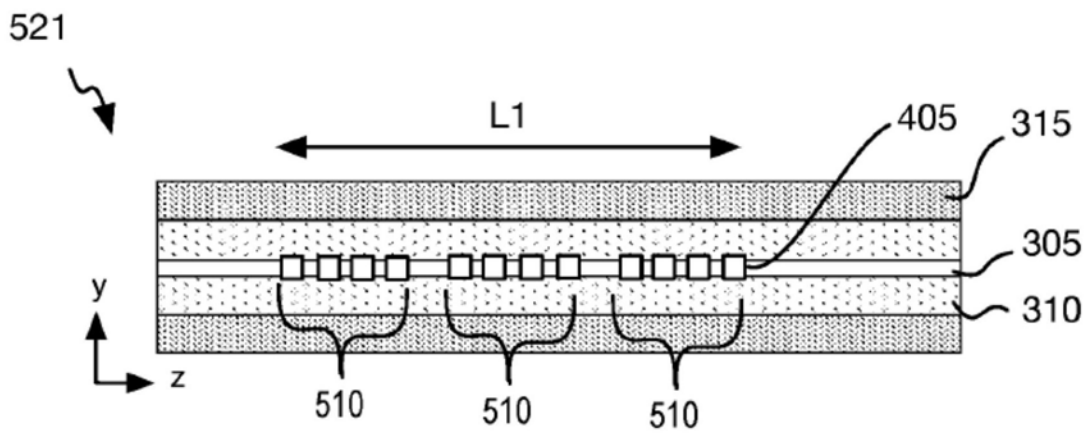


图5A

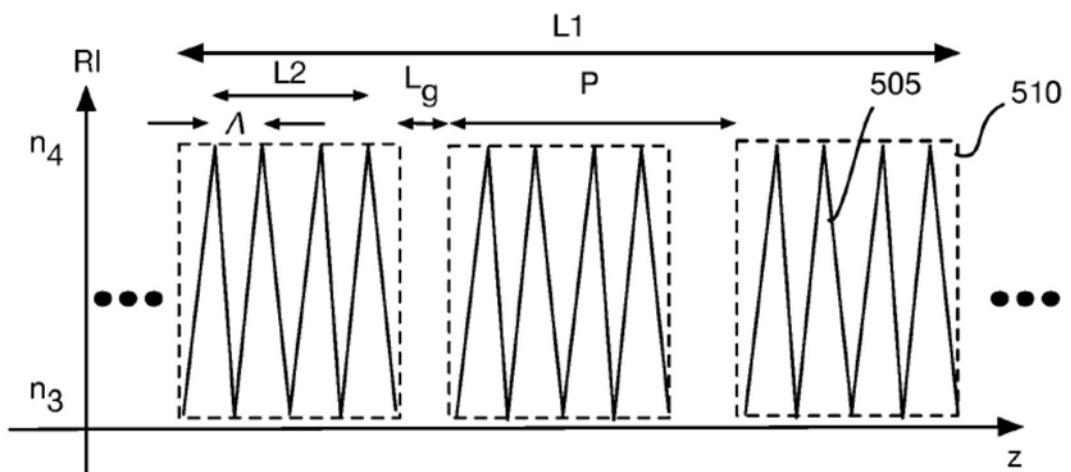


图5B

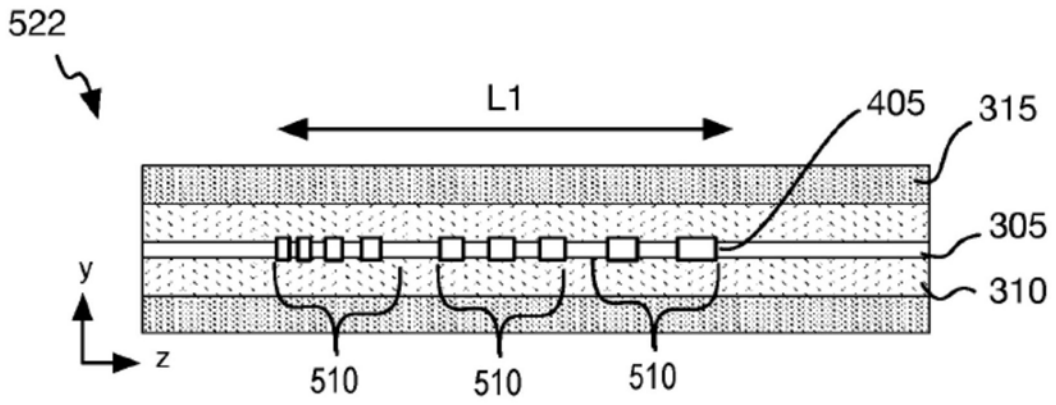


图5C

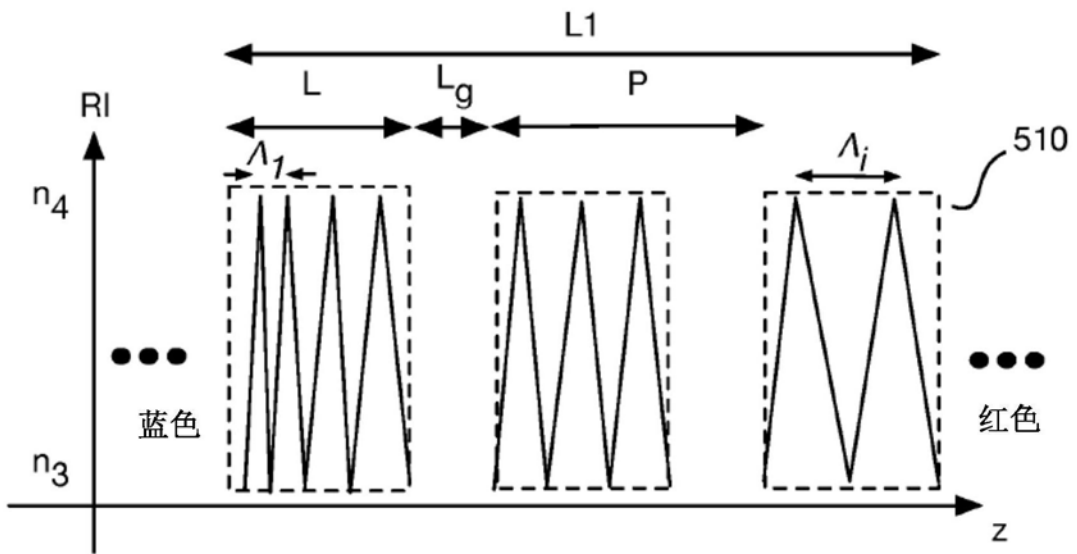


图5D

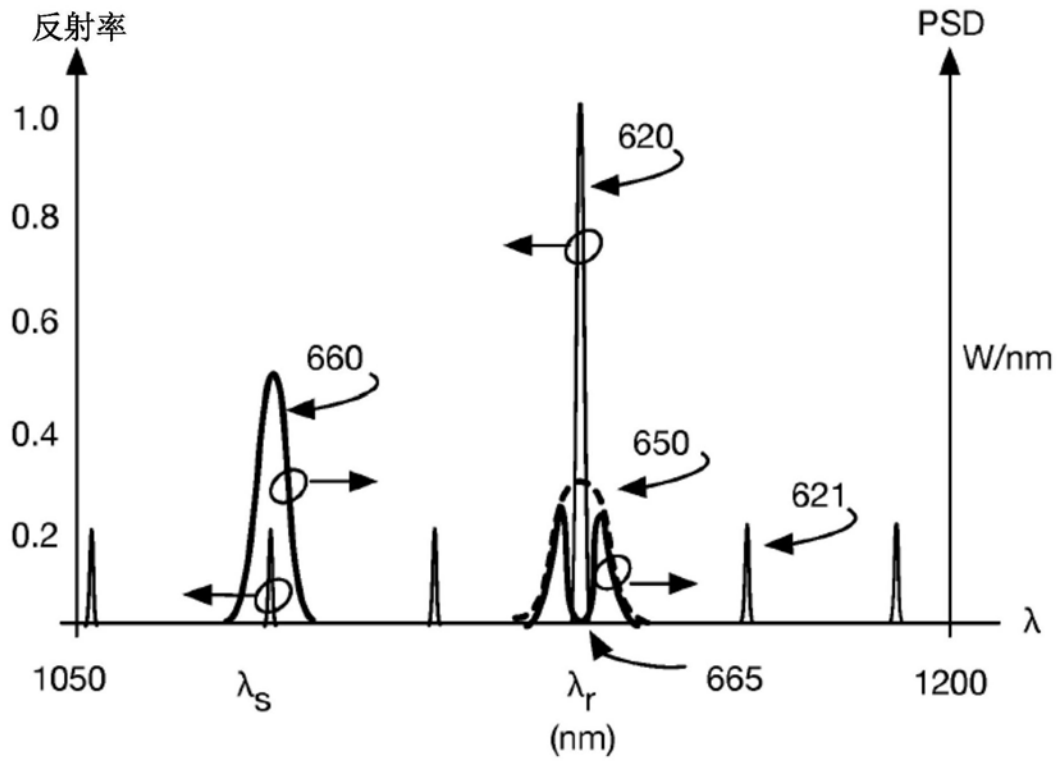


图6

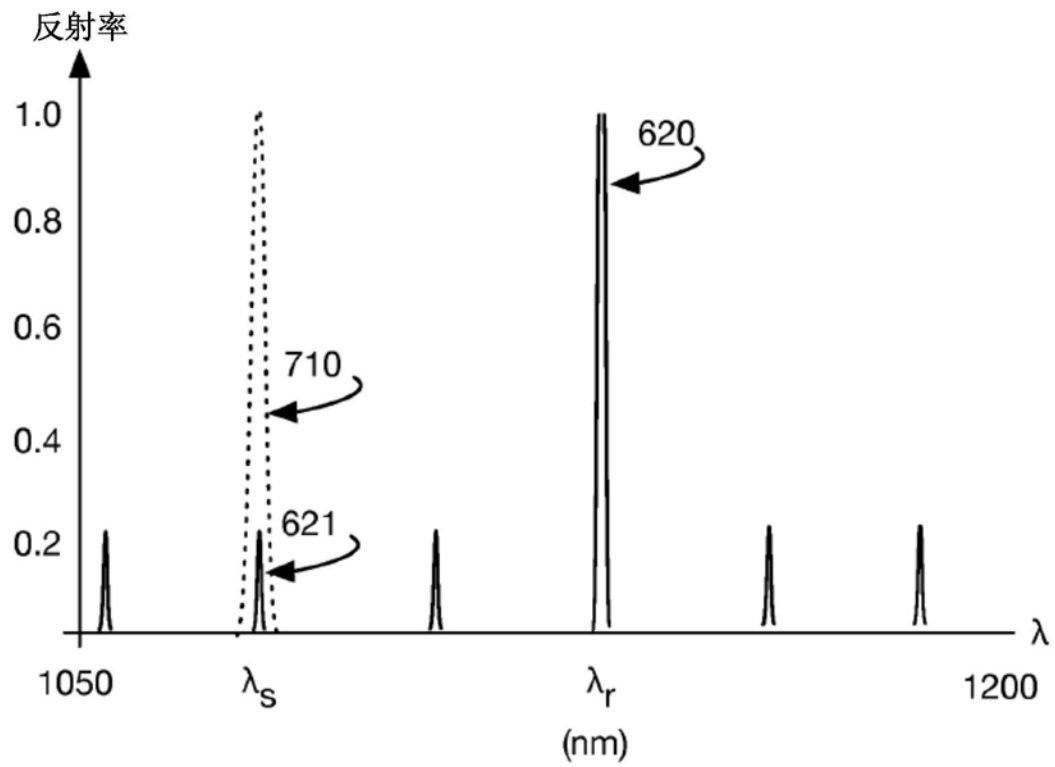


图7

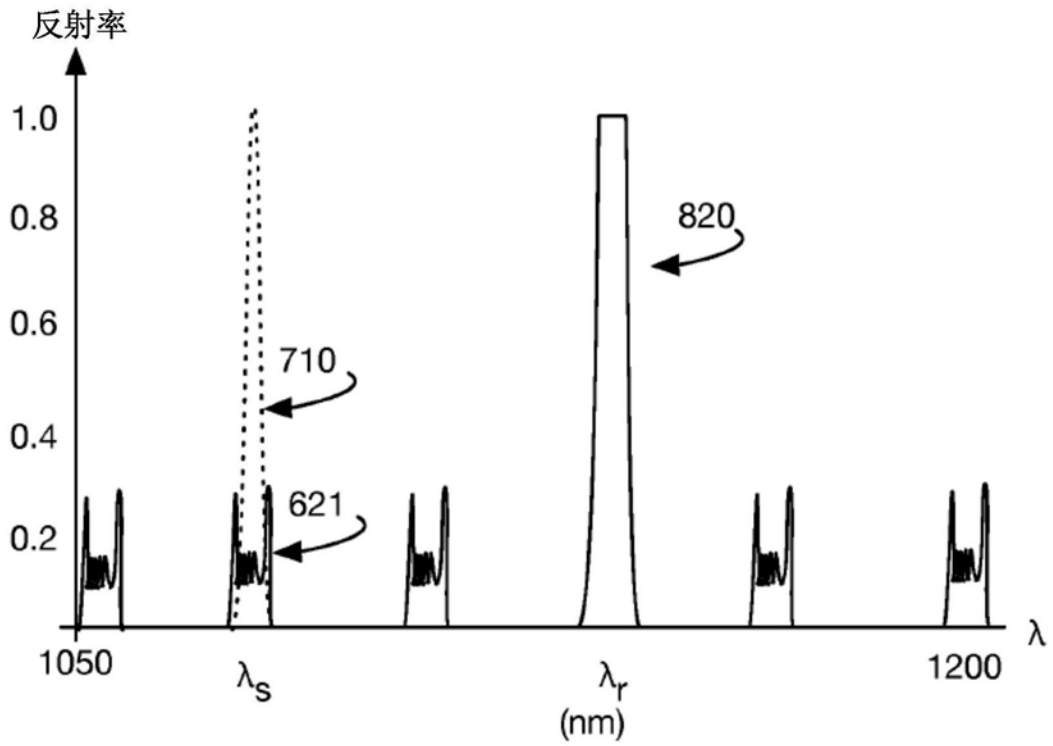


图8

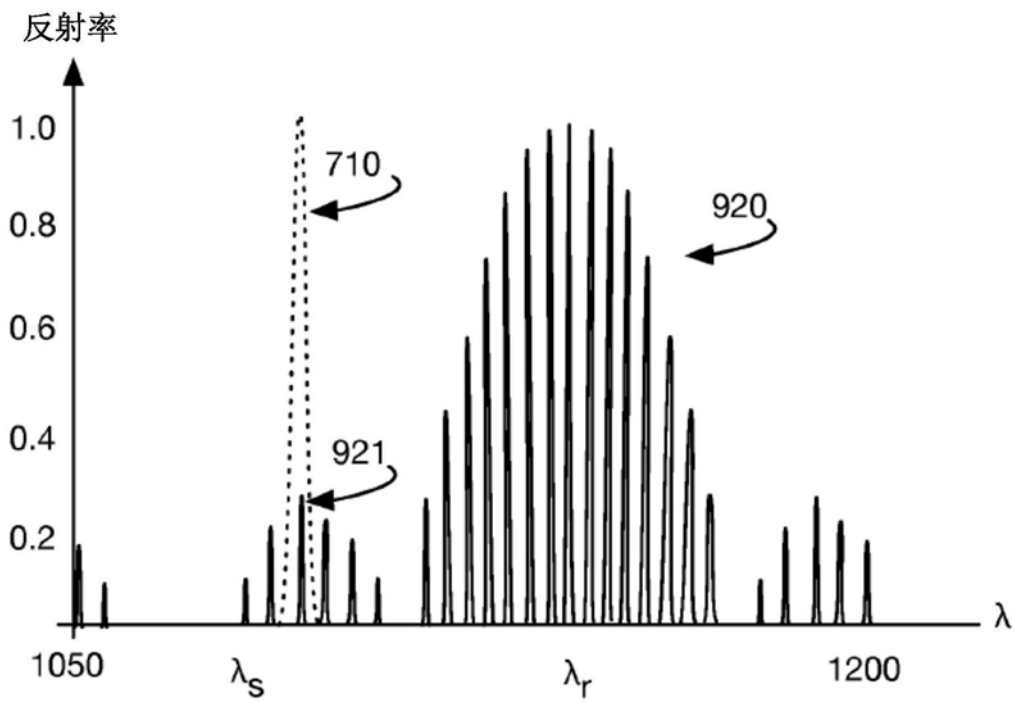


图9

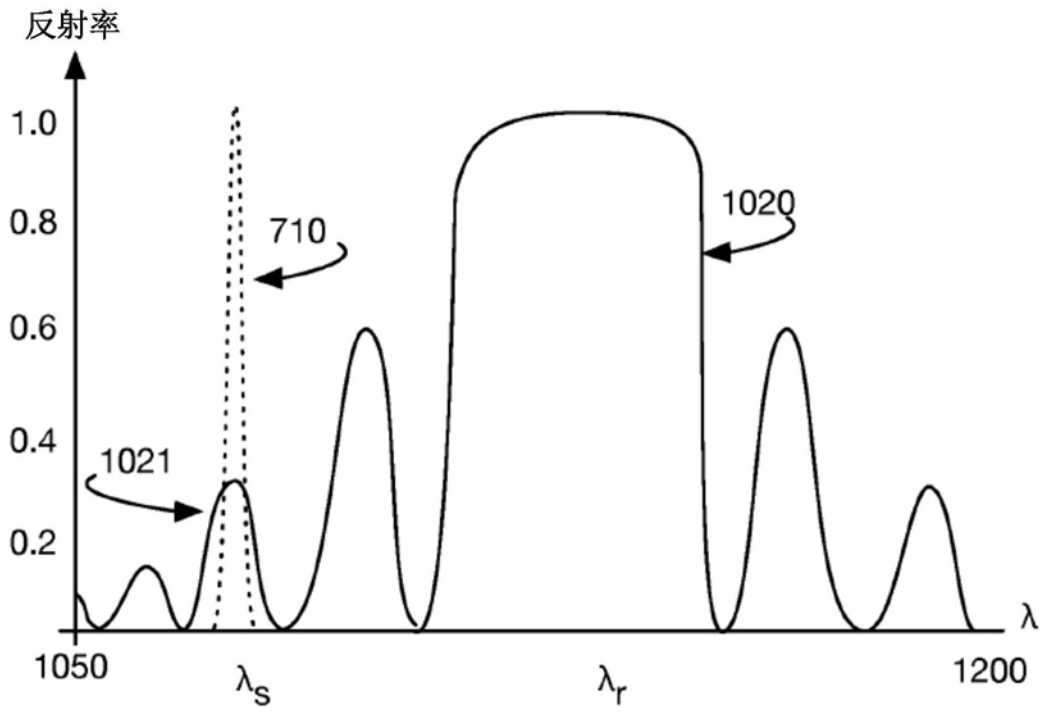


图10

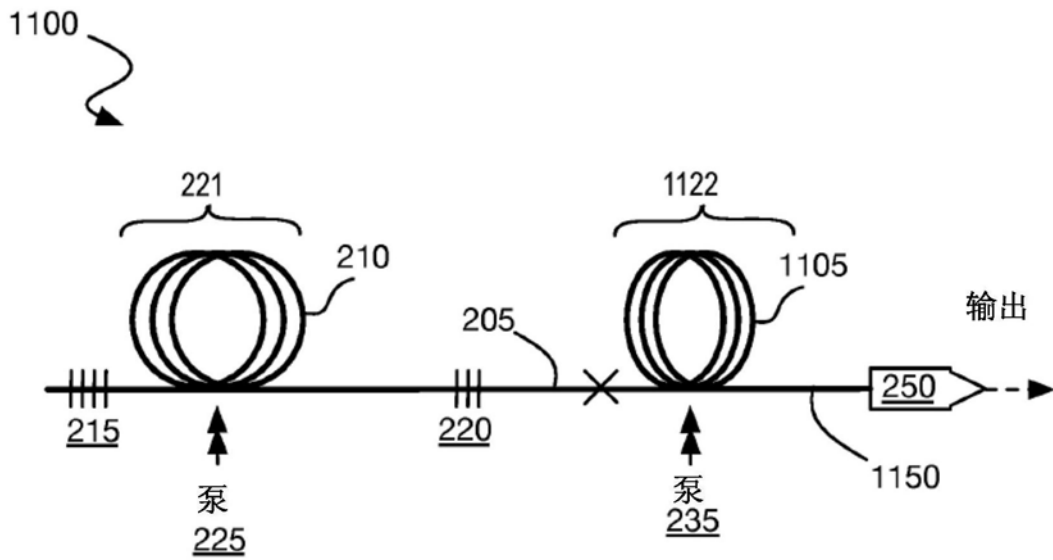


图11