

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
G02B 6/00 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 03108233.5

[45] 授权公告日 2007 年 3 月 21 日

[11] 授权公告号 CN 1306294C

[22] 申请日 2003.3.25 [21] 申请号 03108233.5

[30] 优先权

[32] 2002. 3. 25 [33] JP [31] 083805/2002

[73] 专利权人 住友电气工业株式会社

地址 日本大阪

[72] 发明人 长谷川健美

[56] 参考文献

CN1269020A 2000.10.4

US6097870A 2000.8.1

CN1331808A 2002.1.16

WO9964903A1 1999.12.16

审查员 扈 燕

[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 李德山

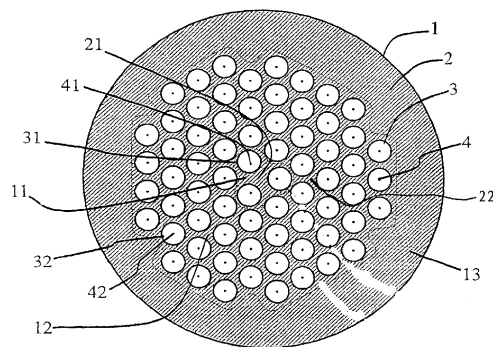
权利要求书 3 页 说明书 9 页 附图 10 页

[54] 发明名称

微结构光纤及制造方法

[57] 摘要

一种光纤，包括：一具有预定折射率的主介质，和多个孔，孔具有不同于主介质的折射率，并且沿至少一部分光纤长度设置在主介质区域中，以划分为内部区域和围绕该内部区域的外部区域，其中：在该光纤部分的横截面中可以确定平移对称栅格，外部区域中每个孔的中心与相应栅格格点重合，并且内部区域中多个孔的中心偏离相应栅格格点。



1. 一种光纤，包括：

具有预定折射率的主介质，和

多个孔，孔具有不同于主介质的折射率，并且沿至少一部分光纤长度设置在主介质区域中，以划分为内部区域和围绕该内部区域的外部区域，其中：

在所述一部分光纤的横截面中可以确定平移对称栅格，外部区域中每个孔的中心与相应栅格格点重合，并且内部区域中多个孔的中心偏离相应栅格格点。

2. 如权利要求 1 所述的光纤，其中该内部区域包括平均折射率高于外部区域平均折射率的芯区域。

3. 如权利要求 1 所述的光纤，其中该外部区域中的折射率分布在横截面中具有二维平移对称性，以支持由布拉格反射所引导的波导模式。

4. 如权利要求 2 所述的光纤，其中该主介质为纯或掺杂石英玻璃，孔被填充具有预定压力的气体。

5. 如权利要求 3 所述的光纤，其中该主介质为纯或掺杂石英玻璃，孔被填充具有预定压力的气体。

6. 如权利要求 4 所述的光纤，其中将至少 1 摩尔% GeO_2 掺入至少一部分主介质中。

7. 如权利要求 1 所述的光纤，其中在横截面中孔的截面积相同。

8. 如权利要求 1 所述的光纤，其中：

该平移对称栅格为六边形栅格，

该内部区域包括三个内部栅格格点，是一边长等于栅格周期的正三角形的三个顶点，并且

与该三个内部栅格格点相应的孔的中心位于该正三角形外接圆外面。

9. 如权利要求 1 所述的光纤，其中：

该平移对称栅格为正方形栅格，

该内部区域包括四个内部栅格格点，为一边长等于栅格周期的正方形的四个顶点，

与该四个内部栅格格点相应的孔的中心位于该正方形外接圆外面。

10. 如权利要求 1 所述的光纤，其中该孔的最小曲率半径大于或等于 $1.2\mu\text{m}$ ，且在 1280nm 到 1800nm 预定波长下的色散小于或等于零。

11. 如权利要求 1 所述的光纤，其中该孔的最小曲率半径大于或等于 $1.7\mu\text{m}$ ，且在 1550nm 的波长下的色散斜率小于或等于零。

12. 如权利要求 1 所述的光纤，其中该孔的最小曲率半径大于或等于 $2.0\mu\text{m}$ ，且在 1550nm 的波长下的有效芯面积小于波长平方的两倍。

13. 一种制造光纤的方法，包括以下步骤：

制造光纤预制棒，该光纤预制棒包括具有第一折射率的主介质，和多个具有第二折射率的孔；并且

将所述预制棒拉成具有一内部部分和一围绕所述内部部分的外部部分的一段长度，其中可确定具有多个栅格格点的平移对称的栅格，外部区域中每个栅格格点与相应一个所述孔的中心重合，并且内部区域中的至少一部分格点偏离相应孔的中心。

14. 如权利要求 13 所述的光纤制造方法，其中在以石英玻璃为主介质制成的光纤预制棒中形成多个孔。

15. 如权利要求 14 所述的光纤制造方法，其中将至少 1 摩尔 % GeO_2 掺入至少一部分主介质中。

16. 如权利要求 13 所述的光纤制造方法，其中该制造步骤包括将预定数量由石英玻璃制成的具有预先确定内径和外径的毛细管，和一个或多个由石英玻璃制成的直径不同于毛细管直径的棒集成束。

17. 一种制造光纤的方法，包括以下步骤：

制造光纤预制棒，该光纤预制棒包括具有第一折射率的主介质，

和多个具有第二折射率的孔，其中可确定具有多个格点的平移对称的栅格，外部区域中每个栅格格点与相应一个所述孔的中心重合，并且内部区域中的每个栅格格点偏离相应孔的中心，所述外部区域围绕所述内部区域；并且

将所述预制棒拉成一段具有与该预制棒中相应区域成比例的主介质区域和孔的光纤，从而保持孔的中心与该平移对称栅格的格点之间的关系。

微结构光纤及制造方法

技术领域

本发明涉及纤维光波导，具体说来，涉及微结构光纤中副介质区域的设置。

背景技术

高折射率的芯区被具有石英和空气混合物的包层围绕的微结构光纤的最新发展，凭借玻璃与空气之间存在的大折射率反差，提供了新的光纤特性。包层结构可具有空间均匀的平均折射率，可对该折射率进行调节，使之符合所需的与芯折射率的关系。图1表示出现有技术微结构光纤横截面。在光纤1b中，在石英玻璃2b中设置有多个孔3b。在该横截面中孔3b的直径基本相同，且孔3b的中心大体上与一六边形栅格中的格点4b重合。对于包层中大体上周期性排列的副介质区域，通过用主介质（例如石英玻璃）替代一或多个副介质，可以得到芯区域。该光纤中心处的格点41b没有相应的孔，从而光纤中心的平均折射率高于周围区域的平均折射率。结果，光波被限制在光纤中心，并在该光纤上传导。

在具有零或负色散、零或负色散斜率，和/或小的有效芯面积的微结构光纤的制造过程中，难以实现高生产率和低传输损耗。为了在微结构光纤中实现这些特性，需要具有小直径，并且尺寸与排列精确控制的空气孔。不过，孔直径的减小可导致光纤拉制过程中孔的表面上表面张力增大。表面张力增大引起孔过度收缩，导致所拉制光纤光学特性的不可控制性增大。虽然通过降低拉制温度可减小表面张力的影响，但是由拉制温度降低而增大的牵引张力，导致拉制过程中光纤断裂的发生率增加，传输损耗增大，且耐UV辐射性降低。

发明内容

通过使光纤最内部区域中的副介质区域偏离周期性栅格的格点而形成芯区域，本发明可满足上述光纤特性要求，同时至少部分地克服了现有技术的缺点。结果，通过其中副介质区域的曲率半径大于现有技术中副介质区域曲率半径的结构，有可能获得颇有价值的特性，如零或负色散，零或负色散斜率，和小的有效芯面积。副介质区域曲率半径的增大，减小了光纤拉制过程中表面张力的影响，导致对光纤结构和光学特性的高可控性、高生产率、低传输损耗和高耐UV辐射性。

定义下面的术语，以帮助说明微结构光纤的特性。

主介质是能单独构成光纤的介质。另一方面，副介质不必能单独构成光纤。例如，玻璃和聚合物可以用作主介质或副介质，而液体、

气体和真空可以用作副介质，但不能用作主介质。

用下式定义由数个介质 i ($i=1\dots M$) 组成的区域的平均折射率：

$$n_{\text{平均}} = \left(\frac{\sum_{i=1}^M n^2[i] f[i]}{\sum_{i=1}^M f[i]} \right)^{1/2}$$

其中 $n[i]$ 和 $f[i]$ 分别为介质 i 的折射率和体积。

格点的栅格单元是以该格点与相邻格点之间的中垂线为轮廓的多边形区域。在孔周期性排列的结构中，相对孔径是孔直径 d 与周期性栅格的栅距 L 的比值。如果结构具有平移对称性，则将该结构平移非零距离的操作保持该结构不变。可以用矢量表示平移操作的方向和距离。当有 N 个表示可保持结构不变的平移操作的独立矢量时，该结构具有 N 维平移对称性。

本发明的第一方面提供了一种光纤，包括：一具有预定折射率的主介质，和多个孔，孔具有不同于主介质的折射率，并且沿至少一部分光纤长度设置的主介质区域中，以划分为内部区域和围绕该内部区域的外部区域，其中：在该光纤部分的横截面中可以确定平移对称栅格，外部区域中每个孔的中心与相应栅格格点重合，并且内部区域中多个孔的中心偏离相应栅格格点。

本发明的第二方面提供了一种制造光纤的方法，包括以下步骤：制造一光纤预制棒，该光纤预制棒包括一具有第一折射率的主介质，和多个具有第二折射率的孔；并且将所述预制棒拉成具有一内部部分和一围绕所述内部部分的外部部分的一段长度，其中可确定一具有多个栅格格点的平移对称的栅格，外部区域中每个栅格格点与相应一个所述孔的中心重合，并且内部区域中的至少一部分格点偏离相应孔的中心。

本发明的第三方面提供了一种制造光纤的方法，包括以下步骤：制造一光纤预制棒，该光纤预制棒包括一具有第一折射率的主介质，和多个具有第二折射率的孔，其中可确定一具有多个格点的平移对称的栅格，外部区域中每个栅格格点与相应一个所述孔的中心重合，并且内部区域中的每个栅格格点偏离相应孔的中心，所述外部区域围绕所述内部区域；并且将所述预制棒拉成一段具有与该预制棒中相应区域成比例的一主介质区域和孔的光纤，从而保持孔的中心与该平移对称栅格的格点之间的关系。

根据本发明的第一方面的光纤，其中该平移对称栅格为六边形栅格，该内部区域包括三个内部栅格格点，是一边长等于栅格周期的正三角形的三个顶点，并且与该三个内部栅格格点相应的孔的中心位于该正三角形外接圆外面。

根据本发明的第一方面的光纤，其中该平移对称栅格为正方形栅格，该内部区域包括四个内部栅格格点，为一边长等于栅格周期的正方形的四个顶点，与该四个内部栅格格点相应的孔的中心位于该正方形外接圆外面。

根据本发明的第一方面的光纤，其中该孔的最小曲率半径大于或等于 $1.2\mu\text{m}$ ，且在 1280nm 到 1800nm 预定波长下的色散小于或等于零。

根据本发明的第一方面的光纤，其中该孔的最小曲率半径大于或等于 $1.7\mu\text{m}$ ，且在 1550nm 的波长下的色散斜率小于或等于零。

根据本发明的第一方面的光纤，其中该孔的最小曲率半径大于或等于 $2.0\mu\text{m}$ ，且在 1550nm 的波长下的有效芯面积小于波长平方的两倍。

根据下面仅通过本发明最佳实施方式说明的详细描述，本发明的优点将是显而易见的。本发明可以有其他不同的实施例，且可在不偏离本发明的条件下，针对多个明显的方面对其数个细节进行修改。因此，附图和说明实际上是说明性而非限定性的。

附图说明

通过但不限于附图中的例子说明本发明，在附图中相同附图标记表示相同元件，其中：

图 1 为垂直于现有技术微结构光纤的光纤轴所取的横截面图。

图 2 为垂直于本发明微结构光纤的光纤轴所取的横截面图。

图 3-5 为表示本发明和现有技术中各个光纤的各种光纤特性的曲线。

图 6 为垂直于本发明第二实施例微结构光纤的光纤轴所取的横截面图。

图 7 表示图 6 所示光纤 1a 的色散和模式场直径 (MFD) 的曲线。

图 8 为垂直于本发明第三实施例微结构光纤的光纤轴所取的横截面图。

图 9-11 为表示与图 8 实施例相应的光纤结构的各种光纤特性与其他光纤结构的对比曲线。

图 12 说明根据本发明制造预制棒的方法。

图 13 说明根据本发明拉制预制棒的方法。

图 14 说明根据本发明拉制预制棒的另一种方法。

图 15 说明根据本发明另一实施例制造的预制棒。

具体实施方式

图 2 表示本发明第一实施例光纤 1 的横截面，其中在作为主介质的石英玻璃 2 中设置有多孔 3，作为副介质区域。该横截面具有内部区域 11 和围绕该内部区域的外部区域 12。孔的排列基本上为六边形栅格。在外部区域中，孔 32 的中心大体上与外部格点 42 重合，外部格点 42 为六边形栅格中的格点 4 的一部分，并处于外部区域中。另一方面，在内部区域中，孔 31 的中心向外偏离内部格点 41 大约为 0.1 栅格周期。内部格点为六边形栅格中的格点 4 的一部分，并处于内部区域中。在横截面中孔 31 与 32 的直径基本相同。对于格点 41 或 42 的每个栅格单元，单个孔 31 或 32 的中心处于该单元内。在描述本发明时，将处于一格点的栅格单元内的孔称为相应于该格点的孔。

此外，外部区域被石英玻璃组成的外套区域 13 围绕。虽然对于

光波在光纤芯中的引导而言，该外套区域并非必不可少的，不过它能提高光纤的机械强度，并减小微弯曲损耗，而微弯曲损耗是引起传输损耗的一个原因。由于上面所述孔的排列，内部区域 11 中孔 31 之间主介质区域 21 的面积，大于外部区域 12 中孔 32 之间主介质区域 22 的面积。结果，内部区域的平均折射率高于外部区域，通过全反射有可能将光波限制在内部区域 11 中的主介质区域 21 内，并在光纤上传导光波。

已经针对本发明的三种结构：ha8，ha7 和 ha6，以及现有技术的三种结构 hb8，hb7 和 hb6，研究了光学特性。下表中给出了这些结构的相对孔径。

表 1

代号	ha6	ha7	ha8	hb6	hb7	hb8
相对孔径	0.6	0.7	0.8	0.6	0.7	0.8

在研究中，孔的直径已经被改变，并且光纤中的其它尺寸也成比例地改变。

图 3-5 表示所列各个光纤的多种光纤特性。图 3 表示以孔的直径为函数，在 1550nm 波长下的色散。如图所示，相对孔径增大导致在其之下可获得零或负色散的孔直径增大。与具有相同相对孔径的现有技术光纤相比，本发明的光纤在其之下可获得零或负色散的孔直径较大。图 4 表示以孔的直径为函数，在 1550nm 波长下的色散斜率。如图所示，相对孔径增大导致在其之下可获得零或负色散斜率的孔直径增大。与具有相同相对孔径的现有技术相比，本发明的光纤在其之下可获得零或负色散斜率的孔直径较大。图 5 表示以孔的直径为函数，在 1550nm 波长下的有效芯面积。如图所示，相对孔径增大导致在其之下可获得小的（小于 $5\mu\text{m}^2$ ）有效芯面积的孔直径增大。与具有相同相对孔径的现有技术相比，本发明的光纤在其之下可获得小的（小于

$5\mu\text{m}^2$) 有效芯面积的孔直径增大。这些曲线说明了本发明光纤存在的优点。

最好将诸如锗或氟的杂质加入内部区域 11 内主介质区域 21 中的主介质中, 并减小其中的粘度。结果, 有可能减小内部区域中主介质区域牵引张力的聚集程度, 所传导的光波限制在其中, 减小剩余张力导致的过量传输损耗。最好将 1-35 摩尔%的锗加入内部区域 11 中主介质区域 21 内的主介质, 通过将光纤曝露在 UV 辐射下沿光纤长度方向改变折射率而形成光纤光栅。结果, 有可能获得波长选择性传输和波长选择性定向耦合器。最好沿光纤长度方向改变横截面结构。结果, 有可能改变沿光纤长度方向的色散, 并形成色散可控的传输线。最好形成一定长度的其中不包含孔的部分。通过在光纤端部形成该部分, 有可能防止污染物进入孔中。最好采用配方玻璃 (compound glass) 或聚合物作为主介质, 或者用具有光放大性的气体或金属填充孔。结果, 有可能增强非线性光学效应的效率, 和/或实现光放大功能。

图 6 表示本发明第二实施例的光纤 1a 的横截面。在这种结构中, 在石英玻璃 2a 中排列有多个孔 3a, 并且将外部区域 12a 中的孔 32a 设置成其中心与相应格点 42a 重合, 格点 42a 为六边形栅格的格点 4a 的一部分, 并处于外部区域中, 从而该排列具有二维平移对称性。可使用其他具有适当折射率的介质来代替孔。由于二维平移对称性, 有可能通过布拉格反射将光波限制在内部区域 11a 中, 并在光纤上传导光波。由于在外部区域 12a 中孔 32a 的排列是周期性的, 故通过布拉格反射, 外部区域 12a 能反射一定频率范围和传播常数的光波。虽然该光波不能在外部区域 12a 中传播, 但是由于内部区域 11a 中的结构周期性已被打破, 故此光波限制并传输于内部区域 11a 中。

Stig E. Barkou 等人在 OFC'99 FG5, J.A.West 等人在 ECOC'01 Th.A.2.2 中描述了被称作通过布拉格反射引导, 或通过光子带隙引导的波导机制。不过, 这些现有技术的公开没有认识到, 有可能通过让孔偏离相应格点而打破结构周期性。结果, 尽管 J.A.West 披露了具有正色散斜率的色散, 不过具有负色散斜率的色散依然不为人知。在本

发明中，通过让孔偏离相应格点而形成光波在其中传导的区域，实现具有负色散斜率的色散。图7表示图6所示光纤1a的色散和模式场直径（MFD）。在本例中，六边形栅格的栅距为 $1.68\mu\text{m}$ ，孔的直径为 $0.84\mu\text{m}$ 。内部区域11a中的孔35a，处于从内部格点41a向外为0.15栅格周期处。内部区域11a中心处的孔31a，处于内部格点41a处。如在该例中，在内部区域中除了形成其中心位于相应格点上的孔以外，最好还形成其中心偏离相应格点的孔。

如图7所示，1540nm到1570nm波长的光波被限制在内部区域11a中，且具有小的模式场直径（MFD）。此外，在该波长范围内，色散斜率为负，这对于补偿正斜率色散的应用而言是有利的。还可将光纤1a用作带通滤波器，因为在有限频率范围内发生布拉格反射，从而能实现依赖于波长的传输。

图8表示本发明第三实施例光纤1c的横截面。在光纤1c中，在石英玻璃2c中排列有多个孔3c。横截面中具有内部区域11c和围绕该内部区域的外部区域12c。在该实施例中，孔的排列基本上为正方形栅格。在外部区域12c中，孔32c的中心处于外部格点42c处，外部格点42c为正方形栅格的格点4c的一部分，且处于外部区域12c中。另一方面，在内部区域11c中，孔31c的中心向外偏离内部格点41c大约0.1栅格周期。内部格点41c是正方向栅格中的格点4c的一部分，并处于内部区域11c中。对于格点41c或42c的每个栅格单元，单个孔31c或32c的中心处于该单元内。此外，外部区域12c被外套区域13c围绕。虽然外套区域13c对于波导而言并非必要，不过它有增加光纤1c机械强度并减小微弯曲损耗的作用，且微弯曲损耗是引起传输损耗的一个原因。

由于上面所述孔的排列，内部区域11c中孔31c之间主介质区域21c的面积，大于外部区域12c中孔32c之间主介质区域22c的面积。结果，内部区域的平均折射率高于外部区域，通过全反射有可能将光波限制在内部区域11c中的主介质区域21c内，并在光纤上传导光波。

比较具有诸如图8所示结构的光纤与孔中心基本上与正方形栅格

中所有格点重合，但在光纤中心处缺少一个孔从而中心处平均折射率高于周围区域平均折射率的微结构光纤的光学特性，进行研究。下表中给出了相对孔径，其中结构 ra8, ra7 和 ra6 代表图 8 中所示本发明的光纤结构；结构 rb8, rb7 和 rb6 代表孔与栅格不偏离。

表 2

代号	ra6	ra7	ra8	rb6	rb7	rb8
相对孔径	0.6	0.7	0.8	0.6	0.7	0.8

在此研究中，孔的直径已被改变，并且光纤中的其它尺寸也成比例地改变。

图 9-11 表示所列各个光纤的各种光纤特性。图 9 表示以孔的直径为函数，在 1550nm 波长下的色散。如图所示，相对孔径增大导致在其之下可获得零或负色散的孔直径增大。与具有相同相对孔径的其它光纤相比，本发明的光纤在其之下可获得零或负色散的孔的直径较大。图 10 表示以孔的直径为函数，在 1550nm 波长下的色散斜率。如图所示，相对孔径增大导致在其之下可获得零或负色散斜率的孔直径增大。与具有相同相对孔径的其它光纤相比，本发明的光纤在其之下可获得零或负色散斜率的孔的直径较大。图 11 表示以孔的直径为函数，在 1550nm 波长下的有效芯面积。如图所示，相对孔径增大导致在其之下可获得小的（小于 5 或 $6\mu\text{m}^2$ ）有效芯面积的孔直径增大。与具有相同相对孔径的其它光纤相比，本发明的光纤在其之下可获得小的（小于 5 或 $6\mu\text{m}^2$ ）有效芯面积的孔的直径增大。这些曲线说明了本发明光纤存在的优点。

可以如图 12 所示制造上述本发明实施例的光纤。首先，通过众所周知的方法，如 VAD 方法、MCVD 方法和 OVD 方法，制造由石英玻璃制成的圆柱形预制棒。用于预制棒的石英玻璃可以没有杂质，或者可以包括诸如锗、氟、氯、硼、铝、磷，稀土元素和过渡金属的掺

杂物。通过适当选择掺杂物的种类和浓度，有可能增强非线性光学效应的效率，或者实现光放大特性。

第二，通过钻孔装置 63 在由抓取装置 62 固定的预制棒 61 中形成多个沿预制棒长度方向延伸的孔 64。使孔的排列与图 2、6 和 8 所示将要制造的光纤中孔的排列相称。最好钻孔装置 63 的末端 65 由包括金刚石颗粒的合金制成，或者由表面具有金刚石颗粒的金属制成。最好通过将超声波施加给钻孔装置 63 而提高钻孔效率。虽然孔 64 可以穿透预制棒，不过也可能在预制棒中间位置处中止孔，从而可以将足够长的原始预制棒留作后续步骤处理。缩短钻孔长度还缩短了钻孔步骤的时间。可以通过围绕孔 64 的轴旋转钻孔装置 63，或者围绕孔 64 的轴旋转预制棒 61，或者同时旋转钻孔装置和预制棒而钻出孔 64。

在钻孔步骤之后，进一步的处理步骤包括拉长预制棒 61，将所拉长的预制棒 61 插入内径稍大于所拉长预制棒 61 外径的玻璃管中，加热并将玻璃管压扁在所拉长的预制棒 61 上。而且，通过汽相沉积可将石英玻璃灰沉积在预制棒 61 的外表面上，并加热和烧结所沉积的灰。通过采用这些步骤，有可能减小孔的直径与整个预制棒直径的比值，等效地形成通过钻孔难以形成的小直径孔。

还可能通过氢氟酸或 SF_6 气体蚀刻孔 64 的内表面。结果，有可能去除表面上或者接近表面的玻璃中的杂质，如羟基和过渡金属，并减小表面粗糙度，产生低传输损耗。

最后，将预制棒 61 拉成光纤，如图 13 所示。用抓取装置（未示出）抓取预制棒 61。预制棒 61 具有孔 64 的端部通过连接装置 71 与压力调节装置 72 相连，从而调节孔 64 中的压力。孔的排列与图 12 中所示预制棒制造步骤或下面图 15 所示孔的排列相同或相当。从另一端，将预制棒以预定速度输送到加热装置 73 中。从加热且软化的预制棒部分拉制光纤 76。用牵引装置（未示出）牵引光纤。可通过控制压力调节装置 72 的压力而控制光纤中孔的直径。

还可能从孔 64 被密封的预制棒 61 拉制光纤，如图 14 所示。结果，易于防止污染物进入孔 64 中。孔的排列与图 12 中所示预制棒制

造步骤或下面给出的图 15 中孔的排列相同或相当。

还可能不如图 12 所示通过钻孔而在预制棒 61 中形成孔 64。图 15 说明使用几种不同材料制造预制棒，以获得光纤。通过将多个石英毛细管 67 围绕石英棒 66 设置成一束，并将该束插入一石英套管 68 中，可形成预制棒 61a。石英棒 66 的直径小于石英毛细管 67 的直径。然后，在图 13 或 14 所示步骤中拉制该预制棒 61a。选择拉制温度，使得表面张力收缩和/或封闭石英毛细管 67 之间的空隙。由于在石英棒 66 存在之处，间隙收缩时软化玻璃的流量很小，故孔之间的距离大于截面中其他位置处。结果，可以得到横截面与实施例 1 相似的光纤。

图 15 的预制棒制造方法适于使用几种不同材料制造光纤。例如，通过使用具有大于 10% 锗的石英作为石英棒 66 的材料，能增强非线性光学效应的效率。并且，通过采用掺有稀土元素的石英棒 66，能获得具有光放大性的光纤。

虽然结合目前认为最为实用和最佳的实施例对本发明进行了描述，不过本发明不限于所公开的实施例，相反，意欲包括所附权利要求精神和范围内所包括的多种变型和等效排列。

图1
现有技术

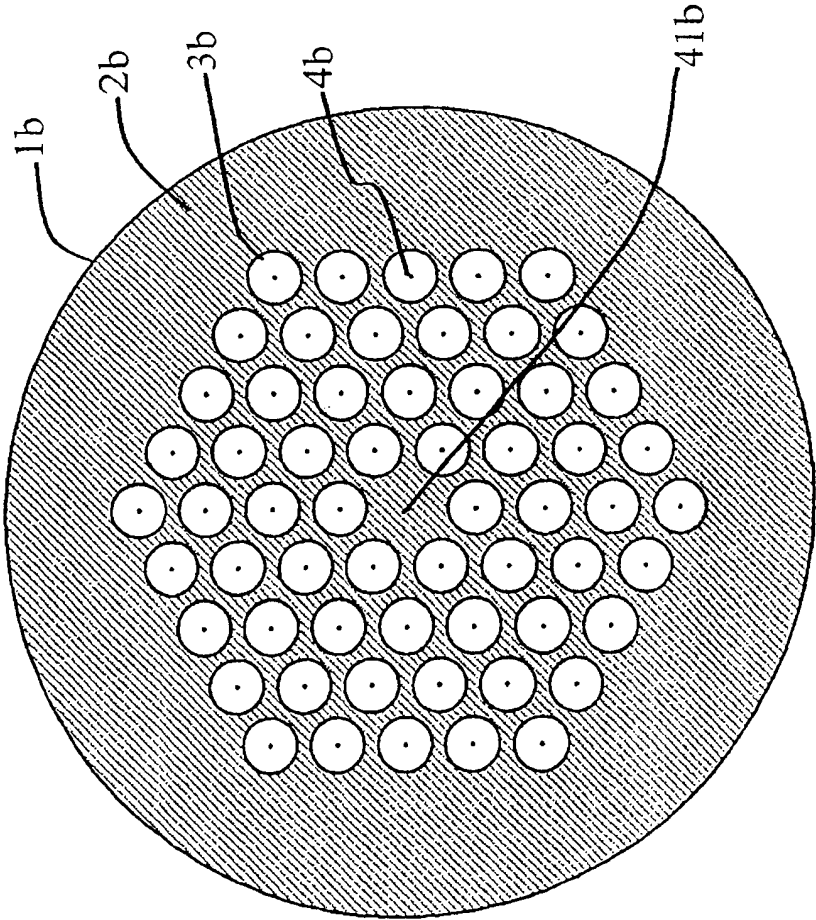


图2

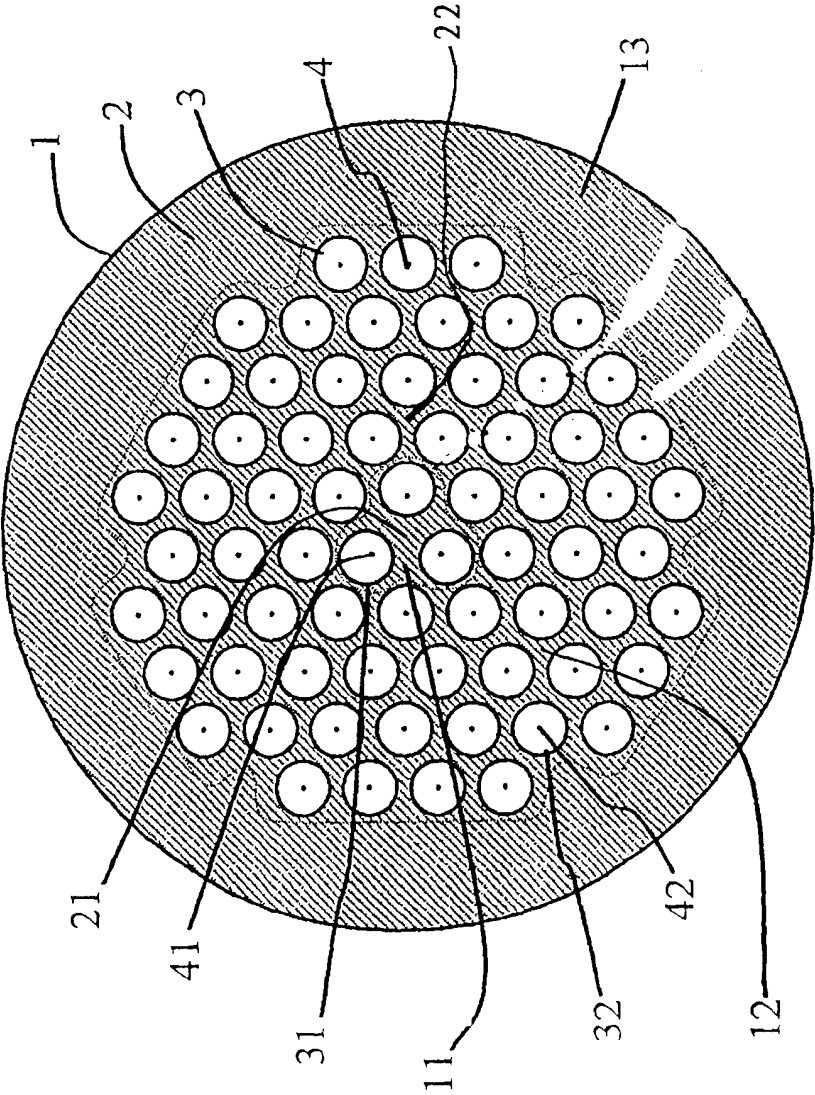


图 3

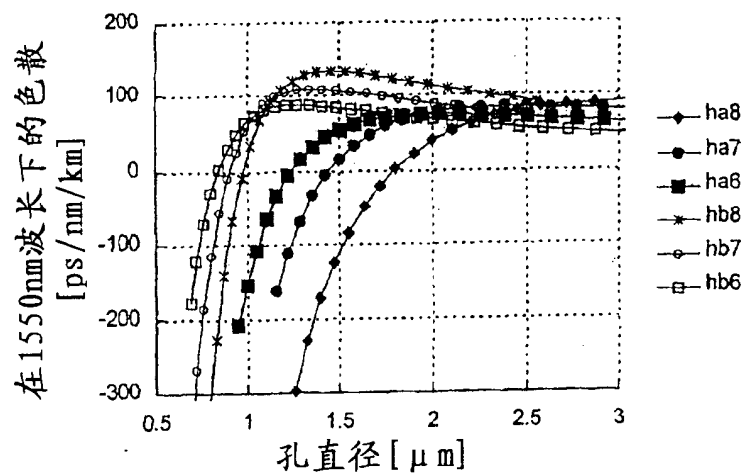


图 4

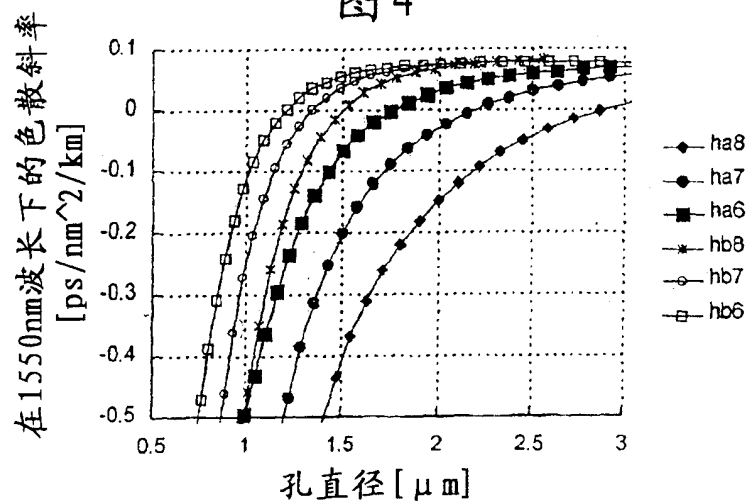


图 5

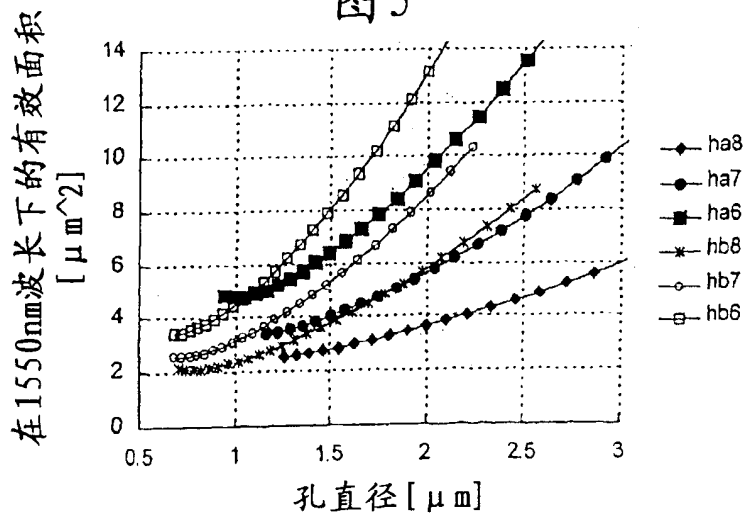


图6

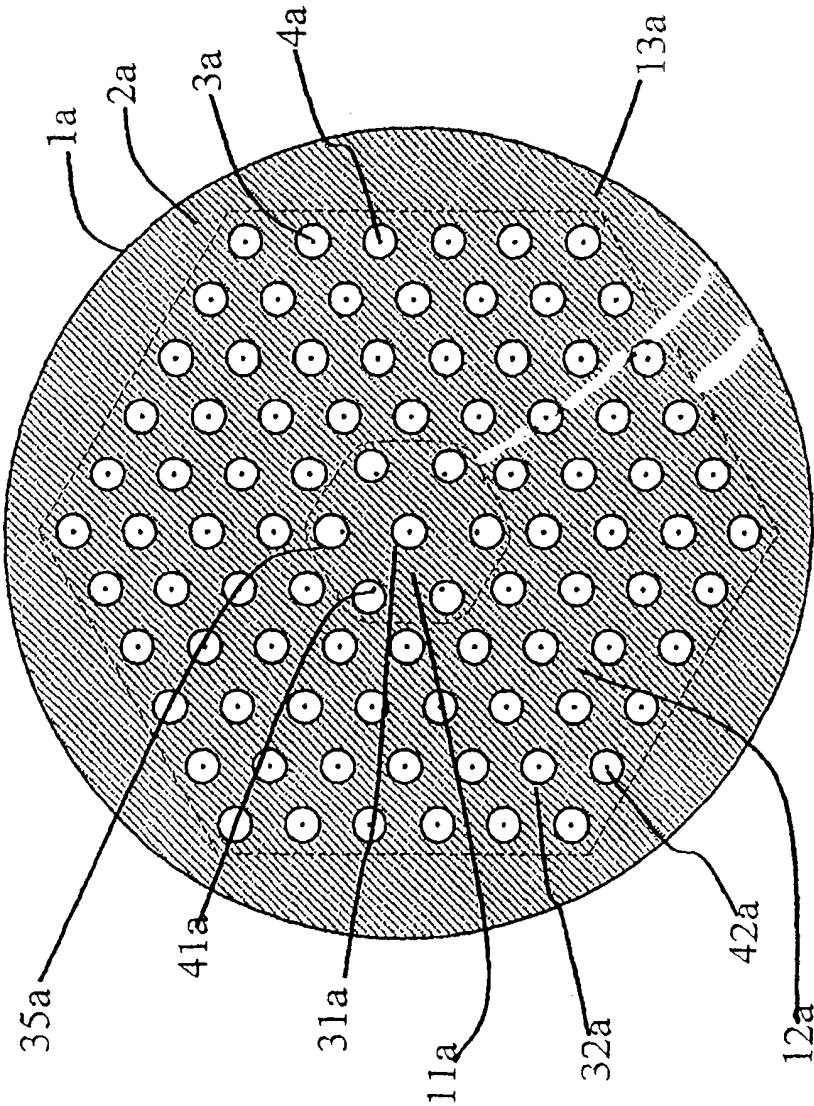


图7

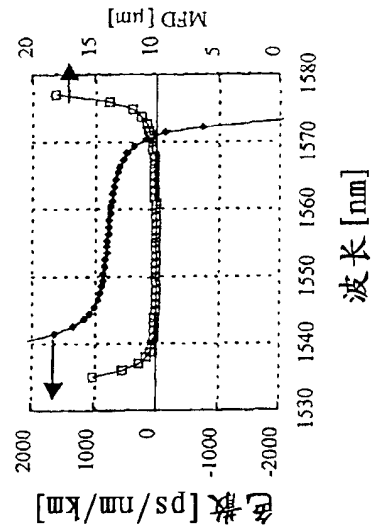


图 8

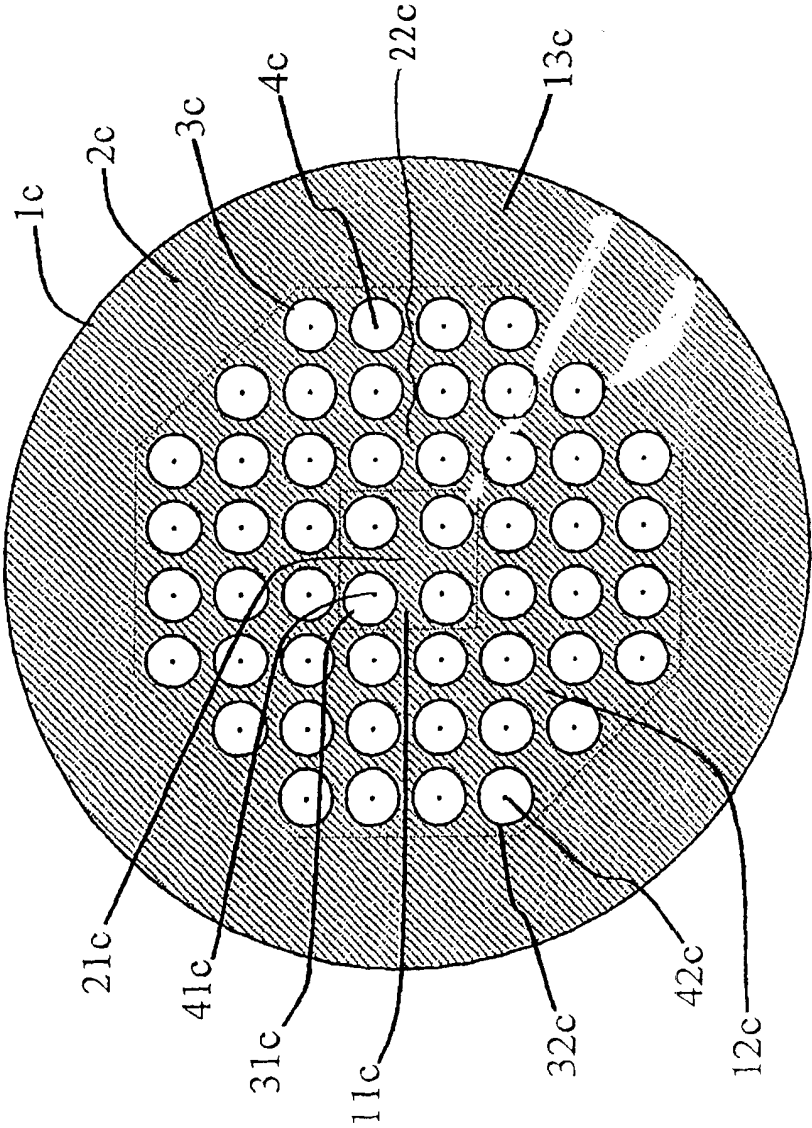


图9

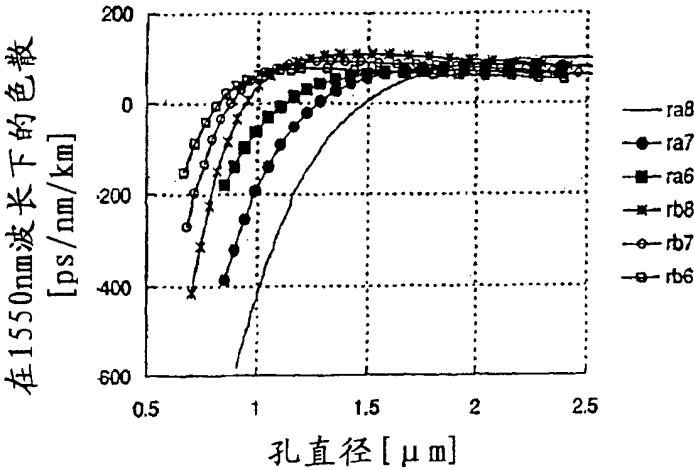


图10

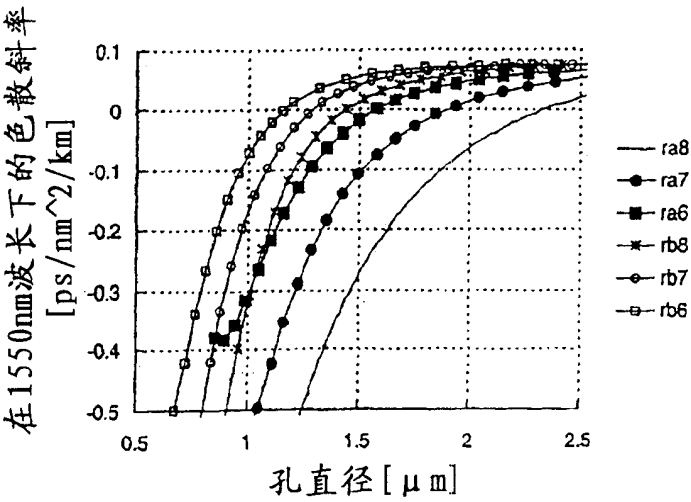


图11

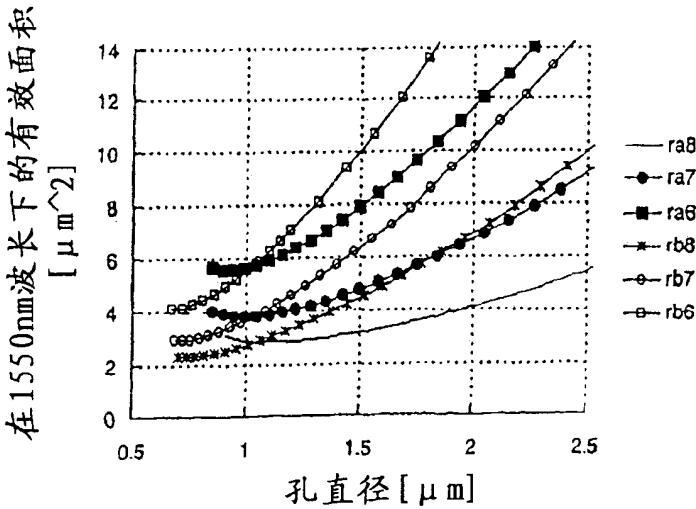


图 12

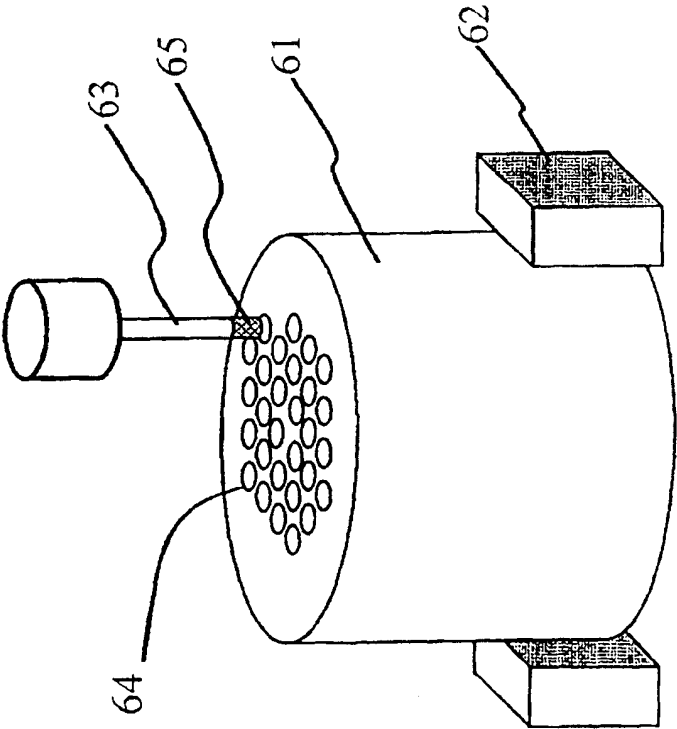


图13

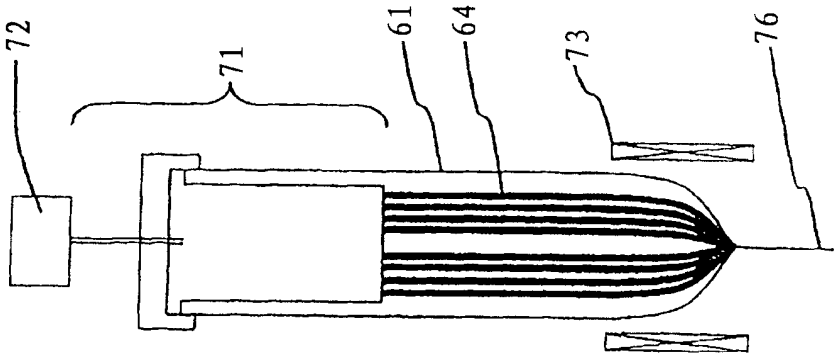


图14

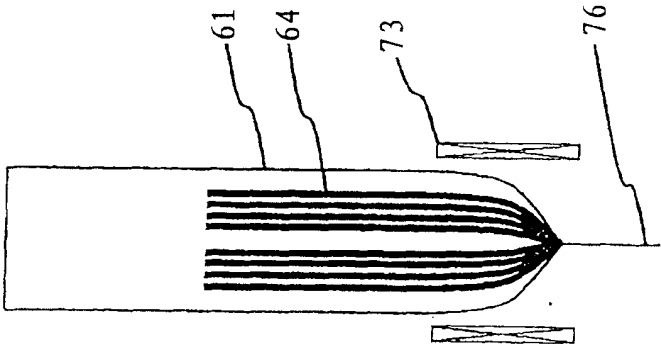


图15

