

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷

G02B 6/22

C03B 37/018 C23C 16/30



[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 97113916.4

[43] 授权公告日 2003 年 1 月 22 日

[11] 授权公告号 CN 1099603C

[22] 申请日 1997.6.20 [21] 申请号 97113916.4

[30] 优先权

[32] 1996.12.27 [33] JP [31] 350156/1996

[71] 专利权人 富士通株式会社

地址 日本神奈川县

[72] 发明人 冈村浩司 武田惠子

审查员 崔尚科

[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

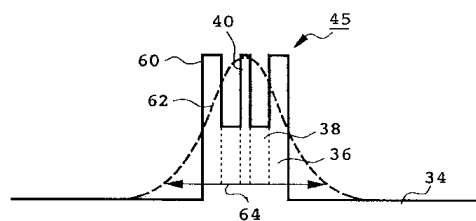
代理人 张祖昌

权利要求书 3 页 说明书 9 页 附图 8 页

[54] 发明名称 光学放大纤维及其制造过程

[57] 摘要

一种光学放大纤维，它包括包层、位于包层内并含有 Ge 的第一纤芯、位于第一纤芯内并含有 Er 和 Al 的第二纤芯、以及位于第二纤芯内并含有 Ge 的第三纤芯。第二纤芯具有高于包层折射率的折射率，第一和第三纤芯具有的折射率各自都高于第二纤芯的折射率。由于具有高折射率的第三纤芯位于中央部分，因此能使模式场直径变小并由此改善泵浦光转换为信号光的效率。另外，由于第二纤芯含有 Al 作为放大带宽扩展元素，因此可保证足够宽的放大带宽。



ISSN 1008-4274

1. 一种光学放大纤维，它包括：
具有第一折射率的包层；
位于上述包层内部的第一纤芯，它具有折射率增大元素并具有高于第一折射率的第二折射率；
位于上述第一纤芯内部的第二纤芯，它含有稀土元素及放大带宽扩展元素并具有高于第一折射率但却低于第二折射率的第三折射率；
以及
位于上述第二纤芯内部的第三纤芯，它含有折射率增大元素且具有高于第三折射率的第四折射率。
2. 如权利要求 1 所述的光学放大纤维，其特征为：上述放大带宽扩展元素是从一组 Al、Zn、Sn 和 La 元素中选出的。
3. 如权利要求 1 所述的光学放大纤维，其特征为：上述折射率增大元素包括 Ge 和 Ti 中的一种。
4. 如权利要求 1 所述的光学放大纤维，其特征为：上述第二纤芯含有 Er 和 Al。
5. 如权利要求 4 所述的光学放大纤维，其特征为：Al 的浓度为至少 4wt%。
6. 如权利要求 1 所述的光学放大纤维，其特征为：模式场直径不大于 4.5 μm 。
7. 如权利要求 1 所述的光学放大纤维，其特征为：上述第三纤芯的直径不大于 1 μm 。
8. 如权利要求 7 所述的光学放大纤维，其特征为：上述第二纤芯的直径不大于 2 μm 。
9. 如权利要求 1 所述的光学放大纤维，其特征为：上述第三纤芯的第四折射率近似等于上述第一纤芯的第二折射率。
10. 如权利要求 1 所述的光学放大纤维，其特征为，它还包括：
位于上述第三纤芯内部的第四纤芯，它含有稀土元素和放大带宽

扩展元素,并具有高于第一折射率但却低于第二折射率的第五折射率;以及

位于第四纤芯内部的第五纤芯,它含有折射率增大元素并具有高于第三和第五折射率的第六折射率。

11. 如权利要求 10 所述的光学放大纤维,其特征为:上述第四纤芯的第五折射率近似等于上述第二纤芯的第三折射率,上述第五纤芯的第六折射率近似等于上述第三纤芯的第四折射率。

12. 制造光学放大纤维的过程,包括下列步骤:

(a) 用化学气相淀积法在石英反应管内表面上形成主要由 SiO_2 制成且掺杂有 GeO_2 或 TiO_2 的第一纤芯层,所述石英反应管具有第一折射率,所述第一纤芯层具有比上述第一折射率高的第二折射率;

(b) 用化学气相淀积法在上述第一纤芯层上形成主要由 SiO_2 组成的烟灰状第二纤芯层,所述第二纤芯层具有比上述第一折射率高但比第二折射率低的第三折射率;

(c) 让上述第二纤芯层浸润一种含稀土元素和至少一种从一组 Al、Zn、Sn 和 La 元素中挑选出来的元素的溶液;

(d) 将浸润于上述第二纤芯层中的溶液中的溶剂进行蒸发;

(e) 加热上述第二纤芯层以使上述第二纤芯层玻璃化;

(f) 用化学气相淀积法在上述第二纤芯层上形成主要由 SiO_2 制成并掺杂有 GeO_2 或 TiO_2 的第三纤芯层,所述第三纤芯层具有比上述第三折射率高的第四折射率;

(g) 用加热来收缩上述石英反应管以形成预制棒; 以及

(h) 熔化并抽丝上述预制棒。

13. 如权利要求 12 所述的制造光学放大纤维的过程,其特征为:浸润在上述第二纤芯层中的溶液含有 Er 和 Al。

14. 如权利要求 12 所述的制造光学放大纤维的过程,它还包括用加热来减小石英反应管外径的中间收棒处理步骤,该步骤分别插于上述步骤 (a) 和上述步骤 (b) 之间以及上述步骤 (e) 和上述步骤 (f) 之间。

15. 如权利要求 12 所述的制造光学放大纤维的过程，它还包括下面的步骤：在上述步骤(g)之后用新的石英玻璃管覆盖已完善收棒的预制棒、通过加热将预制棒同石英玻璃管集成为一体，以及对集成有石英玻璃管的预制棒进行拉丝。

光学放大纤维及其制造过程

本发明有关一种能用作光纤放大器的光纤及制造这种光纤的过程。

一种能直接放大光信号而无需将其转换为电信号的光学放大器，其优点在于它放大的能力能容易地被扩大，因为它本质上具有不依赖于比特率的功能；还在于它能集体放大多个通道的信号。为此，作为未来光通信系统的关键装置之一，该光学放大器正为不同的科研机构所广泛地研究。

迄今已知有一种光学放大器，它采用包括一掺杂有 Er、Nd 或 Yb 等稀土元素的纤芯在内的单模光纤（以下简称“掺杂光纤”），其特征为：待放大的信号光被传输到掺杂光纤，同时在与信号光相同或相反的方向上将泵浦光引入掺杂光纤。

采用这种掺杂光纤的光学放大器（称作光纤放大器）具有能消除对增益的偏光依赖性、降低噪声、减少在与光传输路径耦合中的信号损耗等极好的特点。在实际应用该光纤放大器时，要求将信号光的波长带宽（以下简称“波长带宽”）做得较宽，使之能在该带宽中将信号光放大至特定的增益，还要求将泵浦光到信号光的转换效率提得较高。

对具有波长范围为 0.8~1.6 μm 的光来说，已经有了适合长距离传输的石英玻璃光纤制造技术，以及将该光纤投入实际应用的技术。一根光纤是从一具有粗棒形状的预制棒拉丝制成的。预制棒要求在其截面方向上具有一种组分变化梯度，该组分梯度按照设计要求精确设定。

预制棒制备的标准过程是众所周知的，其中由活性气体化学反应转换而来的玻璃成分通过采用 MCVD（金属化学气相淀积）过程或与之类似的过程被淀积到一石英反应管的内表面上。在 MCVD 过程中，诸如 SiCl_4 和氧气等合适的反应气体被导入石英反应管中，该石英反应管被加热到适合于气体反应的温度。将加热区沿石英反应管的纵向移动，以将新的玻璃层淀积到石英反应管的内壁面上，许多层（例如 20~30 层）就这样被反复地淀积。从预制棒制造出来的光纤横截面方向上形成的组分梯度可以通过分

别调整预制棒各层的组分来加以控制。在各层被充分淀积之后；通过加热将石英反应管缩制成一棒状的预制棒。然后把预制棒拉制成光纤。

在 MCVD 过程中，通常采用在室温下能被蒸发的反应材料。例如：用 SiCl_4 来生成作为光纤主成分的 SiO_2 ，采用 GeCl_4 来生成 GeO_2 ， GeO_2 是用于调节折射率的元素。有时，为制造掺杂光纤，不能得到含有稀土元素的、能象 SiCl_4 和 GeCl_4 那样能在室温下充分蒸发的合适反应材料，结果是不能仅仅采用 MCVD 过程将一种稀土元素以足够的浓度掺到掺杂光纤中去。正因为如此，已经采用如下的方式将一种稀土元素以实际足够的浓度掺杂到一根掺杂光纤中去。

一种已知的制备适合制造掺杂光纤的预制棒的过程包括：将烟灰状态玻璃淀积到石英反应管内表面的步骤（1），使烟灰状的芯玻璃浸润有一种含稀土元素化合物作为溶质的溶液的步骤（2），以及烘干溶液使石英反应管收缩的步骤（3）。另一方面，也已经提出一种利用掺杂光纤来扩展光纤放大器波长带宽的技术，其中掺杂光纤纤芯浸润有 Al_2O_3 和稀土元素。

例如，日本专利公开平 5 - 119222 披露了一种双芯结构，它包括一铝/硅石为基的玻璃（ Er-Al-SiO_2 ），掺杂有铒(Er)和铝（Al），其位于纤芯的中央部分；以及一掺杂有锗（Ge）元素的锗/硅石基玻璃（ Ge-SiO_2 ），其位于纤芯的外围部分。然而，在日本专利公开平 5 - 119222 中披露的以前的结构形式中，其缺点在于纤芯外周部分的相对折射率差 $\Delta 1$ 约为 2%，而纤芯中央部分的相对折射率差 $\Delta 2$ 最多约为 0.7%，其结果是在芯中央部分产生一大的折射率下降。

这是因为用来扩展带宽的掺杂元素（如 Al）会起降低折射率的作用。折射率下降造成这样的现象：传输光的模式场被扩大并由此使模式场直径变大。由此而增大的模式场直径对将泵浦光转换为信号光是不方便的，并会导致泵浦光转换为信号光方面效率的降低。例如在日本专利公开平 5 - 119222 中披露的结构形式中，其模式场直径约为 $4.8\mu\text{m}$ ，泵浦光转换为信号光的效率为 64%。

因此，本发明的目的是提供一种光学放大纤维，它能扩展波长带度，

并能通过将模式场直径抑制到较小值来提高泵浦光到信号光的转换效率，本发明的另一目的是提供一种制造该光学放大纤维的过程。

根据本发明的一个方面，它提供一种光学放大纤维，包括：具有第一折射率的包层；位于该包层内的第一纤芯，它具有增大折射率的元素和高于第一折射率的第二折射率；位于第一纤芯内的第二纤芯，它具有第一稀土元素和一扩展带宽的元素以及高于第一折射率但却低于第二折射率的第三折射率；以及位于第二纤芯内的第三纤芯，它具有增大折射率的元素以及高于第三折射率的第四折射率。

增大折射率的元素可从 Ge 和 Ti 中选择。在这些元素中优先选取 Ge。第二纤芯优选地含有 Er 和 Al。

根据本发明的另一方面，它提供制造一种光学放大纤维的过程，包括下述步骤：(a) 用化学气相淀积法在石英反应管内表面上形成一主要由 SiO_2 组成、掺杂有 GeO_2 或 TiO_2 的第一纤芯层；(b) 用化学气相淀积法在第一纤芯层上形成一主要由 SiO_2 组成的烟灰状的第二纤芯层；(c) 将第二纤芯层浸润含一种稀土元素以及至少一种从一组 Al、Zn、Sn 和 La 元素中选出来的元素的溶液；(d) 蒸发浸润在第二纤芯层中的溶液中的溶剂(e) 加热第二纤芯层使其成玻璃状；(f) 用化学气相淀积法在第二纤芯层上形成一主要由 SiO_2 组成的、掺杂有 GeO_2 或 TiO_2 的第三纤芯层；(g) 通过加热完善地收缩石英反应管以形成预制棒；(h) 将预制棒加热熔化并拉制光纤。

在本发明的光学放大纤维中，由于具有大折射率差的第三纤芯位于纤芯的中央部分，因此与具有已有结构的掺杂光纤相比，本发明的光学放大纤维中光能集中在纤芯中央部分，使模式场直径变小，从而改善了泵浦光到信号光的转换效率。

另外，由于第二纤芯含有一稀土元素和一放大带宽扩展元素，因此能使光纤放大器具有足够宽的带宽。放大带宽扩展元素可以从一组 Al、Zn、Sn 和 La 元素中加以挑选。

对下面的叙述和所附的权利要求参照表示本发明某些优选实施例的附图所作研究，可以更加清楚本发明上述的及其它的目的、特点和优点，以及实现它们的方式，对发明本身也能最好地理解。

图 1 为预制棒制备装置的结构示意图；

图 2A~2G 表示根据本发明的一个实施例来制备预制棒的顺序步骤；

图 3A~3D 表示拉制一根复盖管的顺序步骤；

图 4A 为石英反应管在收棒之前的横截面图；

图 4B 为预制棒的横截面图；

图 5 为光纤拉制装置的结构示意图；

图 6 表示根据本发明的实施例所得的折射率分布图以及光学放大纤维的模式场；

图 7 表示泵浦光功率和信号光输出间的关系；

图 8 为根据本发明的另一实施例所得的光学放大纤维截面结构和折射率分布图。

参照图 1，它表示能用于制备预制棒的预制棒制备装置示意结构图。参考数字 2 表示一个用于制造玻璃制品的车床，它可旋转地支承石英反应管 4；6 是一喷灯，它被沿着石英反应管的纵向在车床 2 上往复移动以加热石英反应管的外部；8 是温度控制器，通过调节送入喷灯 6 的氧气和氢气等的流速来控制喷灯 6 的燃烧状态。

气体输入管 12 被联接到联接器 10 之上，联接器 10 被联到石英反应管 4 的端部， SiCl_4 和氧气等气源则通过气体输入管 12 被送入石英反应管 4 中。参考数字 14 表示输送象 SiCl_4 和 GeCl_4 等源气体的送气器，而源气体的送入量则通过如氧气那样的载体气体的流速来加以控制，而氧气是经由每个流量表 16 被送入的。

溶液送入管 18 与气体输入管 12 并行地联到联接器 10 之上，并也经由阀 20 联到溶液缸 22。当阀门 20 打开时，溶液缸 22 中的溶液被馈送到石英反应管 4 中。此外，气体输入管 12 和溶液输入管 18 在一联接部分之上经联接器 10 被联接到石英反应管 4，该联接部分用一熟知的方法进行密封，由此来保证石英反应管 4 中有一封闭的系统。

图 2A~2G 表示采用图 1 所示的预制棒制备装置来制备预制棒的顺序步骤。首先，通过将源气体、 SiCl_4 、 POCl_3 和 SF_6 送入外径为 22mm、内径为 18mm 的石英反应管 4 中。使之在石英反应管 4 中优选地形成一个一

P - F - SiO₂为基的包层玻璃（图中未画出）。淀积该包层玻璃的步骤此处省略。

下一步，如图 2A 所示，旋转被送入包括 SiCl₄ 和 GeCl₄ 源气体以及载体气体的石英反应管 4，并同时用喷灯 6 从其外部对它加热；这样便把用作第一纤芯的氧化物玻璃的细粉末淀积到石英反应管 4 中。用喷灯 6 加热使细粉末马上玻璃化。重复几次喷灯 6 的这种往复运动，由 SiO₂ 组成、掺杂有 GeO₂ 并具有预先确定的折射率和厚度的第一纤芯层 24 便被均匀地形成在石英反应管 4 的内壁上。

第一纤芯层 24 的折射率被设定为高于石英反应管 4 的折射率，以便获得预先确定的相对折射率差。第一纤芯层 24 的折射率可以用源气体及其它气体的成分来加以调节。例如：第一纤芯层 24 具有约 2.0 的相对折射率差。下一步（图中未画出），停止送入源气体并将石英反应管 4 用喷灯 6 加热至高温来使之稍稍软缩。这一过程称为中间收棒处理。在停止送入端气体中的 GeCl₄ 并降低喷灯 6 加热石英反应管 4 的温度之后，再用喷灯 6 从石英反应管的外部将石英反应管 4 加热至较低温度，以把由 SiO₂ 组成的氧化物玻璃细粉末淀积到第一纤芯层 24 之上。

通过反复几次喷灯的这种往复运动，在第一纤芯层 24 之上便形成一由 SiO₂ 组成的烟灰状第二纤芯层 26，如图 2B 所示，这里的“烟灰状”一词意指一种能够保持一层形状的细粉末和多孔的状态。降低用喷灯 6 对石英反应管 4 加热的温度是为了不让第二纤芯层马上成玻璃状。在此之后，如图 2C 所示，将喷灯 6 移到靠近石英反应管 4 端部的部分，并在这样的状态下边旋转石英反应管 4 边对它局部加热，以形成在被加热部分具有较小直径的收缩部分 28。收缩部分 28 被形成在石英反应管 4 的每个端部。

将石英反应管 4 冷却到合适的温度，如图 2D 所示，将一根由挠性树脂等物组成的溶液输入管 18 插入石英反应管 4 中，其引导部位于两收缩部分 28，28 之间，从溶液缸 22 输送出的溶液被注入到石英反应管 4 中位于两收缩部分 28、28 之间的区域。被这样注入到石英反应管 4 中的溶液便仅被浸润到烟灰状的第二芯层 26 中。被输入石英反应管 4 中的溶液含有稀土元素和 Al。在本实施例中，溶液含有 ErCl₃ · 6H₂O 和 AlCl₃ 作为溶剂酒

精中的溶液。

举例来说，溶液中 $\text{ErCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的浓度是在 0.001~1wt% 范围之内。为在光纤或预制棒中获得预定的 Al_2O_3 和 Er 的掺杂浓度，可以通过实验方法来原因溶液浓度。举例来说，被注入的溶液量是在 5~20ml 的范围内。将溶液输入管 18 拔出之后，将干燥的 N_2 气送入石英反应管 4 来慢慢地蒸发酒精和湿气，通过将 Cl_2 和氧气输到石英反应管 4 中并用喷灯 6 来加热石英反应管可足以清除掉剩余的湿气。

在此之后，如图 2E 所示，通过来回移动喷灯 6 来加热石英反应管 4，使烟灰状第二纤芯层成玻璃状，这样来得到玻璃化的第二纤芯层 26'。第二纤芯层 26' 的相对折射率差比如说是 0.7%。然后用喷灯 6 将石英反应管 4 加热到高温来再次进行中间收棒处理，正如图 2F 所示的那样，将含有 SiCl_4 和 GeCl_4 的源气体以及载体气体输入石英反应管 4，同时如图 2A 所示的步骤那样用喷灯 6 从石英反应管 4 的外部对石英反应管加热。

将用作第三纤芯层的氧化物玻璃的细粉末淀积到第二纤芯层 26' 上，并用喷灯 6 加热使细粉末马上玻璃化。通过反复几次喷灯 6 的往复运动，在第二纤芯层 26' 之上均匀地形成由 SiO_2 组成、掺杂有 GeO_2 且具有预定的折射率和预定厚度的第三纤芯层 30。第三纤芯层 30 的相对折射率差比如说是约 2.0%。最后，如图 2G 所示，通过用喷灯 6 进一步加热石英反应管 4 至高温，完善地收缩石英反应管 4 直至其中空部分消失为止，最终得预制棒 32a。必须注意的是，在图 2A 和 2B 所示的每一步骤之后为什么要进行中间收棒处理，其原因是尽量避免在各纤芯层之间产生 Ge、Al 等元素的扩散。在完整的收棒处理之后，预制棒 32a 的直径约为 14mm。

具有直径约为 14mm 的、以上述方法制备的预制棒 32a 被覆盖一石英玻璃管 34，如图 3A 所示，该石英玻璃管外径为 22mm，接下来如图 3B 所示，通过加热将预制棒 32a 同石英玻璃管 34 集成在一起，接下来将覆盖管拉制成直径为 14mm 左右，以获得预制棒 32b，在覆盖管拉制步骤被重复进行数次之后，预制棒 32b 最终被覆盖有一厚的石英玻璃管 36，其外径为 26mm 左右（如图 3C 所示），接下来通过加热使之集成化以制备成直径约 14mm 的预制棒 32（如图 3D 所示）。

通过多次重复覆盖管控制步骤，可以减小相对芯直径，并由此来优化模式场直径和截止波长，还可以优化掺杂有 Er 的第二纤芯部的内、外径，并由此来改善信号转换效率。本实施例中的第二纤芯 26' 含有浓度约为 6wt% 的 Al 和浓度约为 500ppm 的 Er 元素。

图 4A 表示在进行完整收棒处理之前的石英反应管 4 的横截面，图 4B 则画出在图 3D 中的步骤之后所得的预制棒 32 的横截面。在覆盖管控制步骤之后的预制棒 32 包括有：由 SiO_2 制成的、具有较低折射率的包层 34，由 SiO_2 制成的、掺杂有 GeO_2 用于增大折射率且具有较高折射率的第一纤芯 36，由 SiO_2 制成的、掺杂有 Er 和 Al_2O_3 但却不掺杂有 GeO_2 的第二纤芯 38，以及由 SiO_2 制成的、掺杂有 GeO_2 用于增大折射率且具有较高折射率的第三纤芯 40。

第二纤芯 38 的折射率高于包层 34 的折射率，而第一和第三纤芯 36、40 的折射率均高于第二纤芯 38 的折射率。每一部分的主要成分 SiO_2 也可以含有 P_2O_5 或类似元素用于调节折射率。通过控制图 4B 中所示的预制棒 32 得到的光行具有与预制棒 32 的横截面类似的横截面，而它的每一部分也都具有与预制棒 32 的对应部分相同的组成成分。因此，光纤的每一部分均用与预制棒 32 的对应部分的相同名称和参考数字来表示。

根据本实施例中所描述的预制棒制备过程，由于溶液是被注入到形成在石英反应管 4 中的两收缩部分 28、28 之间，且被浸润到第二纤芯层 26 中，因此不要求将石英反应管 4 从车床上移走来浸润溶液。在这种情况下，可以从石英反应管 4 的一侧来将溶液注入到石英反应管 4 的两收缩部分 28、28 之间，这样可保持包括源气体输入系统在内的一个封闭的系统。由此可防止因杂质渗透进石英反应管 4 而造成的损耗特性的下降，此外，根据本实施例的预制棒制备过程，由于制备预制棒的所有步骤均可在石英反应管管 4 安装在车床 2 之上的状态下进行，因而可省去诸如将石英反应管 4 在车床 2 上装卸的繁重工作。

图 5 是用于从预制棒拉制光纤的装置的示意图。将预制棒 32 支承在预制棒送进部分 42 并逐渐地将其向下送进，加热预制棒 32 的下端使其在加热炉 44 中融化。预制棒 32 在加热炉 44 的下端部分被拉制成掺杂光纤 45，

用纤维直径测量装置 46 从非接触测量方式来测量掺杂光纤 45 的直径。然后用涂复装置 48 将掺杂光纤 45 涂上一层紫外光塑化环氧树脂，紧接着用紫外灯 50 对涂层作塑化处理。涂复有紫外光塑化环氧树脂的掺杂光纤 45 经由以受控速度旋转的输带辊子 52 被绕在卷线鼓 54 上。

为使掺杂光纤 45 具有恒定的直径，采用光纤直径控制单元 56 对输带辊子的旋转速度作反馈控制，掺杂光纤 45 的直径则由光纤直径测量装置 46 来测量。掺杂光纤 45 在其纵向方向上在诸如稀土元素和 Al_2O_3 的掺杂浓度、每个部分的直径等方面应具有稳定的特性，这样的掺杂光纤可以用上述的拉丝装置从预制棒 32 加以制造。

根据上面所描述的制造过程，可以制造具有第一、第二和第三纤芯 36、38 和 40 的三芯结构的掺杂光纤 45。具体地说，掺杂光纤 45 具有由 SiO_2 制成的包层 34、由 SiO_2 制成的掺杂有 GeO_2 的第一纤芯 36、由 SiO_2 掺杂有 Er 、 Al_2O_3 但不掺有 GeO_2 所组成的第二纤芯 38，以及由 SiO_2 掺杂有 GeO_2 所制成的第三纤芯 40。

图 6 表示折射率分布图 60 以及在本实施例中所得到的掺杂光纤 45 的模式场 62。用 D_1 、 D_2 和 D_3 分别表示第一、第二和第三纤芯 36、38 和 40 的直径，用 Δ_1 、 Δ_2 和 Δ_3 分别表示第一、第二和第三纤芯 36、38 和 40 的相对折射率差， $\Delta_1 \approx 2\%$ ， $D_1 \approx 3.0\mu\text{m}$ ， $\Delta_2 \approx 0.7\%$ ， $D_2 \approx 0.8\mu\text{m}$ ， $\Delta_3 \approx 2\%$ ， $D_3 \approx 0.6\mu\text{m}$ 。进而，模式场直径 64 为 $4.4\mu\text{m}$ ；而泵浦光到信号光的转换效率约为 73%。用于研究转换效率所做的实验结果同日本专利发布号 Hei 5 - 119222 中披露的已有技术的掺杂光纤的数值进行比较，其结果表示在表 1 和图 7 中。

表 1

	结构损耗	模式场直径	效率梯度	阈值	转换效率
已有技术的掺杂光纤	20dB/km	4.8 μm	70%	7.0mW	64%
本发明的掺杂光纤	7dB/km	4.4 μm	80%	5.5mW	73%

从表 1 看出，对于本实施例的掺杂光纤 45 来说，模式场直径从已有技术的掺杂光纤的值 $4.8\mu\text{m}$ 降至 $4.4\mu\text{m}$ ，且转换效率从已有技术的掺杂光纤

的值 64 % 增加至 73 %。表 1 中的阈值是指信号光增益开始出现时泵浦光功率的最小值。

参照图 8，它表示根据本发明的另一实施例所制造的掺杂光纤 64 的截面结构和折射率分布图 70。本实施例的掺杂光纤 65 具有这样一种结构形式：第四纤芯 66 和第五纤芯 68 被位于第一实施例的掺杂光纤 45 的第三纤芯 40 的内部。第四纤芯 66 由 SiO_2 组成，掺杂有 Er 和 Al_2O_3 但却不掺有 GeO_2 ，而第五纤芯 68 由 SiO_2 组成，掺杂有 GeO_2 。

第四纤芯 66 的相对折射率差约为 0.7%，而第五纤芯 68 的相对折射率差约为 2%。在本实施例的掺杂光纤 65 中，位于最外层的第一纤芯 36 的外径优选地应为 $2\mu\text{m}$ 或小于 $2\mu\text{m}$ 。

尽管在上述实施例中将 Er 用作稀土元素，但本发明并不仅仅局限于此，例如象 Nd 或 Yb 这样的稀土元素也是会被使用的。进一步说，可把 TiO_2 用作掺杂剂用以增加折射率，也可使用如 Zn、Sn 或 La 这样的元素来代替 Al 用于扩展带宽。

如上所述，本发明的优点在于提供一种适合用作光纤放大器的光纤，它的波长带宽更宽，泵浦光转换为信号光的效率更高。

图 1

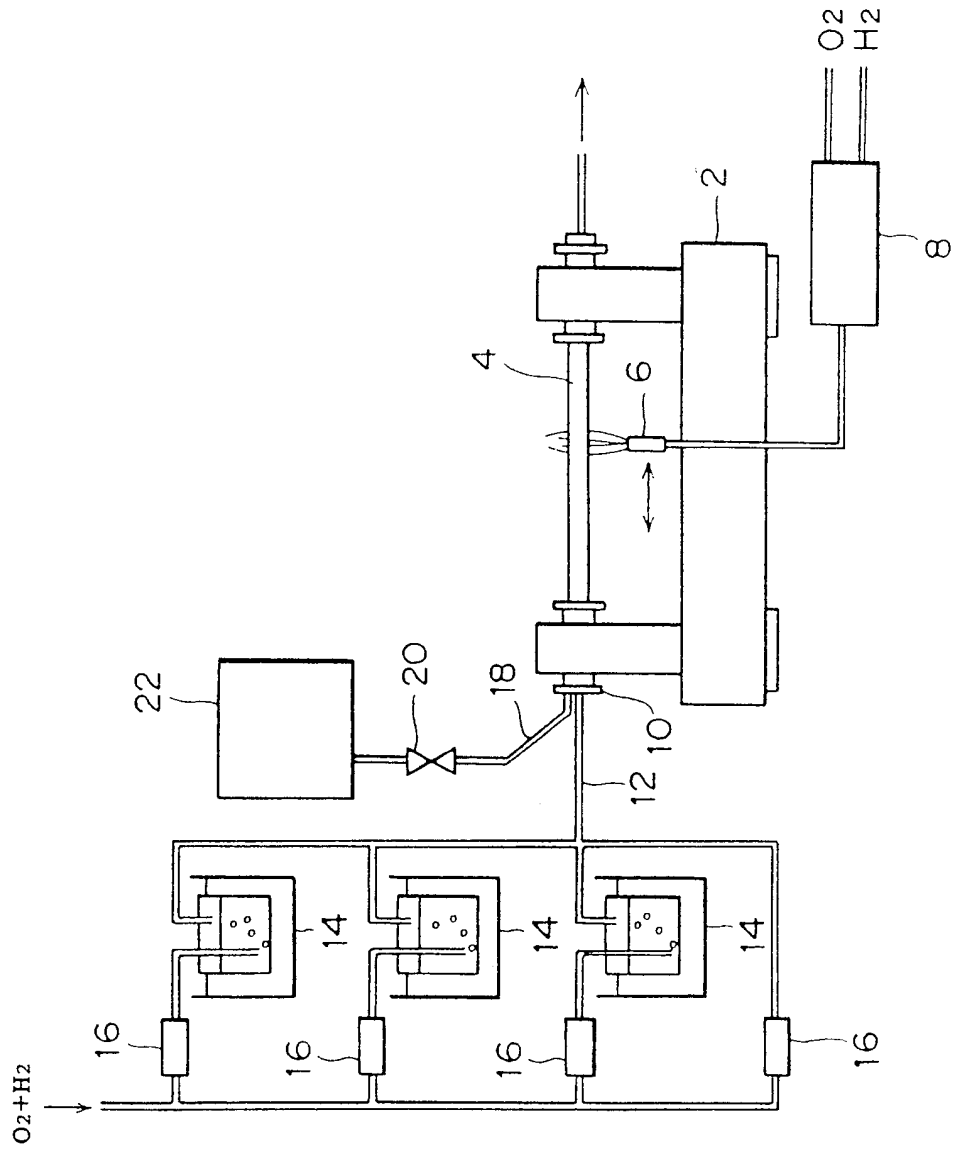


图 2 A

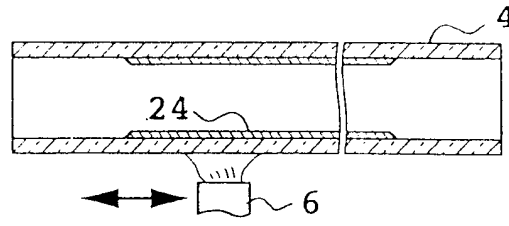


图 2 B

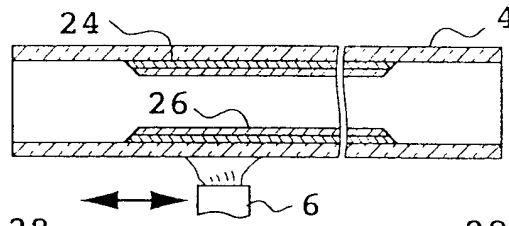


图 2 C

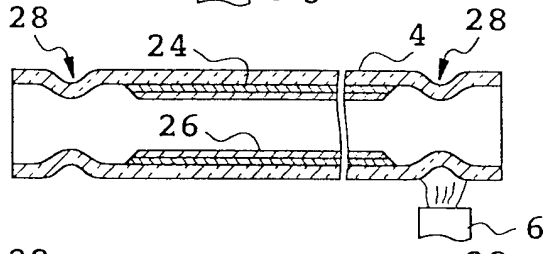


图 2 D

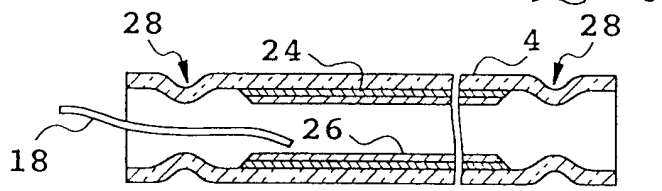


图 2 E

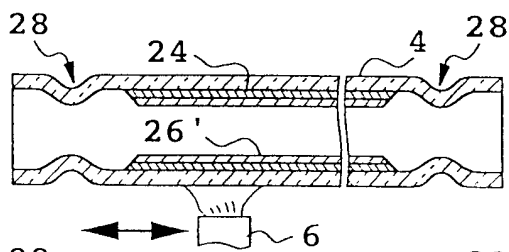


图 2 F

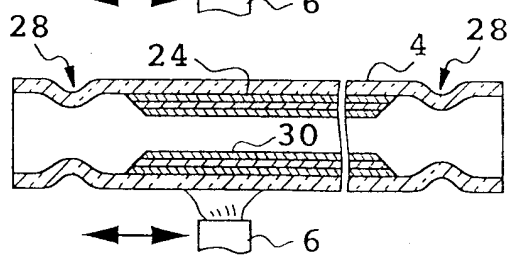
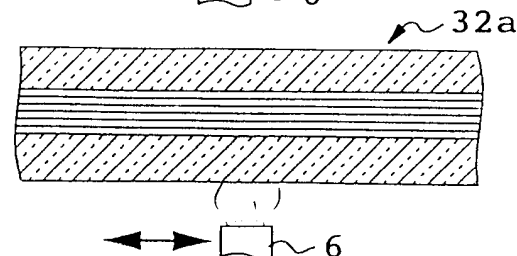


图 2 G



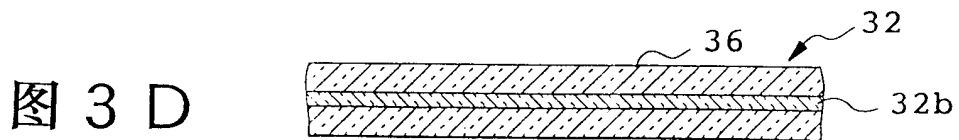
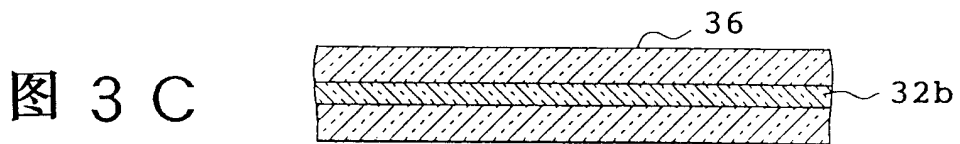
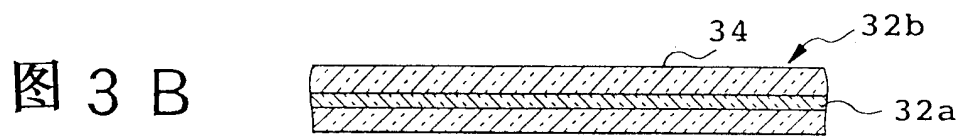
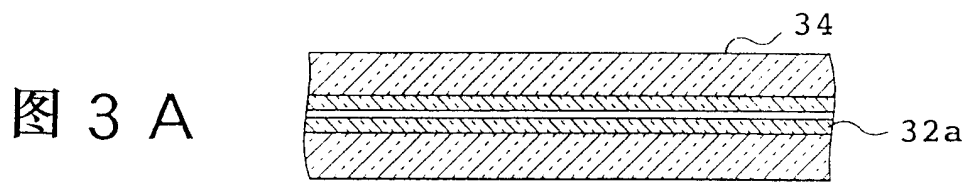


图4 A

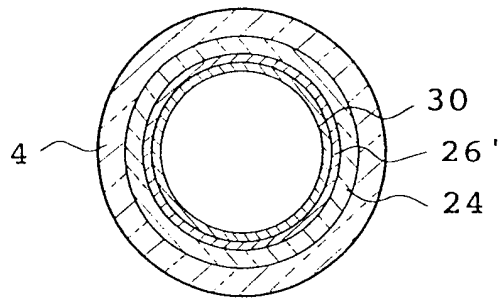


图4 B

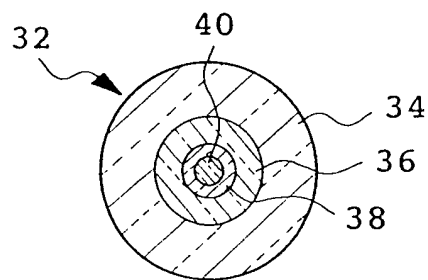


图 5

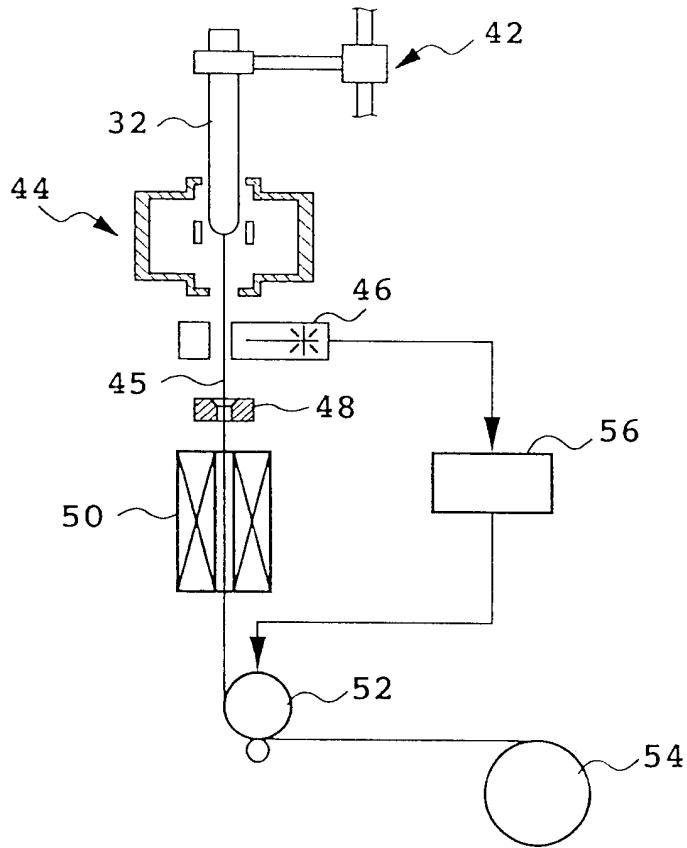


图 6

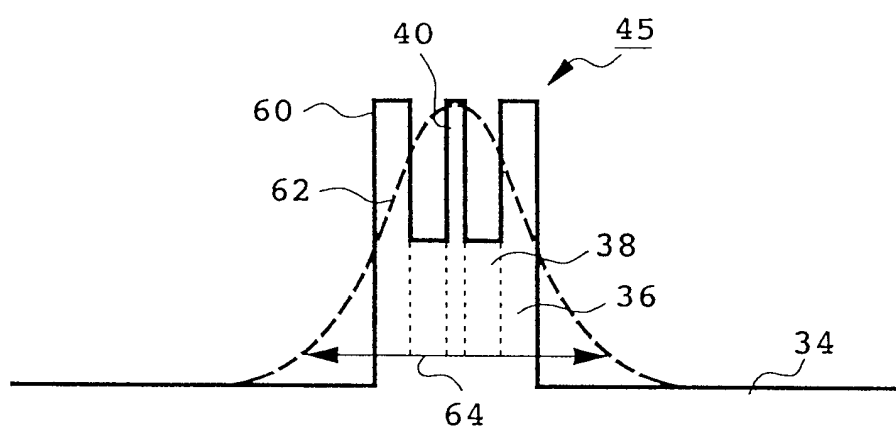


图7

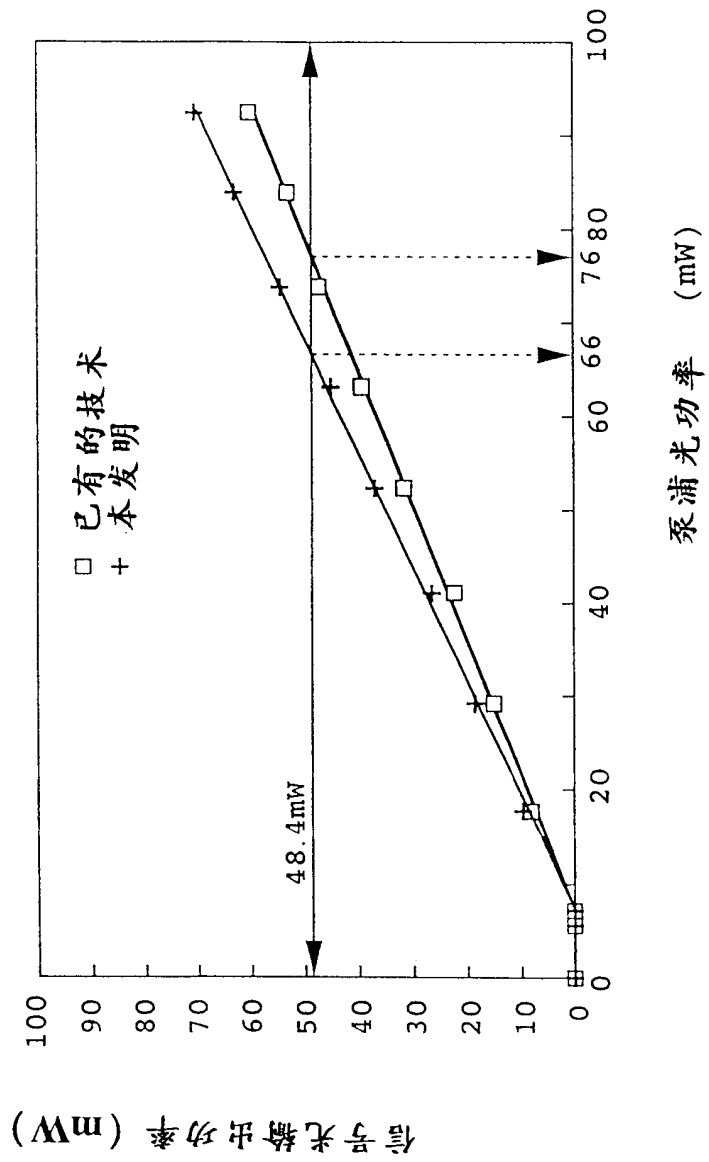


图 8

