

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

G02B 6/02 (2006.01)

G02F 1/39 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200610160413.1

[43] 公开日 2007 年 6 月 20 日

[11] 公开号 CN 1982929A

[22] 申请日 2006.11.20

[21] 申请号 200610160413.1

[30] 优先权

[32] 2005.12.16 [33] US [31] 60/750,967

[71] 申请人 古河电子北美公司

地址 美国佐治亚

[72] 发明人 罗伯特·S·温德勒

安德鲁·D·亚布隆

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利商
标事务所

代理人 康健忠

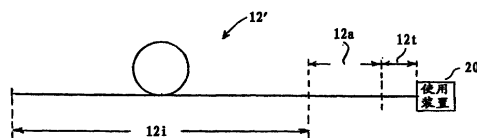
权利要求书 3 页 说明书 11 页 附图 3 页

[54] 发明名称

掺杂稀土的大模场面积多模混合光纤以及使用其的装置

[57] 摘要

一种大模场面积的掺杂稀土的光纤被配置为支持纤芯区内的多横模的信号发射。光纤是包含至少两个具有不同特性的轴向段的混合设计。在第一轴向段中，横向折射率分布沿径向不均匀，其特征在于在折射率方面有径向下降。第一段支持多于一个的横模。在第二轴向段中，横向折射率分布比第一段均匀。两个段绝热地相互耦合。作为例子，第二段是有利于与其它部件耦合的光纤的终端部分。在一个实施例中，在第一段中 $M_1^2 > 1.0$ ，在第二段中 $M_2^2 < M_1^2$ 。在优选实施中， $M_1^2 > 1.0$ 且 $M_2^2 \sim 1.0$ 。



1. 一种多横模掺杂稀土的光纤，包括：

掺杂有至少一种稀土元素的纤芯区，所述纤芯区的横断面具有横向折射率分布；

邻近所述纤芯区的包层区，

所述纤芯区和包层区被配置为支持所述纤芯区内的多横模的光信号发射，

包含所述分布沿径向不均匀的第一轴向段的所述光纤的特征在于折射率的径向下降，所述第一段支持所述横模中的一种以上，

所述光纤具有与所述第一段光耦合的第二轴向段，所述第二段的所述分布比所述第一段的均匀，并且

所述各个段相互绝热耦合。

2. 根据权利要求 1 的光纤，其中，所述第一段的特征在于参数 M_1^2 ，所述第二段的特征在于参数 M_2^2 ，其中， M^2 限定所述光纤的基横模与理想的高斯函数的相似性，并且其中， $M_1^2 > 1.0$ 且 $M_2^2 \ll M_1^2$ 。

3. 根据权利要求 2 的光纤，其中， $M_1^2 \gg 1.0$ 且 $M_2^2 \sim 1.0$ 。

4. 根据权利要求 1 的光纤，其中，所述第一段包含所述光纤的长度的主要部分，并且所述第二段包含所述光纤的终端部分。

5. 根据权利要求 4 的光纤，其中，所述光纤包含与所述第一段光耦合的第三轴向段，所述第三段的所述分布比所述第一段的均匀并与所述第一段绝热耦合，所述第二段位于所述第一段的一端，并且所述第三段位于所述第一段的相反的一端。

6. 根据权利要求 1 的光纤，其中，所述纤芯区的所述分布表现出 Δn_d 的折射率下降，该下降是所述纤芯区和所述包层区之间的横向折射率的差 Δn 的约 5 ~ 100 %。

7. 根据权利要求 1 的光纤，其中，光纤被配置为以基横模传播所述信号发射。

8. 根据权利要求 1 的光纤，其中，所述第一段包含所述光纤的长

度的主要部分，并且所述第二段包含所述光纤的中间部分。

9. 根据权利要求1的光纤，其中，所述纤芯区和包层区被配置为形成大模场面积光纤。

10. 一种光学放大器，包括：

根据权利要求1的光纤，该光纤用于响应向其施加的光泵能放大所述信号发射；

所述泵能的源；和

用于将所述泵能和所述光信号耦合到所述光纤中的耦合器。

11. 根据权利要求10的放大器，其中，所述光信号具有第一中心波长，并且所述泵能的源包含用于产生具有第二中心波长的光泵信号的LED。

12. 一种高功率光放大器，包括：

多横模、大模场面积混合光纤，该光纤包括：

掺杂有至少一种稀土元素的纤芯区，所述纤芯区的横断面具有横向折射率分布，

所述纤芯区被配置为响应向其施加的光泵能放大在其中传播的光输入信号；

邻近所述纤芯区的包层区，

所述纤芯区和包层区被配置为支持所述纤芯区内的多横模的光发射，

包含所述分布沿径向不均匀的第一轴向段的所述光纤的特征在于折射率的径向下降，所述第一段支持所述横模中的一种以上，

所述光纤具有与所述第一段光耦合的第二轴向段，所述第二段的所述分布比所述第一段的均匀，

所述各个段相互绝热耦合，使得在所述第一段中以特定的横模传播的能量不被显著耦合到所述第二段中的其它横模中，并且，

所述第一段的特征在于参数 M_1^2 ，所述第二段的特征在于参数 M_2^2 ，其中， M^2 限定所述光纤的基横模与理想的高斯函数的相似性，并且， $M_1^2 > 1.0$ 且 $M_2^2 < M_1^2$ ，所述第二段位于所述第一段的输入端、

所述第一段的输出端或两者上;

用于在与所述光信号的波长不同的中心波长产生所述光泵能的
LED; 和

用于将所述泵能耦合到所述光纤中的泵组合器。

13. 根据权利要求 12 的放大器, 其中, $M_1^2 \gg 1.0$ 且 $M_2^2 \sim 1.0$ 。

14. 根据权利要求 12 的放大器, 其中, 所述纤芯区的所述分布表现出 Δn_d 的折射率下降, 该下降是所述纤芯区和所述包层区之间的横向折射率的差 Δn 的约 5 ~ 100 %。

掺杂稀土的大模场面积多模 混合光纤以及使用其的装置

技术领域

本发明涉及光纤，特别是涉及用于高功率光放大器或激光器应用和改进的耦合效率的掺杂稀土的、大模场面积、多模混合光纤。

背景技术

由于具有高性能和成本效率，因此掺杂稀土的光纤放大器（REDFA），特别是掺铒光纤放大器（EDFA）被广泛用于诸如例如远距离传输和 CATV 应用的硅石光导纤维通信系统中。掺杂稀土的光纤（REDF）特别是掺铒光纤（EDF）的创新设计和优化均对这些应用起到关键作用。特别地，限制光模场（optical mode field）并控制铒分布的设计使得能够以低中光功率级对光进行有效、低噪声的放大。另一方面，对于高功率应用，具有较低的数值孔径（NA）的大模场面积（large-mode-area）（LMA）光纤降低信号强度，由此降低有害的非线性效应，并且还增加泵浦吸收效率。高功率 REDFA 和掺杂稀土的光纤激光器（REDFL），特别是利用掺镱光纤（YDF）的那些，在传统电信工业以外也有许多应用。例如，高功率 LMA、YDF 用于焊接和切削、激光测距和目标指示、医疗应用和污染检测以及自由空间通信（例如，在卫星之间）。

LMA 光纤的光学特性敏感地依赖于其横向折射率分布的细节。常规的知识表明，希望的 LMA 光纤具有 M^2 非常接近 1.0 的基模，由于折射率分布在纤芯的整个轴向断面上基本上均匀，因此这意味着基横模（fundamental transverse mode）的光场在形状上非常接近高斯型。 M^2 测量模场（mode field）和真实高斯函数之间的相似性。更具体地，对于具有高斯型形状的模式， $M^2 = 1.0$ ，对于所有其它的模场形状，

$M^2 > 1.0$ 。非常接近 1.0 的 M^2 便于低损失光耦合，并且从光纤出射的光束可有效对准或紧密地聚焦到衍射受限点上。但是，由于分布(profile)趋于表现出在纵轴附近折射率下降（也称为中心下降或烧除），因此制造具有理想的基模($M^2 = 1.0$)和均匀的纤芯折射率分布的 LMA 光纤会是困难的。并且，与具有类似的纤芯直径但中心下降显著的基横模的光纤相比，基横模 M^2 非常接近 1.0 的 LMA 光纤表现出更小的有效面积并由此降低不希望的光学非线性的阈值。最后，当 LMA EDF 的纤芯横向折射率分布基本上均匀且基模的 M^2 非常接近 1.0 时，在基模和掺杂的纤芯的外部区部之间存在相对很少的交迭。结果，基模会经历较低的放大效率，而高阶模(high-order mode)会经历不希望的放大。

因此，在本领域中仍需要具有改进的光耦合效率的 LMA REDF。还需要适用于高功率光纤放大器和激光应用的这种 LMA REDF。

发明内容

根据我们的发明的一个方面，LMA REDF 被配置为支持其纤芯区内的多横模的信号发射(radiation)。我们的光纤是包含至少两个具有明显不同特性的轴向段的混合设计。在第一轴向段中，横向折射率分布沿径向不均匀，其特征在于在折射率方面有径向下降。第一段支持多于一个的横模。在第二轴向段中，横向折射率分布比第一段均匀。两个段绝热地相互耦合。作为例子，第二段是有利于与其它部件耦合的光纤的终端部分。

在我们的发明的一个实施例中，在第一段中 $M_1^2 > 1.0$ ，在第二段中 $M_2^2 \ll M_1^2$ 。在优选实施中， $M_1^2 \gg 1.0$ 且 $M_2^2 \sim 1.0$ 。

附图说明

通过结合附图阅读以下更详细的说明，可以容易地理解本发明及其各种特征和优点，其中，

图 1 是现有 REDFA 的示意性框图；

图 2 是根据本发明的一个实施例的表示输入段 12i、绝热耦合段 12a、和低 M^2 终端段 12t 的光纤 12' 的示意图；

图 3 是根据本发明的另一实施例的另外表示设置在一对绝热耦合段 12a₂ 和 12a₃ 之间的另一低 M^2 段 12m 的光纤 12'' 的示意图；

图 4A 是沿其传播轴切取的 REDF 的示意性断面图；

图 4B 是根据本发明的另一实施例的图 4A 中所示的 REDF 的终端段的示意性横向折射率分布；

图 4C 是根据本发明的另一实施例的图 4A 中所示的 REDF 的输入段的示意性横向折射率分布，表示分布在纤芯区的中心或附近的明显的下降；

图 4D 是图 4C 的纤芯区的示意性折射率分布的明显下降的放大图；

图 5 是纤芯-包层横向折射率阶跃 (Δn) 与拉制光纤 (曲线 5.1)、热处理光纤 (曲线 5.2) 和均匀阶跃折射率光纤 (曲线 5.3) 的径向位置的关系图；

图 6 是拉制光纤 (曲线 6.1)、热处理光纤 (曲线 6.2) 和均匀阶跃折射率光纤 (曲线 6.3) 的基横模 (LP_{01}) 的归一化光强度的曲线图；

图 7 是具有明显的中心下降的光纤和均匀阶跃折射率光纤的归一化光强度与径向位置的关系图，用于比较图 5 的光纤设计的拉制光纤 (曲线 7.1) 和理想均匀阶跃折射率光纤 (曲线 7.3) 的基横模和折射率分布之间的交迭。

具体实施方式

(一般 REDFA 结构)

如图 1 所示，典型的 REDFA 10 包含在光学上耦合耦合装置 14 和使用装置 20 的 REDF 12。在电信应用中，装置 14 被称为波分多路复用器；在高功率非电信应用，它被称为泵组合器 (pump-combiner)。为了简化，以下我们将在高功率电信应用的上下文中说明我们的发明。在这种情况下，泵组合器 14 将光输入信号源 16 和光泵源 18 的输出端

耦合到 REDF 12 中。输入信号源 16 产生通过常规的光纤 22 与泵组合器 14 的输入端耦合的第一波长光输入信号，而泵源 18 产生通过常规的光纤 24 与泵组合器 14 的另一输入端耦合的第二波长光泵信号。

在本领域中公知，泵信号在 REDF 12 中产生粒子数反转（population inversion），这放大来自输入源 16 的输入信号。放大的输入信号沿 REDF 12 传播到使用装置 20。在高功率应用中，后者可包含大量公知的装置和设备；例如，另一 REDFA、光束准直仪、透镜系统、工件（例如，用于切削或焊接）；而在电信应用中，使用装置 20 可包含光接收器、光调制器、光耦合器或分光器或一个终端设备。这些装置或设备中的一些可通过标准尾纤连接器（未示出）与 REDF 12 耦合。

作为例子，输入源 16 是在稀土种类的 REDF 12 的放大范围中的波长处产生较低功率的光输入信号的激光器，而泵源 18 是在产生希望的放大率的输入信号的较短的中心波长处产生较高的光功率（例如，高于约 150mW）泵信号的发光二极管（LED）或 LED 的阵列。优选地，REDF 12 是掺镱光纤，信号源 16 产生具有约 1080nm 的中心波长的输入信号，并且泵源 18 在约 915nm 或约 975nm 的中心波长产生泵信号。这里我们注意到，半导体激光器也可被用作泵源，但是，由于用 LED 时可将更完全的光耦合到光纤中，因此，LED 特别是 LED 的阵列是优选的。

虽然图 1 的 REDFA 示出共同的共传播泵配置（即，泵和输入信号通过 REDF 沿相同的方向传播），但是，也能够使用反向传播的配置（即，泵和输入信号通过 REDF 沿相反的方向传播）。另外，可以串联配置多个 REDFA，这是本领域中公知的用于增加高功率多级系统的总增益的方案。泵能量也可沿横向被耦合到 REDFA 中。

另外，当提供适当的公知的光谐振器（例如，一对隔开的光纤光栅（fiber grating））时，REDF 可用作激光器。

（混合 REDF 设计）

根据我们的发明的一个方面，如图 4A 所示，LMA REDF 12' 包含

被直径为 d_0 的包层区 12.2 包围的直径为 d_c 的纤芯区 12.1。我们定义短语大模场面积 (LMA) 如下: LMA 光纤的纤芯区和包层区被配置为产生比常规的单模光纤大得多的有效模场面积 (mode area)。例如, 在约 1080nm 的波长, 常规的单模光纤作为例子具有约 $50\mu\text{m}^2$ 的模场面积, 但在相同的波长, LMA 光纤可具有约 $100\mu\text{m}^2$ 的模场面积。类似地, 在约 1550nm 的波长, 常规的单模光纤作为例子具有约 $80\mu\text{m}^2$ 的模场面积, 但在相同的波长, LMA 光纤可具有约 $160\mu\text{m}^2$ 的模场面积。虽然这些说明表示在相同的波长 LMA 光纤具有单模光纤的两倍大的模场面积, 但是, 根据 LMA REDF 的特定应用和希望的性能, 其它的比值也可以是合适的。

纤芯区 12.1 的折射率高于包层区 12.2, 折射率的差由 Δn 表示。虽然没有示出, 但众所周知, 包层区可包含内 (压低的) 包层区和外包层区, 外包层区的折射率在纤芯区和内包层区之间。

在任一种情况下, 纤芯区和包层区被配置为支持从源 16 在其中传播的输入信号发射的多横模的传播 (图 1)。根据我们的发明的一个方面, 如图 2 所示, REDF 12' 是混合光纤, 在于它包含具有不同的特性的至少两个轴向段; 即, 例如通过 LMA 轴向绝热段 12a 绝热地相互耦合的 LMA 轴向输入段 12i 和 LMA 轴向终端段 (terminal segment) 12t。另外, 混合光纤 12' 可在其输入端 (未示出)、其输出端 (如图 2 所示) 或两者上包含 LMA 终端段。

更具体地, 在一种意义上, 终端和输入段具有不同的特性, 在于它们分别如图 4B 和图 4C 所示具有不同的横向折射率分布。一般地, 终端段 12t 的纤芯区的横向折射率分布比输入段 12i 的均匀。通过例如分布形状的傅立叶变换的高频量测量均匀度。因此, 傅立叶变换包含较少的高频分量的分布 (profile) 被认为比傅立叶变换包含较多的高频分量的分布更均匀。简单分布的相对均匀性的目视观察常与这种类型的定量分析一致; 例如, 图 4B 表示, 终端段 12t 的纤芯区的分布表现出基本上恒定的横向折射率, 因此在其傅立叶变换中具有较少的高频分量, 而图 4C 表示, 输入段 12i 的纤芯区的分布在横向折射率中表

现出明显的中心下降,并因此在其傅立叶变换中具有更多的高频分量。因此,如图 4C 所示,在输入段 12i 中,纤芯区 12.1 的横向折射率分布沿径向不均匀;即,折射率分布表现出明显的下降 12.1d,这里,纤芯区 12.1 的中心或中心附近的横向折射率如图 4D 所示减少量 Δn_d 。相反,在终端段 12t 中,纤芯区的折射率分布如图 4B 所示更接近均匀(或沿径向恒定)。

另外,输入段 12i 被配置为支持多于一个的横模。

在设计明显的横向折射率下降 12.1d 的特征时,我们优选下降的幅度 Δn_d 应不大于纤芯-包层折射率差 Δn 的约 100%。 Δn 的大小取决于 REDF 的稀土掺杂物以及可被添加到纤芯区和/或包层区的诸如 Ge、P、Al 或 F 的任何改变折射率的掺杂物;例如,在掺杂 Yb 的光纤中 $\Delta n \sim 0.005$,而在掺杂 Er:Yb 的光纤中 $\Delta n \sim 0.01$ 。在相反的极端,下降的幅度应不小于 Δn 的约 5%。如下所述,主要根据对从纯高斯型充分扰动横模形状的需要规定范围的下端。另一方面,下降的宽度或直径 d_d 应大致大于在系统中使用的光的最短波长(例如,大于一般比信号波长短的泵波长)。在相反的极端,下降的最大宽度 d_d 可等于纤芯区 12.1 的直径 d_c ,但一般为约 $d_c/3$ 。这些条件的目的在于,光“看见”由下降产生的折射率的扰动。另外,虽然下降被示为圆锥形,但其它几何形状(例如,圆筒状)以及更复杂的形状也可以是合适的。

在另一种意义上,如 P. A. Belanger 在 Optical Engineering, 第 32 卷,第 9 期,第 2107~2109 页(1993)中说明的那样,终端和输入段具有不同的特性,这种不同在于它们的 M^2 参数相互不同,这里 M^2 限定光纤的基横模与理想的高斯函数的相似性,在此包含该文献作为参考。(尽管该文章限定阶跃折射率光纤的 LP_{01} 基模的 M^2 ,但该限定对所有的光纤有效,包括这里所述的类型的在横向折射率分布中具有中心下降的光纤。)特别地,输入段 12i 的特征在于参数 M_1^2 ,终端段 12t 的特征在于参数 M_2^2 ,并满足以下不等式: $M_1^2 > 1.0$ 且 $M_2^2 \ll M_1^2$ 。在优选的实施例中, $M_1^2 \gg 1.0$ 且 $M_2^2 \sim 1.0$ 。在理论上, M^2 可以任意大,但实际中 REDF 的 M^2 一般大致在范围 $1 < M^2 < 10$ 中。并且,

例如,在 $M_2^2 \sim 1.0$ 的意义上 $M^2 \sim 1.06$ 一般被认为较小,而在 $M_1^2 \gg 1.0$ 的意义上 $M^2 \sim 1.3$ 一般被认为较大。

另外,输入段 12i 和终端段 12t 相互绝热地耦合;例如,如图 2 所示通过 LMA 绝热段 12a。一般地,这种耦合器确保以输入段中的特定横模传播的能量不被较多地耦合到终端段中的其它横模中,反之亦然。在本领域中公知的绝热耦合技术和设计包含在物理上使纤芯区渐变,使得直径沿耦合区域、沿轴向平滑地增加(或减小),或在化学上使掺杂物的浓度渐变,使得它们的密度沿耦合区域、沿轴向逐渐增加(或减少)。在后一种情况下,优选的技术包括(i)加热 REDF(例如,用常规的喷灯(torch))以导致光纤中的掺杂物扩散和(ii)根据沿光纤的喷灯的纵向位置可控地改变施加到光纤的热量,使得实现所希望的掺杂物分布。

各段的 M^2 参数的设计和它们之间的绝热转变的使用的组合提高基横模的耦合,并显著降低从输入段到终端段与高阶的横模耦合。

我们的发明的另一优点在于,即使在不存在熔接器(耦合不同的单模光纤的典型现有技术方法)、例如当借助于适当的透镜或透镜系统在自由空间中实现 REDF 的终端段和块体(非纤维)光学元件(例如,望远镜)之间的耦合时,也可以应用上述原理。

在用于在上述波长范围中操作的本领域中公知的典型的基于硅石的 REDF 中,纤芯区 12.1 与至少一种稀土元素(例如,Er、Yb、Tb、Tm、Nd 和/或 Pr)和一种或更多种诸如 Ge、P 或 Al(增加折射率)或 F(减小折射率)的改变折射率的物质掺杂。包层区 12.2 可以为纯的硅石,或者它也可以被掺杂。作为例子,根据如上所述使用的掺杂物,选择掺杂水平,使得纤芯区和包层区之间的折射率阶跃(index step) Δn 为约 0.005 ~ 0.01,并且,输入段中的折射率下降 Δn_d 的大小大致与 Δn 相同。

并且,对于支持多横模的光纤,纤芯直径 d_c 作为例子为约 $20\mu\text{m}$ 。这种光纤的外径 d_o 一般为约 $125 \sim 600\mu\text{m}$ 。另外,很明显,输入段 12i 是光纤 12' 的总长的主要部分,而终端段 12t 是相对较小的部分;例如,

终端段作为例子小于约 $500\mu\text{m}$ 长,而输入段作为例子为 1m 或 1km 长的量级。

(光纤端接处理)

如上所述, M^2 高的光纤可被局部加热,以诱发局部降低光纤的 M^2 的掺杂物扩散。将光纤加热到足够的温度(例如,接近或高于约 2000°C 的熔接温度(fusion splicing temperature))诱发改变折射率的掺杂物的显著扩散,由此诱发光纤的横向折射率分布的显著改变。使用这种掺杂物扩散以抑制增加 LP_{01} 基模的 M^2 的中心下降、脊(ridge)或其它折射率分布特征。在我们的发明的许多(但不是全部)实施中, LP_{01} 基模的 MFD(模场直径)实际上跟随热致扩散减少。

在我们的发明中,拉制的光纤被局部加热到高温($>>1200^\circ\text{C}$)以诱发掺杂物扩散,该掺杂物扩散抑制升高光纤的 LP_{01} 基模的 M^2 的、折射率分布中的中心下降或其它特征。图 5 的曲线 5.1 表示掺杂 Er:Yb 的光纤的理论拉制光纤折射率分布,该掺杂 Er:Yb 的光纤的初始 MFD(使用常规的“Petermann II”定义)为 $13.4\mu\text{m}$ 且其初始 $M^2 \sim 1.32$ 。在该模拟的折射率分布中可看到深的中心下降。将这种光纤设计加热到约 2100°C 约 25 秒可望改变折射率分布(曲线 5.2),使得最终的 MFD 为 $13.3\mu\text{m}$ 且初始 M^2 减少(提高)到约 1.0。不管使用的耦合技术(常规的熔接、连接、自由空间耦合、GRIN 光纤透镜等)如何,将这种改变应用于光纤 12' 的终端段 12t(图 2)可望显著提高出入该光纤的耦合效率。在图 6 中示出相应的横向 LP_{01} 模场形状(强度场)。

对于该特定的例子,重要的是要注意,对于给定量的在 LP_{01} 基模中引导的功率,拉制光纤的峰值光强度仅是在热处理的光纤中出现的峰值光强度的约 37%。因此,如果用图 5 中示出的横向折射率分布(曲线 5.1)设计的光纤被端接在各端,段 12t 被局部加热以诱发图 5 中所示的扩散的折射率分布(曲线 5.2),那么在大部分的光纤中经受的峰值光强度可望相对较小,使得不希望有的非线性光学效应(例如,模拟的布里渊散射或模拟的拉曼散射)的开始的阈值将相对较高。同时,由于终端段 12t 中的 M^2 接近 1.0,因此,耦合效率将在光纤端接点上

十分优异。光强度可望仅在光纤的热处理的终端段的较短（<约 $500\mu\text{m}$ ）区域中升高。由于有害的非线性光学效应随峰值强度以及光纤段长度而变化，因此，可以在光纤的较短的终端段上容许升高的光强度。

可通过使用常规的熔接器（fusion splicer）对光纤端接进行热处理。如果光纤在热处理区内被劈开或被抛光，那么可以使用自由空间耦合（例如，用常规的块体透镜（bulk lense），以获得与拉制状态 LP_{01} 模场形状非常明显不是高斯型的光纤的 LP_{01} 基横模的有效光耦合。作为替代方案，可包含热处理作为熔接过程的一部分。图 6 中的与拉制状态（未加热）光纤的 MFD 匹配的高斯场之间的预测耦合损失（曲线 6.1）为约 0.7dB，而对于热处理的光纤相应的预测耦合损失小于约 0.01dB（曲线 6.2）。并且，10% 以上的高斯能量将被耦合到拉制光纤的不希望有的 LP_{02} 模中，而耦合到热处理的光纤的 LP_{02} 模中的能量的量是测量不到的。

如上所述，为了确保能量不在光纤的热处理状态和拉制状态区之间的转变区中从 LP_{01} 基模损失，应使得转变为渐变的和绝热的。转变区中的折射率分布的变化必须沿其长度非常平缓。当通过热致掺杂物扩散产生转变区时，可以通过沿其长度改变施加到转变区的热量、例如通过选择较宽的（即，散开的）热源或沿转变区扫描更聚焦的热源，实现平缓的转变。根据本领域公知的原理，该变化必须多平缓地出现取决于折射率分布的细节和操作波长。可容易地使用基于折射率分布的数值模拟以及经验性的过程优化，以找到对于使转变损失最小化合适的加热条件。

（操作理论）

当 LMA 光纤的基横模具有 $M^2 > 1.0$ 时，其耦合损失（自由空间或熔接器）增加，并且从光纤出现的基横模输入信号不能容易地、紧密地被向下聚焦到较小的点尺寸或被容易地校准。但是，具有增加的 $M^2 (> 1.0)$ 存在某些优点。特别地，基横模场具有更大的 M^2 值的光纤表现出更大的有效模场面积，并由此表现出比具有相同的纤芯直径

但 M^2 较小的光纤低的低峰值光强度。结果，具有较高的 M^2 的光纤对于不希望有的诸如 SBS（模拟布里渊散射）和 SRS（模拟拉曼散射）的光学非线性表现出更高的阈值。除了这种益处，具有较高的 M^2 的光纤（例如，如图 4C 对输入光纤段 12i 所示的纤芯区折射率的明显的中心下降）可在纤芯区中的稀土掺杂物和纤芯区中传播的输入信号的基横模场之间表现出较多的交迭。因此，基横模的放大效率可增加，并且，可通过设计具有较高的 M^2 的光纤减少不希望有的高阶的横模的放大。

在图 5~6 中这些优点是明显的，这些图包含三个 LMA 光纤：具有较高的 M^2 的理论拉制光纤（曲线 5.1、6.1）；同样具有较高的 M^2 的均匀阶跃折射率光纤（曲线 5.3、6.3）；和被热处理以降低其 M^2 的光纤（曲线 5.2、6.2）。在图 5 中比较它们的折射率分布，并在图 6 中比较它们在 1550nm 的相应的 LP_{01} 基横模光强度分布。拉制和阶跃折射率光纤中的光强度已对于光纤的热处理部分中的峰值强度被归一化，使得它们均代表相同的量的光功率。

更具体地，对应例如图 2 的输入光纤段 12i 的拉制光纤在纤芯区横向折射率方面表现出明显的中心下降（如前面定量的），并因此表现出约 1.32 的增加的基模 M^2 和约 $259\mu\text{m}^2$ 的相对较大的有效模场面积。拉制光纤和均匀阶跃折射率光纤均具有 $\Delta n \sim 0.01$ 和 $d_c \sim 20\mu\text{m}$ 。但是，均匀阶跃折射率光纤具有约 1.05 的基模 M^2 和约 $200\mu\text{m}^2$ 的减少的有效面积。为了说明纤芯区折射率分布和具有较高的 M^2 的光纤的强度分布之间的较多的交迭，图 6 将归一化的强度分布与这些光纤的折射率分布相比较。

另一方面，在对应例如图 2 的终端光纤段 12t 的热处理的光纤中，热处理具有从 1.32 到约 1.0 的增加（降低）的 M^2 ，将有效模场面积从 $259\mu\text{m}^2$ 减少到 $139\mu\text{m}^2$ ，将峰值光强度从约 0.37 增加到 1.0，并且基本上不改变公知的“Petermann”MFD（对于拉制状态和热处理状态的光纤均为约 $13.3\mu\text{m}$ ）。为了比较，还示出理想均匀的阶跃折射率分布的折射率分布和相应的归一化强度分布（曲线 5.3、6.3）。

最后, 图 7 结合图 5~6 比较上述的拉制光纤(曲线 5.1、7.1)和理想均匀的阶跃折射率光纤(曲线 5.3、7.3)的基横模和折射率分布之间的交迭。折射率分布和光强度被单独地对于其自身归一化。图 7 表示, 阶跃折射率光纤的外纤芯区的大部分经受相对较低的光强度, 而拉制光纤的较大的部分经受较高的光强度。因此, 拉制光纤在横模场和稀土掺杂物之间具有更好的交迭, 这意味着拉制光纤还表现出更好的放大效率。

(替代性实施例)

应当理解, 上述配置仅是用于解释许多可能的特定实施例, 这些特定实施例可被设计为代表本发明的原理的应用。在不背离本发明的精神和范围的情况下, 本领域技术人员可以根据这些原理设计大量和各种其它配置。

特别地, 如图 3 所示, 除了通过 LMA 绝热耦合器 12a₁ 与输入段 12i 绝热耦合的 LMA 终端段 12t 以外, LMA 光纤 12'' 还可包含位于光纤的端部之间的位置上的 LMA 中间段 12m。中间段 12m 也例如通过 LMA 绝热耦合器 12a₂ 和 12a₃ 与输入段 12i 绝热耦合。与终端段 12i 相似, 中间段 12m 具有比输入段 12i 的小并优选接近 1.0 的基横模 M^2 。这种中间段 12m 的一种应用是滤除不希望有的高阶横模。

另外, 虽然我们已在 EDFA 应用的上下文中说明了我们的发明, 但本领域技术人员可容易地认识到, 其应用可被扩展到需要与 EDF 耦合的任何装置(例如光纤激光器)。

图 1

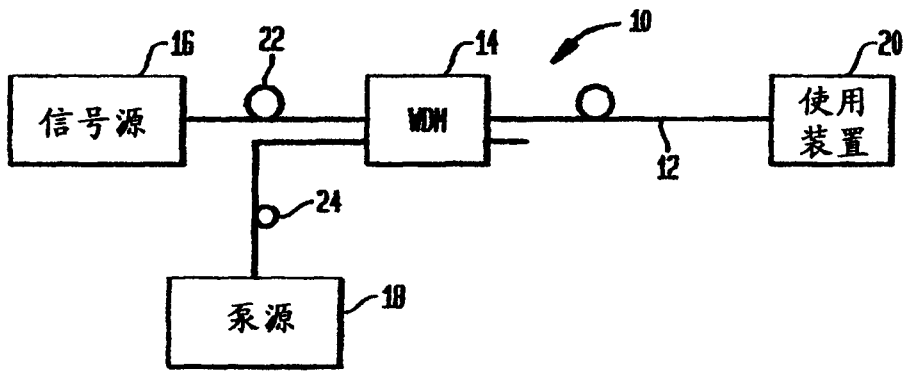


图 2

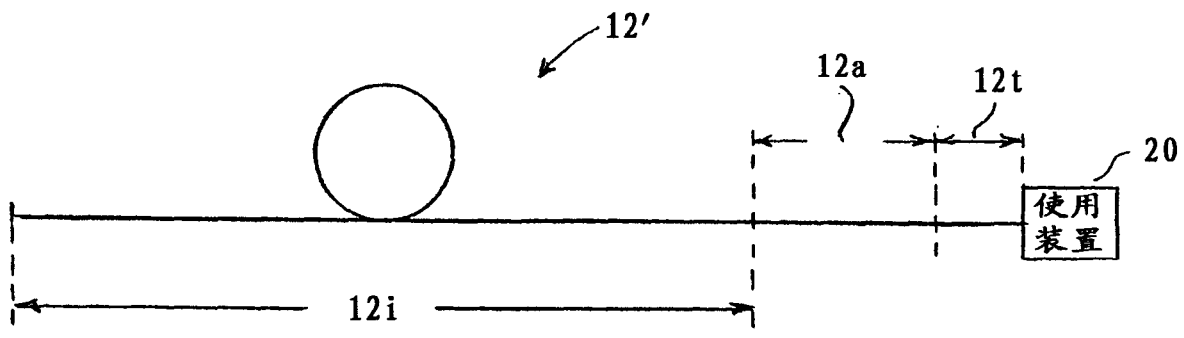


图 3

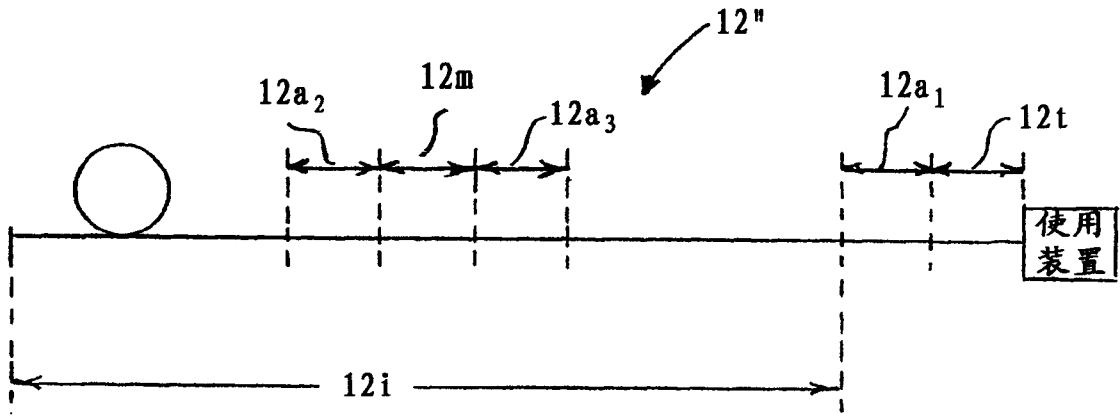


图 4A

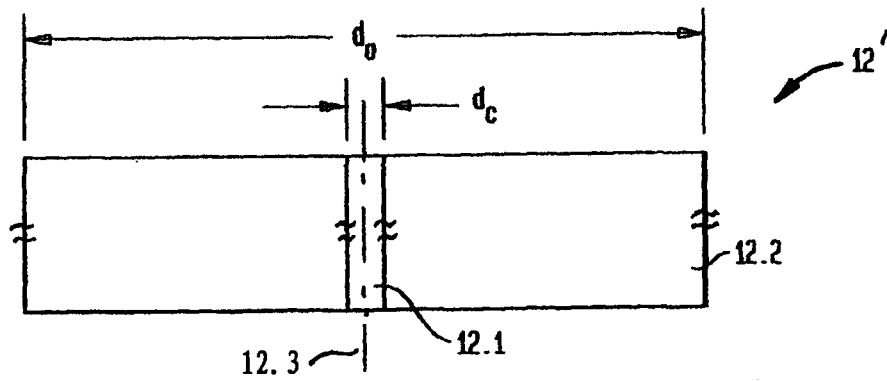


图 4B

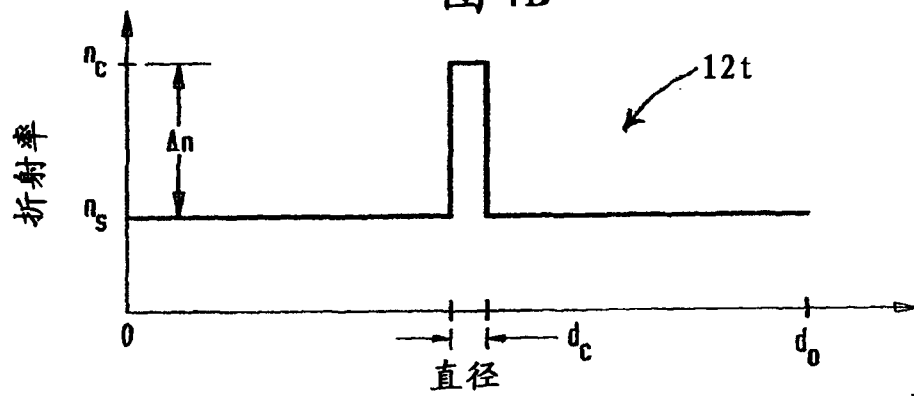


图 4D

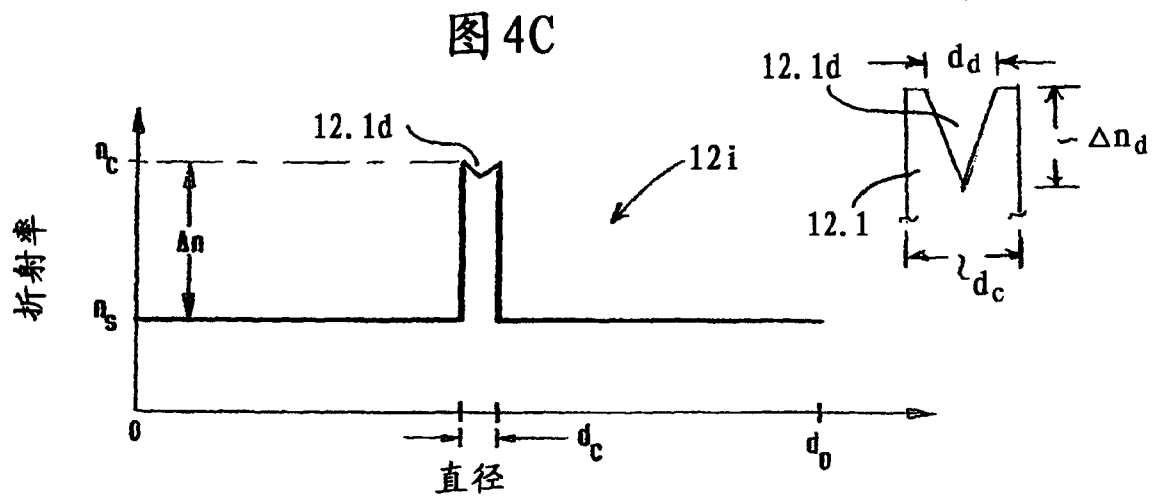


图5

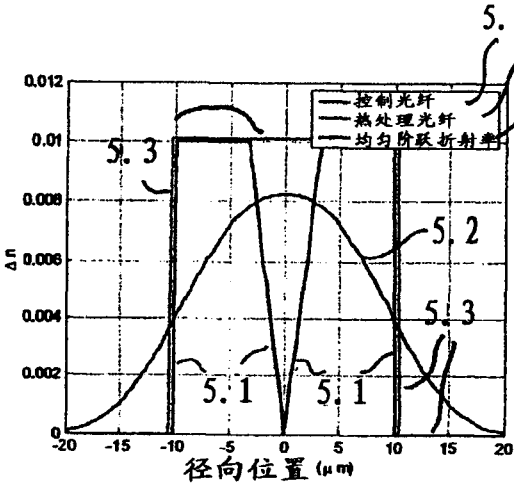


图6

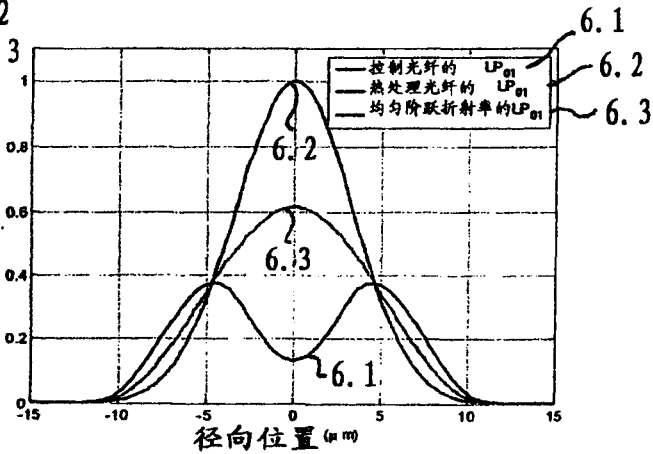


图7

