



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102576125 A

(43) 申请公布日 2012.07.11

(21) 申请号 201080033542.9

代理人 吴小明

(22) 申请日 2010.07.29

(51) Int. Cl.

(30) 优先权数据

G02B 6/124 (2006.01)

61/229,346 2009.07.29 US

G02B 5/18 (2006.01)

(85) PCT申请进入国家阶段日

2012.01.29

(86) PCT申请的申请数据

PCT/CA2010/001190 2010.07.29

(87) PCT申请的公布数据

WO2011/011890 EN 2011.02.03

(71) 申请人 拉瓦勒大学

地址 加拿大魁北克

(72) 发明人 雷亚尔·瓦利 马丁·贝尼耶

(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任

公司 11021

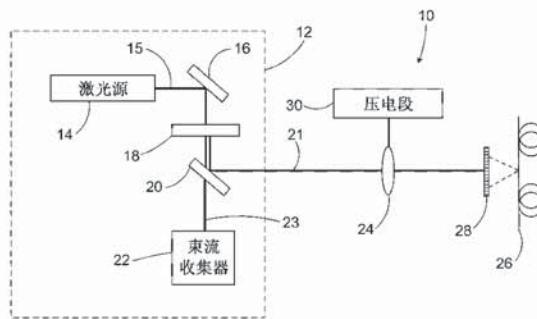
权利要求书 1 页 说明书 8 页 附图 3 页

(54) 发明名称

使用短波长超快脉冲写入耐大功率的布拉格光栅的方法

(57) 摘要

本发明提供一种用于在稀土掺杂玻璃光学波导中写入布拉格光栅的方法。产生优选在飞秒范围内并具有在300nm至700nm范围内的写入波长和足以通过致密化引起稀土掺杂玻璃波导中折射率变化的强度的超快光脉冲。使用相位掩膜衍射该光脉冲，以产生干涉图样，所述干涉图样具有提供对应于所述光栅目标反射波长的基频布拉格共振的节距。使该干涉图样投射至稀土掺杂玻璃波导的一个区域，将所述区域加热到高于约350°C阈值的温度持续预定的加热期间。有利地，该加热步骤可以消除否则将会存在于波导的波导性质中的光子暗化效应。



1. 一种用于在稀土掺杂玻璃光学波导中写入布拉格光栅的方法,所述布拉格光栅反射目标波长的光,所述方法包括:

a) 产生超快光脉冲,所述超快光脉冲具有在300nm至700nm范围内的写入波长和足以通过材料致密化引起所述稀土掺杂玻璃波导中折射率变化的强度;

b) 使用相位掩膜衍射所述光脉冲以产生干涉图样,所述干涉图样具有提供对应于所述目标波长的基频布拉格共振的节距;

c) 使所述干涉图样投射到所述稀土掺杂玻璃波导的一个区域以在其中写入所述干涉图样,从而给出所述布拉格光栅;以及

d) 将所述波导含有所述布拉格光栅的所述区域加热到高于约350°C阈值的温度,持续足以基本上消除所述光导的光子暗化效应的预定加热期间。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中在步骤a)中产生的所述超快光脉冲具有至多2皮秒的脉冲持续时间。

3. 根据权利要求1所述的方法,其中步骤a)中的超快光脉冲的产生包括:

- 使用具有种子波长的种子激光器产生超快种子光脉冲;

- 使用二次谐波发生器将所述种子波长转化成所述写入波长。

4. 根据权利要求3所述的方法,其中所述种子激光器是Ti-蓝宝石激光器并且所述种子波长为约800nm。

5. 根据权利要求4所述的方法,其中所述相位掩膜的所述节距为约738nm。

6. 根据权利要求1所述的方法,其中步骤c)中的投射包括使用设置在所述相位掩膜前面的柱面透镜将所述超快光脉冲聚焦在所述光学波导的所述区域上。

7. 根据权利要求1所述的方法,所述方法包括细调所述布拉格光栅的所述目标波长的步骤,所述细调包括调节所述相位掩膜与所述光学波导之间的距离。

8. 根据权利要求1所述的方法,其中步骤d)中的加热包括将所述稀土掺杂光学波导放入炉中。

9. 根据权利要求8所述的方法,其中所述步骤d)中的加热包括使所述炉的温度从初始值匀变至高于所述阈值的最终值。

10. 根据权利要求1所述的方法,其中所述波导是具有芯和至少一个包层的光纤。

11. 根据权利要求10所述的方法,其中步骤c)中的投射是穿过所述至少一个包层进行的。

12. 根据权利要求10所述的方法,所述方法包括将所述包层从所述波导的一部分除去的预备步骤,步骤c)中的投射是在所述部分上进行的。

使用短波长超快脉冲写入耐大功率的布拉格光栅的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及布拉格光栅制造领域，并且更具体地涉及使用短波长超快脉冲在用于大功率应用的稀土掺杂玻璃波导中写入布拉格光栅的方法。

背景技术

[0002] 大功率应用，如大功率光纤激光器，需要能耐受光纤中循环的光的高强度的强布拉格光栅。使用 UV- 诱导缺陷共振的物理方法（该方法一般用于石英光纤中光纤布拉格光栅 (FBG) 的写入）获得的光栅受限于光敏光纤，并且通常不能刻在用作激光增益介质的稀土掺杂光纤中。这进而意味着光纤激光器腔将需要激活光纤与光敏光纤之间的熔合接头。这些接头可能导致额外的腔内损耗，并且不适合于某些激活光纤几何形状，尤其是当需要大功率运行时。因此，需要开发制造 FBG 的新方法以将光栅直接刻入激活光纤中。

[0003] 由聚焦的飞秒脉冲与玻璃的非线性相互作用导致的折射率变化似乎是上述 UV- 诱导缺陷共振的物理方法的非常有希望的备选方案。如在 M. Bernier, D. Faucher, R. Vallée, A. Saliminia, G. Androz, Y. Sheng 和 S. L. Chin, “通过 800nm 的飞秒脉冲在 ZBLAN 光纤中光诱导的布拉格光栅 (Bragg gratings photoinduced in ZBLAN fibers by femtosecond pulses at 800nm)”, Opt. Lett. 32, 454–456 (2007) 中所示，操作在 $1.5 \mu\text{m}$ 下的红外飞秒 (fs) 脉冲与一阶相位掩膜可用于在掺杂的和未掺杂的氟化物光纤中写入有效的 FBG。备选地，用使用 IR 飞秒脉冲的扫描相位掩膜技术写入的 FBG 也被证明对于掺杂有以下激活离子的石英光纤激光器的开发是至关紧要的：掺杂有铒激活离子（参见 E. Wikszak, J. Thomas, J. Burghoff, B. Ortac, J. Limpert, S. Nolte, U. Fuchs 和 A. Tünnermann, “基于内芯飞秒写入布拉格光栅的铒光纤激光器 (Erbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg grating)”, Opt. Lett. 31, 2390–2392 (2006)），或者掺杂有镱激活离子（参见 E. Wikszak, J. Thomas, S. Klingebiel, B. Ortac, J. Limpert, S. Nolte, U. Fuchs 和 A. Tünnermann, “基于内芯飞秒写入布拉格光栅的线偏振铒光纤 激 光 器 (Linearly polarized ytterbium fiber laser based on intracore femtosecond-written fiber Bragg gratings)”, Opt. Lett. 32, 2756–2758 (2007)）。在后一种情况下，由 27% 的激光器斜率效率的镱掺杂熊猫（黑白相间）型光纤获得 1040nm 下的 100mW 最大输出功率。该实验中涉及的二阶 FBG 对于每个偏振分别具有 65% 和 45% 的峰值反射率。

[0004] MIHAILOV 等（美国专利 6,993,221 和 7,031,571）讨论了在非光敏性光纤中布拉格光栅使用超短脉冲通过相位掩膜的写入。他们证明，与现有技术的论断相反，可以使用强度高到足以在光纤中产生折射率变化但仍低于相位掩膜的损伤阈值的飞秒脉冲写入光栅。所公开的技术声称缓解了对于将光纤光敏化的需要和对于通过退火等的光栅后处理的需要。MIHAILOV 等还倾向于选择具有为了在感兴趣的波长引起高阶布拉格共振而选择的节距的相位掩膜，以限制由低阶相位掩膜引起的长波长写入束的角色散。然而，对于大功率应用，高阶光栅在感兴趣波长的强度可能并不总是足够的。

[0005] 仍需要特别适用于大功率光纤激光器或类似应用,同时减轻现有技术中的至少一些缺点的写入布拉格光栅的方法。

发明内容

[0006] 根据本发明的一个方面,提供一种在稀土掺杂玻璃光学波导中写入布拉格光栅的方法,所述布拉格光栅反射目标波长下的光。

[0007] 该方法包括产生超快光脉冲。这些超快光脉冲具有在300nm至700nm范围内的写入波长和足以通过材料致密化引起所述稀土掺杂玻璃波导中折射率变化的强度。

[0008] 该方法还包括使用相位掩膜衍射所述光脉冲以产生干涉图样,所述干涉图样具有提供对应于所述目标波长的基频布拉格共振的节距。将所述干涉图样投射到所述稀土掺杂玻璃波导的一个区域以在其中写入所述干涉图样,从而给出所述布拉格光栅。

[0009] 该方法还包括将所述波导含有所述布拉格光栅的所述区域加热到高于约350°C阈值的温度,持续足以基本上消除所述光导的光子暗化效应的预定加热期间。

[0010] 超快光脉冲优选具有飞秒范围内的脉冲持续时间。在本发明的一个实施方案中,光脉冲的波长约400nm,例如通过Ti-蓝宝石飞秒激光器的二次谐波所获得的。

[0011] 有利地,上述加热步骤可以消除光子暗化效应,否则所述光子暗化效应将会存在并因此改变所述波导的波导性质。

[0012] 在参考附图阅读本发明的优选实施方案之后,本发明的其他特征和优点将会得到更好的理解。

附图说明

[0013] 图1是实施根据本发明的一个实施方案的用于写入布拉格光栅的方法的系统的示意图。

[0014] 图2是对在超过15mm的镱掺杂光纤中在0.9mJ、1kHz下历时20s写入的FBG测得的透射和反射光谱图。

[0015] 图3是在至高500°C下的热退火之前和之后,对在超过15mm的镱掺杂光纤中在0.9mJ、1kHz下历时40s写入的FBG测得的透射光谱图。

[0016] 图4是显示图3介绍的FBG的折射率调制和通过量损失作为退火温度的函数演化的图。相应的折射率调制是绝热条件下求出的,即在相应温度下退火30分钟后求出的。

[0017] 图5是在400°C下热退火90s之前和之后,对在超过15mm的镱掺杂光纤中在0.9mJ、1kHz下历时100s写入的FBG测得的透射光谱图。

[0018] 图6是在400°C下热退火90s之前和之后,对在超过15mm的镱掺杂光纤中在0.9mJ、1kHz下历时100s写入的FBG测得的宽带透射光谱图。

具体实施方式

[0019] 本发明总体上涉及一种在光学波导中写入布拉格光栅的方法。表述“光学波导”应理解为是指光可以在其中行进并被引导的任何结构。波导优选体现为光纤,但是可以使用任何合适的光导结构例如平面或通道波导。光学波导由玻璃如石英制成并且掺杂有至少一种稀土元素。在优选的实施方案中,波导是镱掺杂的,但是也可以考虑其他掺杂剂,例如

铒, 钕, 铥, 镱, 镧等或它们的组合。同样是本发明有利特征的是, 波导不需要由光敏材料制成或者在其中写入布拉格光栅之前将其光敏化。因而, 用锗共掺杂波导(如现有技术中已知用以提高光敏性的)是不需要的。然而, 波导可以包含其他共掺杂剂如铝, 磷等。如本领域技术人员容易理解的, 稀土掺杂玻璃波导对于大功率应用例如大功率光纤激光器特别有用。有利地, 由于该根据本发明实施方案的方法可以用于在与用作光纤激光器增益介质的光纤相同类型的光纤中写入布拉格光栅, 整个激光器腔可以采用单一的长光纤, 避免了对光纤连接器的需要以及相关的损耗。这种能力在用于以高平均和 / 或峰值功率下的激光发射时是特别引人注意的, 例如在超短脉冲光纤激光器中, 因为光纤制备 / 连接器化(connectorization)步骤通常是有问题的, 其中在激光器腔中产生的极高强度可能导致灾难性光纤损坏。这种无接头光纤激光器腔的另一应用领域关于分布反馈(DFB)激光器, 其中对低腔内损耗和强光栅的需求可以受益于激活光纤中的直接FBG刻入。

[0020] 在本发明的整个说明书中, 表述“布拉格光栅”应理解为是指永久地设置在波导中的任何周期性的或非周期性的折射率图样。本领域技术人员将理解, 布拉格光栅可以是单或多通道, 并且可以是线性调频的, 倾斜的, 抽样的, 或者包含多于一种这样的特性。布拉格光栅反射目标波长下的光, 即, 在其预定应用中布拉格光栅将被用于过滤一个或多个波长。例如, 在光纤激光器的范围内, 使用本发明包含的方法制造的布拉格光栅可以用作激光器腔的反射器, 并且于是目标波长将对应于激光器腔中建立的激光束的波长。本领域技术人员将容易理解, 即使以单数形式使用, 表述“目标波长”也可以指由布拉格光栅反射的较复杂光谱轮廓。

[0021] 根据本发明实施方案的方法基于短波长超快激光脉冲和合适的相位掩膜的使用, 所述相位掩膜衍射所述光脉冲以产生干涉图样, 其具有在目标波长提供基频布拉格共振的节距。

[0022] 该方法首先包括产生超快光脉冲。“超快”应理解为, 光脉冲具有飞秒范围内的持续时间, 优选小于 2 皮秒, 并且更优选在 10 至 1000 飞秒之间。可以将这些光脉冲的重复率设置在 10Hz 至 10000Hz 之间。如本领域技术人员将容易理解的, 在低重复频率下, 写入过程需要更长的曝光时间以达到目标反射率, 这可能导致机械不稳定性并因此限制光栅生长。高重复率(即 10kHz)的使用能够缩短曝光时间以达到相同的目标反射率, 但是也可能导致将限制光栅生长的有害的局部加热效应。因此优选将光脉冲的重复率优选设置为上述范围内的合适的值, 以避免两种极端的有害效果。光脉冲的写入波长, 即, 当到达波导时它们的波长, 在 300nm 至 700nm 范围内。本领域技术人员将理解, 与用于在玻璃中写入布拉格光栅的超快脉冲的通常约 800nm 的普通波长相比, 在该范围内的波长被认为是“短的”。

[0023] 短波长的超短脉冲在透射通过石英基光学元件如透镜和相位掩膜时被暂时强烈散射。于是低于约 300nm 的波长的使用需要使用反射性光学元件以产生具有足以引起波导所需折射率改变的强度的干涉图样, 这使得束的校直比使用典型的透射性元件时复杂得多。因此本发明的一个有利方面在于选择大于 300nm 的写入波长, 原因在于透射性光学元件的使用允许将脉冲持续时间保持在飞秒量级, 并刻入玻璃致密化折射率变化。如本领域技术人员将注意到的, 典型的光学涂布聚合物在低于 300nm 的波长具有强吸收, 但是在上述规定范围内的波长处基本上是透明的, 因此本发明的实施方案允许透过聚合物外壳写入布拉格光栅。

[0024] 多种类型的结构变化可能导致电介质材料中的永久折射率变化。第一种类型涉及色心或缺陷，并且可以被UV共振或者被超短非共振辐射诱导。这种类型的变化通常需要利用光敏化玻璃的光敏性并且相对不稳定。其在石英玻璃中在超过350°C的温度被消除。第二种类型的变化与材料内的光学损伤（例如裂缝和空隙）有关，并且因此要热稳定得多，尽管其伴随有明显传输损耗。在石英玻璃中，这种类型的光致折射率变化（其可以通过密聚焦的超短脉冲产生）超过1000°C仍是稳定的，但是伴随有明显的传播损耗。第三种类型的光致变化与玻璃致密化有关。其通常用超短脉冲在聚焦条件下产生，所述聚焦条件导致比导致光学损伤的那些聚焦条件小的强度。这种类型的变化在石英玻璃中在高达900°C是持久的并且伴随有非常低的损耗。本发明包括后一种类型的折射率变化的使用，即玻璃致密化。由于超短脉冲可能导致三种前述类型的变化，对刻入条件必须加以特别注意，以促成这种类型的变化。

[0025] 超快光脉冲可以由任何合适的激光源或元件组产生。例如，如将在下面进一步解释的，超快光脉冲可以由发射约800nm的Ti-蓝宝石激光器产生并且由二次谐波发生器将频率转化至400nm，从而落入上面定义的波长范围内。备选地，发射约1030nm的高能超短脉冲的超短光纤激光器腔也可以由二次或三次谐波发生器分别将频率转化至约515nm和345nm，并且从而用于写入光栅。

[0026] 该方法接着包括使用相位掩膜衍射光脉冲以产生干涉图样，所述干涉图样具有提供对应于目标波长的基频布拉格共振的节距。相位掩膜优选由石英制成并且可以根据本领域中公知的任何合适技术制造。相位掩膜的节距根据目标波长而选择，并且顾及以下考虑。

[0027] 为了在有效折射率 n_{eff} 的波导中在设计波长 λ_B 下获得布拉格光栅共振，波导中有有效折射率的节距 Λ 的周期性调制必须遵循以下给出的相位匹配条件：

$$[0028] \frac{2 \cdot n \cdot \pi}{\Lambda} = 2 \cdot \frac{2\pi \cdot n_{eff}}{\lambda_B} \quad (1)$$

[0029] 通过简化，得到：

$$[0030] \lambda_B = 2 \cdot n_{eff} \cdot \frac{\Lambda}{n} \quad (2)$$

[0031] 其中 $n = 1, 2, 3, \dots$

[0032] 设计波长 λ_B 对应于 $n = 1$ 的基频布拉格共振。通过使光栅的基频布拉格共振与目标波长匹配，获得最佳衍射效率，即，光栅耦合系数，（并且因此其反射率）对于给定的折射率调制是最大的。

[0033] 基频布拉格共振的使用对于大功率光纤激光器应用是特别重要的。对于高阶布拉格光栅（即 $n > 1$ ），诱导的周期性折射率结构必须是非谐的以对于给定折射率调制获得显著的耦合系数，即，折射率调制不能是纯正弦的，当非线性相互作用导致折射率变化例如使用超短红外脉冲在纯石英光纤中写入FBG时通常是这样的情况，如Smelser等，光学通讯(Optics Letters)32, p. 1453, 2007中所教导的。使用傅里叶级数表示周期性折射率结构提供高阶布拉格共振的耦合系数。由于材料响应影响诱导折射率结构及其局部化，高阶布拉格光栅的耦合系数对于给定材料组成可能是差的，并且因为最大折射率调制受到限制而将达不到目标耦合系数，或者在伴随有额外损耗的明显更长的曝光时间后可以达到，这是

不希望的,尤其是对于大功率激光器应用。

[0034] 例如,考虑其中需要 1070nm 目标波长的情况,该目标波长对应于镱掺杂大功率光纤激光器的典型发射波长值。为了使具有 1.452(在 1070nm 下) 的典型有效折射率的石英光纤中的基频布拉格共振与该波长匹配,布拉格光栅的节距必须为:

$$[0035] \quad \Lambda_{n=1} = \frac{n \cdot \lambda_B}{2 \cdot n_{eff}} = \frac{1 \cdot 1070 \text{ nm}}{2 \cdot 1.452} = 368 \text{ nm} \quad (3)$$

[0036] 标准相位掩膜通常设计成使 ± 1 级干涉中的衍射能最大。根据干涉图样,来自这些 ± 1 级衍射光的干涉具有对应于相位掩膜本身节距的一半的节距,该相位掩膜的节距因此与写入光即超快光脉冲的波长无关。由等式 (2) 可以得出,基频布拉格共振的波长和相位掩膜的节距 Λ_{PM} 之间的关系如下给出:

$$[0037] \quad \lambda_B = n_{eff} \cdot \Lambda_{PM} \quad (4)$$

[0038] 继续上述的例子,为了在石英光纤中获得在 1070nm 的基频布拉格共振,相位掩膜的节距必须为:

$$[0039] \quad \Lambda_{PM} = \frac{\lambda_B}{n_{eff}} = \frac{1070 \text{ nm}}{1.452} = 737 \text{ nm} \quad (5)$$

[0040] 尽管相位掩膜的节距与光脉冲的波长无关,相位掩膜对投射光在 ± 1 级的衍射应当遵循物理准则以成为有效的。理论上,相位掩膜衍射具有给定波长 λ_1 的光,在 ± 1 级上的所述给定波长 λ_1 遵循下面给出的光栅等式:

$$[0041] \quad \sin \theta \pm 1 = \frac{\pm 1 \cdot \lambda_l}{\Lambda_{PM}} \quad (6)$$

[0042] 其中 θ 是关于垂直于掩膜界面的轴的衍射角。由等式 (6) 得出,在 ± 1 级的衍射当且仅当项 $\sin \theta \pm 1$ 小于或等于 1 时将是允许的,并且这暗示着相位掩膜的节距等于或大于所衍射的(即写入的)波长 λ_1 。其如上所讨论的,依赖于 737nm 的相位掩膜周期的使用,这个起码的事实完全使 800nm Ti: 蓝宝石激光器丧失用于写入在 1070nm 反射的布拉格光栅的资格。此外,如果相位掩膜的节距太接近衍射的波长 λ_1 ,入射光的显著部分将以零级被衍射,从而减小了 ± 1 级的衍射效率。优选地,为了获得足以有效地写入布拉格光栅的 ± 1 级的衍射效率,相位掩膜节距应当是光脉冲波长的至少 1.2 倍,该值是通过严格耦合波分析技术计算的以保持 ± 1 级中的衍射能的至少 75%。将该条件应用到上述的例子中,用于在石英光纤中写入在 1070nm 下基频布拉格共振的光栅的超快光脉冲的波长范围由下式给出:

$$[0043] \quad \lambda_l \leq \frac{\Lambda_{PM}}{1.2} = \frac{737}{1.2} = 615 \text{ nm} \quad (7)$$

[0044] 本领域技术人员将容易理解,在该实例中,所需的石英波导中在 1070nm 下的基频布拉格共振不能使用来自 Ti: 蓝宝石激光器的约 800nm 的通常波长获得。然而,来自这种激光器的光可以被频率转化以获得 400nm 下的 Ti: 蓝宝石激光器的二次谐波,其遵循上述条件并且因此可以用于在石英光纤中在 1070nm 目标波长下写入基频 FBG,并且更一般地,获得用于在 950–1150nm 波段运行的镱光纤激光器的强反射性 FBG。

[0045] 一旦由相位掩膜通过超快光脉冲的衍射获得合适的衍射图样，将其投射到稀土掺杂玻璃波导的某一区域。优选地，在光纤作为波导的情况下，将激光脉冲聚焦在光纤芯周围的区域，以部分或完全覆盖要被反射的传播模式。所得到的强光强度以永久方式改变玻璃的折射率，从而提供所需的布拉格光栅。

[0046] 如上面所解释的，基频布拉格共振由相位掩膜的节距 Λ_{PM} 和光学波导芯的有效折射率 n_{eff} 决定。然而，其他因素可以对由布拉格光栅所反射的目标波长的最终值有轻微的影响。任选地，根据本发明实施方案的方法可以利用这样的因素以提供目标波长的细调步骤。当使投射的写入光束在其非聚焦轴上略微发散时，可以通过调节相位掩膜与光学波导之间的距离以进行这种细调。例如，已经观察到，如果将写入光束设定为以约 0.02 弧的角度略微发散，可以通过简单改变光纤至相位掩膜的间隔，将上述实验中的布拉格波长由 1065nm 改变至 1080nm。这样的简单控制可以是非常有利的，因为通常认为改变布拉格波长需要制造不同的相位掩膜，这可能是昂贵的操作。

[0047] 发明人已经注意到，稀土掺杂波导以上述方式的折射率改变引起该波导的波导性质的强损耗，很可能是通过光子暗化。为了急剧减少或消除这些损耗，根据本发明的方法包括将波导的含有布拉格光栅的区域加热到超过约 350°C 阈值的温度的步骤。已经发现，将这样的加热步骤进行合适的加热期间，例如几分钟，可以基本上减少，在某些情况下完全消除光子暗化损耗同时保持给出布拉格光栅的大折射率调制。加热期间的长度依赖于所选择的超过所述阈值的加热温度，以及所需的光子暗化的减少。本领域技术人员将容易理解，如果光子暗化效应被减小到足够低以允许在目标应用中使用该光纤的程度，则认为光子暗化效应被基本上消除了。对于给定的光子暗化的减小程度，已经发现，加热步骤过程中的温度越高，所需的加热期间越短。例如，已经发现将光纤加热到约 400°C 90 秒足以消除光子暗化效应，使得该光栅可以用于大功率激光器应用。对于给定实施方案的所需加热期间可以通过实验预先确定，或者，在某些实施方案中，可以在退火过程中监测光纤在已知遭受光子暗化影响的波长下的传输性以检测损耗的变化。

[0048] 可以通过任何合适的方式加热波导的该区域。在一个实施方案中，可以将波导放入炉中，所述炉的温度匀变升至所需值。在另一实施方案中，使用聚焦 CO₂ 激光器、加热灯丝或小的氢焰局部地加热波导，以将加热区限制于光栅，同时保持在光栅的周围区域的原始光纤聚合物涂层。这样的实施方案对于在加热之前或写入布拉格光栅之前已经除去聚合物夹套的光纤是特别合适的。例如，可以将 CO₂ 激光器以足以引起波导的充分局部加热以退火光致损耗的强度聚焦在波导的光栅区域上。如以下实例的图 6 中所示，通过光纤芯宽带传输的测量，可通过在 600–800nm 区域损耗的显著下降观察到加热对光致损耗的作用。备选地，由于可以透过对暴露光线至少部分透明的聚合物夹套写入布拉格光栅，光纤芯可以通过足够强度的在 300–800nm 波长范围内的光束在其中的传播而加热，这可以有利地进行而无需除去光纤聚合物夹套。

[0049] 本领域技术人员将容易理解，可以根据本发明的实施方案使用多种实验装置或系统写入布拉格光栅。参考图 1，其显示了可以用于进行上述方法的第一步的系统 10 的一个实例。系统 10 包括光发生模块 12，此处表现为飞秒激光源 14 和相关的光学元件。在一个实例中，飞秒激光源 14 可以是发射约 800nm 的种子光脉冲 15 并且在此波长具有 3.6mJ 的峰值能量的 Ti- 蓝宝石激光器。在所述实施方案中，来自激光源 14 的种子光脉冲 15 被

在 800nm 发射波长附近具有高反射率的镜 16 反射, 接着是二次谐波发生器 18, 其将脉冲的光能的一部分转化为约 400nm 下, 被转化的光的能量为约 1.0mJ。分色镜 20 或其他波长选择元件从余下的 800nm 辐射 23 将 400nm 辐射分离, 从而给出将用于光栅写入步骤的光脉冲 21, 所述其余 800nm 辐射 23 终止于束流收集器 22。离开光发生模块 12 的转化了的光脉冲 21 由柱面透镜 24 经由相位掩膜 28 聚焦到波导 (此处表示为光纤 26) 上。优选将柱面透镜 24 安装在压电段 30 上以扫描光脉冲 21。

[0050] 实施例

[0051] 在本发明实施方案的一个实施例中, 使用与图 1 所示类似的系统在光纤中写入布拉格光栅。该实验中使用的波导是双包层镱掺杂石英光纤。双包层光纤的泵芯 (pump core) 具有 $128 \mu\text{m}$ 的直径, 八角几何形状, 而单个芯具有 $6 \mu\text{m}$ 直径, 并且单独共掺杂有 2 摩尔% 的 Al_2O_3 , 因此没有光敏元素如锗被添加到光纤玻璃组成中。

[0052] 使用 Ti- 蓝宝石再生放大器系统 (Coherent Legend-HE, 商标) 作为泵源, 该 Ti- 蓝宝石再生放大器系统产生 $3.5\text{mJ}/\text{脉冲}$ 的飞秒激光脉冲, 重复率为 1kHz , 中心波长为 $\lambda = 806\text{nm}$ 。傅里叶变换有限脉冲的持续时间测量为约 35fs 。使用 BBO 晶体 (Eksma Optics, BBO-1502, 商标) 产生 403nm 的最大 1.0mJ 的二次谐波。使用分色镜将 403nm 光束与剩余 806nm 泵浦分离。 403nm 激光束 (调整大小至 $1/e^2$ 处 $\sim 8.5\text{mm} \times 15\text{mm}$) 之后被柱面透镜聚焦并经由石英相位掩膜射至与光纤芯平行的聚焦线。基于高斯光束光学, 焦线的宽度估算为 $1.27f\lambda/D \sim 7 \mu\text{m}$, 其中 $f = 112\text{mm}$ 是焦距并且 D 是聚焦透镜处的光束大小。为了确保在光纤芯上的均匀折射率调制, 使用设置在横向上的压电体使聚焦透镜振荡, 使得焦线在光纤芯周围 $20 \mu\text{m}$ 面积的光纤上以 0.05Hz 的频率扫描。将光纤至相位掩膜间隔设置在 3mm 以防止对后的任何损害。

[0053] 实验中使用的相位掩膜在 40mm 的长度上具有 738nm 的均匀节距, 从而在约 1070nm 提供基频布拉格共振。相位掩膜是通过全息光刻法在 UV 级石英玻璃基板上以 475nm 的蚀刻深度和 40% 的占空比制造的。根据衍射理论, 在包括 400nm 波长和 738nm 相位掩膜节距的写入条件下, 仅产生三个衍射级 ($0, \pm 1$), 其中 3.4% 的能量在零级, 其余的 96% 在 ± 1 级, 从而有效地贡献于干涉图样。使用超连续源 (Koheras SuperK Power, 商标), 光纤连接器和光谱分析仪 (ANDO AQ6317B, 商标) 测量 FBG 的透射和反射光谱。使用光纤炉 (ASP500C, 商标) 在至多 500°C 下进行热退火。

[0054] 将 15mm 长度的双包层镱掺杂光纤首先暴露于聚焦的飞秒脉冲束 20s 。所得到的 FBG 的反射和透射光谱显示在图 2 中。

[0055] 在 1072.7nm 处以 0.30nm 的半峰全宽 (FWHM) 获得 -30dB 的透射倾斜 (对应于 99.9% 的反射率)。使用在 1075nm 处的截止测量的通过量 (或戈瑞) 损失为 0.6dB 。为了估计 FBG 参数值, 进行使用 IFO 光栅 4.0TM 的数值模拟以拟合图 2 中呈现的实验光谱曲线。对应的光栅参数如下: 光栅长度 = 6.9mm , 高斯切趾 (锥形大小 = 0.5), 折射率调制 = 9.4×10^{-4} 。

[0056] 为了进一步增大 FBG 反射率, 将另一片相同光纤暴露于聚焦飞秒脉冲束, 实验条件相同但是暴露时间为两倍, 因此 40s 。所得到的 FBG 的透射光谱显示在图 3 中。在这种情况下, 获得的透射倾斜 $< -40\text{dB}$, 半峰全宽 (FWHM) 为 0.65nm 。应注意到, 测量值限于 -40dB , 归因于表征装置的有限动态范围。测得的通过量损失为 1.2dB , 并且相应的折射率调制推算

为 2.1×10^{-3} 。之后将该 FBG 在炉中热退火，其中温度逐步地从 50°C 每 30 分钟升高 50°C 到达 500°C。所得到的透射光谱与热退火前的透射曲线一起显示在图 3 中。观察到透射峰的 0.2nm 光谱位移以及峰的变窄 (FWHM 为 0.41nm)，并且峰值反射率下降到 $R \sim -35\text{dB}$ 。

[0057] 从完全热退火处理得到的感兴趣的特征在于，在 1.45×10^{-3} 的相应折射率调制下，通过量损失可以被减小到小于 0.05dB。在热退火过程中，作为温度的函数仔细监测 FBG 中折射率变化和相应光致光纤背景损耗。因此，对于在恒定温度下的每 30 分钟退火处理，测量 FBG 透射光谱，由此可以推算折射率调制。折射率调制作为退火温度函数的演化与在 1075nm 下计算的光纤通过量损失一起显示在图 4 中。首先注意到，直至 350°C 的温度之前的折射率调制的轻微的并且几乎线性的下降。同时显示，作为热退火的结果，在 1075nm 下的通过量损失下降到基本上为零。这归因于以下因素：石英玻璃中的色中心通常在 350°C 被破坏。因此，最初由色中心和玻璃致密化两者导致的折射率变化在热退火温度超过 350°C 后将仅依赖于玻璃致密化。有趣的是，该玻璃致密化对光致折射率变化的贡献似乎涉及可忽略的在 1075nm 下的光致损耗。从实践的角度看，暴露于聚焦飞秒光束之前的光纤透射原始状态的完全恢复可以通过仅在超过 350°C 的温度退火几分钟而获得。

[0058] 为了进一步确认该过程，刻入更强并且因此更宽的 FBG。图 5 和图 6 分别显示了这样的 FBG 的窄带和宽带透射光谱，所述 FBG 在相同实验条件下写入，只是在 400°C 热退火 90s 之前和之后的暴露时间为 100s。在两个光谱范围内测量热退火处理对该 FBG 的影响：图 5 显示了 FBG 透射的精细观察，而图 6 说明了宽带光纤透射和相应损耗恢复。在两种情况下，检测极限由表征装置中的噪音限制于约 -40dB。在退火过程之后，在 1075nm 下的通过量损失（即测量的稍微离开布拉格波长不妨碍 FBG 透射）显示为在 -4.0dB 至 -0.13dB 之间通过，而相应的光致折射率调制保持在大的值（即 3.6×10^{-3} ）。在图 6 的情况下，光谱分辨率被设定为 1nm 并且使用重映参比（具有与镱掺杂光纤类似的模态含量的未掺杂光纤）实现透射率归一化。由该结果清楚的是，仅在 400°C 退火 90s 后可以消除光致损耗。

[0059] 当然，在不偏离本发明的范围的情况下可以对上述实施方案进行各种改变，本发明的范围由后附权利要求书所定义。

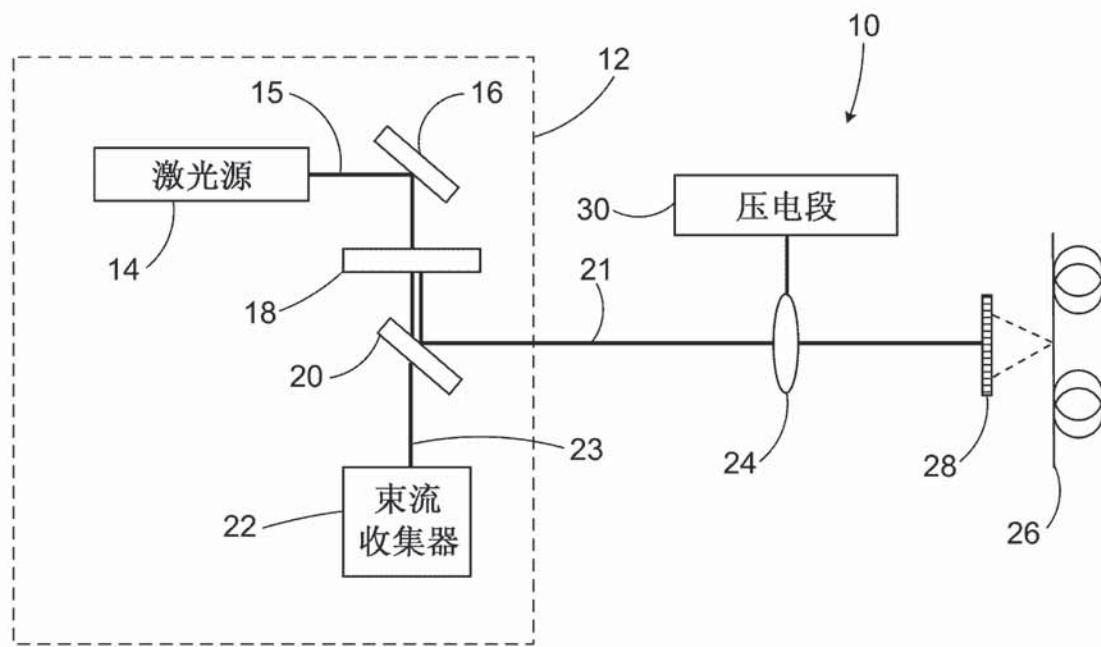


图 1

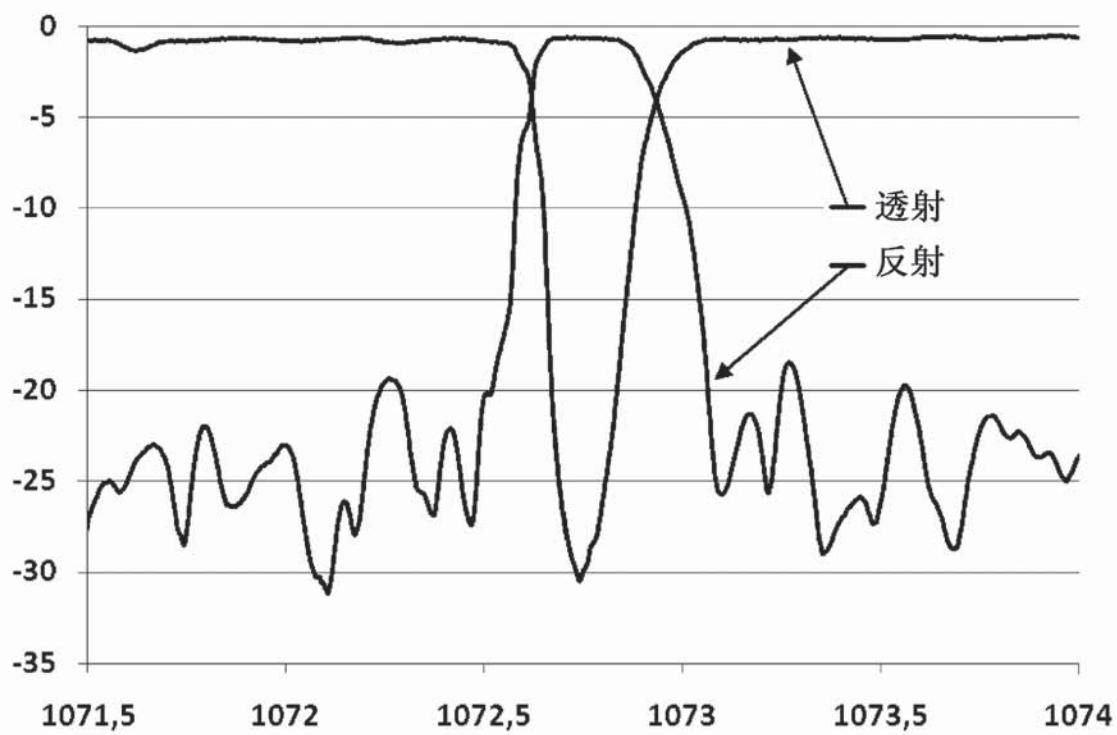


图 2

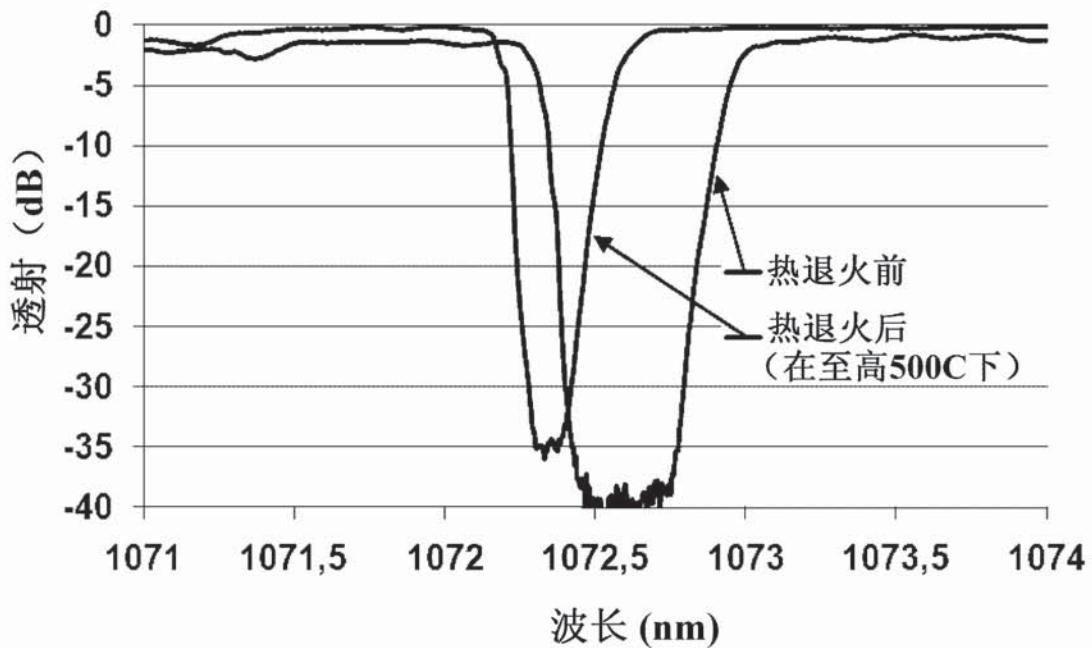


图 3

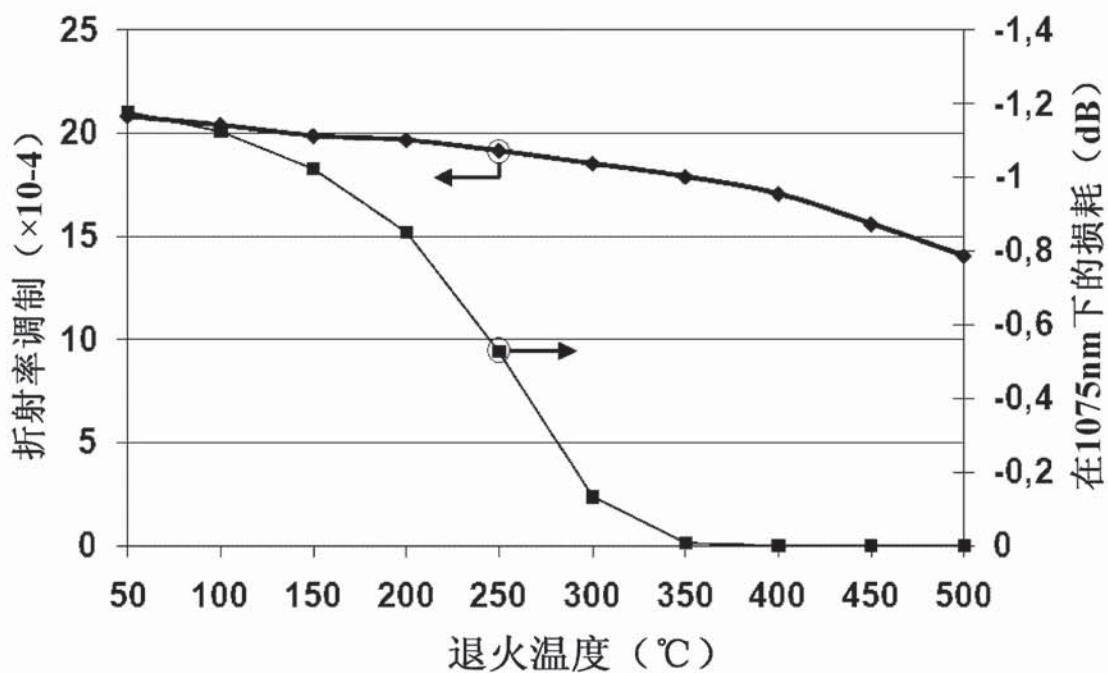


图 4

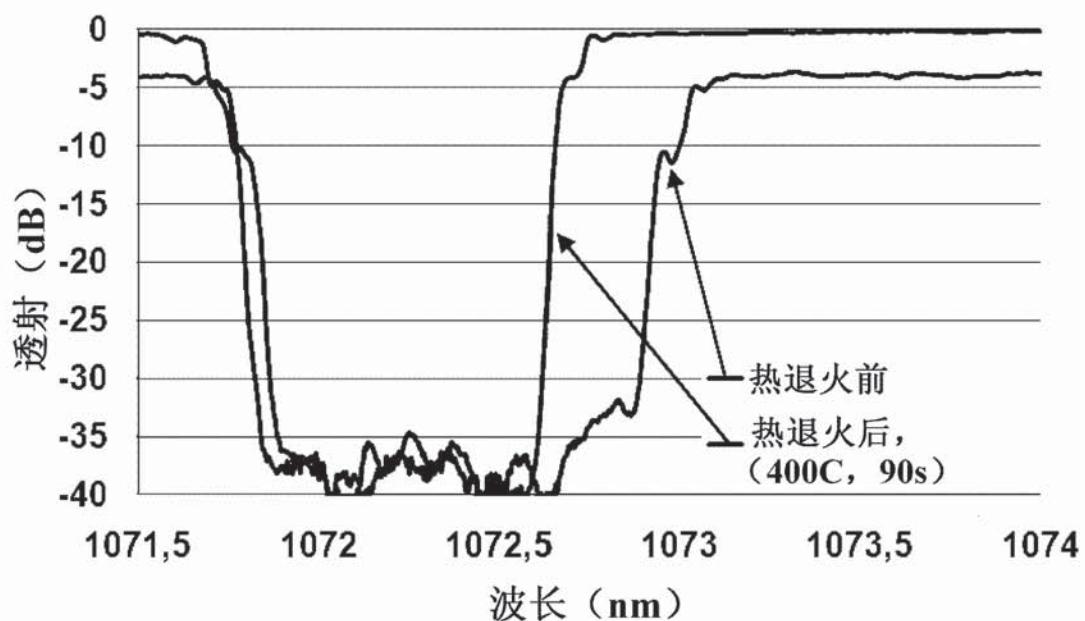


图 5

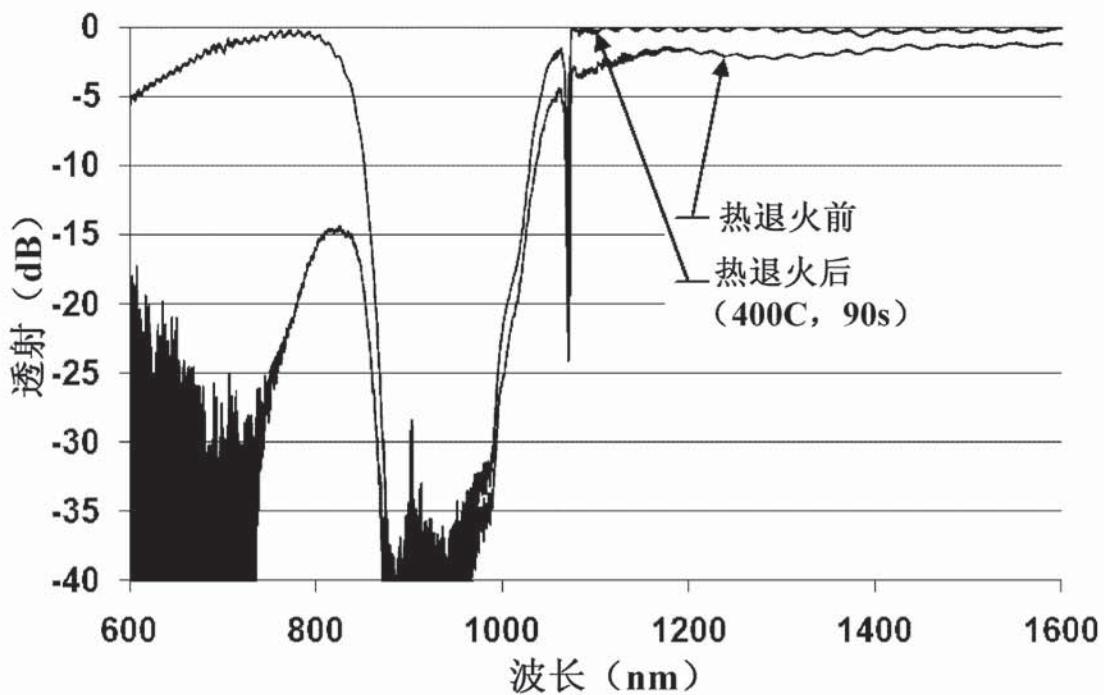


图 6