[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 02160412.6

[51] Int. Cl[7]
G02B 6/26
G02B 6/24
G02B 6/16
C03B 37/027
C03B 37/075
H01S 3/00

[45] 授权公告日 2005 年 9 月 14 日

[11] 授权公告号 CN 1219228C

[22] 申请日 2002.12.30 [21] 申请号 02160412.6

[30] 优先权

[32] 2002. 1. 3 [33] FR [31] 0200045

[71] 专利权人 阿尔卡塔尔公司

地址 法国巴黎

[72] 发明人 多米尼克·拜亚特

劳伦特·博斯洛特

审查员 卫 军

[74] 专利代理机构 北京市金杜律师事务所

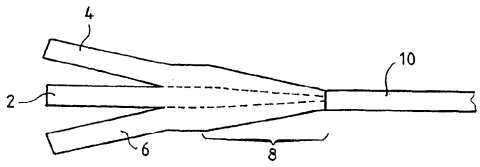
代理人 酆 迅

权利要求书 2 页 说明书 10 页 附图 1 页

[54] 发明名称 用于多模泵的光耦合器

[57] 摘要

本发明涉及一种光耦合器，它由一个通过熔化拉制法与至少一个多模光学纤维(4，6)组装在一起的光子光学纤维(2)。 光子光学纤维可以用于注入和取出信号，而多模光学纤维可以用于注入泵的光。 本发明主要能够有效地将多模泵耦接到由双包层纤维构成的激光腔中；在这种情况下，光学纤维不用于注入信号，而是确保使耦合器具有适用于该激光腔的数值孔径和直径。 本发明还可以将一个或多个多模泵耦接双包层纤维中；在这种情况下，对于通过光子光学纤维传送的信号来讲，本发明可以使耦合器中的模式直径保持高于或等于该耦合器入口和出口处的模式直径。



ISSN1008-4274

1.一种光耦合器（16），它包括:

——一个具有拉制部分的光子光学纤维（2);

—至少一个与该光子光学纤维相连的多模光学纤维（4，6）。

2.根据权利要求1所述的耦合器，其特征在于所述光子光学纤维在具有多个多模光学纤维的组装件的中央。

3.根据权利要求1或2所述的耦合器，其特征在于利用熔化拉制法将所述光学纤维与一个或多个多模光学纤维组装在一起。

4.根据权利要求1或2所述的耦合器，其特征在于该光子光学纤维在被拉制部分的外面与一个或多个多模光学纤维组装在一起。

5.根据权利要求1或2所述的耦合器，其特征在于光子光学纤维是放大纤维。

6.根据权利要求1或2所述的耦合器，其特征在于光子光学纤维是多模光学纤维。

7.根据权利要求6所述的耦合器，其特征在于处于非拉制状态的光子光学纤维具有多模芯的直径，该芯的直径大于或等于100微米。

8.根据权利要求1或2所述的耦合器，其特征在于光子光学纤维是双包层纤维。

9.根据权利要求8所述的耦合器，其特征在于处于非拉制状态的光子光学纤维具有多模芯的直径，该芯的直径大于或等于100微米。

10.根据权利要求8所述的耦合器，其特征在于处于非拉制状态的光子光学纤维具有大于或等于15微米的单模芯的模

式直径。

11.根据权利要求 8 所述的耦合器，其特征在于光子光学纤维在与拉制部分相对的端部具有第二拉制部分。

12.一种光纤激光器，它包括:

——一个根据权利要求 6 或 7 的耦合器;

——一个由一个与耦合器的光子光学纤维的拉制端连接的光纤形成的激光腔;

—至少一个与耦合器的多模光纤的入口相连的多模泵。

13.根据权利要求 12 所述的激光器，其特征在于光子光学纤维的多模芯的直径和激光腔的多模芯的直径之间的差小于或等于 5%。

14.一种光放大器，它包括:

——一个根据权利要求 8-11 之一的耦合器，作为第一耦合器;

——一个与耦合器的拉制端相连的多包层放大光纤。

15.根据权利要求 14 所述的放大器，其特征在于多包层光纤的单模芯的模式直径和光子光学纤维的单模芯的模式直径之间的差小于或等于 5%。

16.根据权利要求 14 或 15 所述的放大器，其特征在于使多包层光纤的多模芯的直径和光子光学纤维的多模芯的直径之间的差小于或等于 5%。

17.根据权利要求 14 或 15 所述的放大器，其特征在于该放大器有一个权利要求 8-11 之一所述的耦合器，作为第二耦合器，与第一耦合器相对的多包层式光纤的端部连接到第二耦合器的拉制端。

用于多模泵的光耦合器

技术领域

本发明涉及利用光学纤维进行传送的领域，具体地说，涉及一种用于多模泵的耦合器。

背景技术

目前出现的称作“光子”纤维在英语中也叫做“photonic crystal fibre”（PCF），这些纤维不像传统纤维那样完全是用一种象掺杂硅的透明固体材料制成；从断面来看，一个光子光学纤维具有多个气孔。这些孔平行于纤维的轴，并在纵向沿纤维延伸。实际上，通过将几个毛细管或硅管组装在一起，并按照在纤维中应得到的孔的形式做成预定的形状，这样就可以得到这些孔。经过这种预定形状的拉制所得到的纤维具有对应于毛细管的孔。

在纤维材料中具有这些孔以后就使材料的平均指数发生变化；这些指数变化就像传统光纤一样用于引导具有合适波长的光信号。这种光子光学纤维在 WO-A-0049435 中作了描述：除了光子光学纤维的工作原理以外，该文献还描述了一种定向耦合器或分光器。通过对两根光子光学纤维加热拉制形成该耦合器；在加热或在以后的加热步骤中，焊接这两根耦合器的拉制区域。这样，在其中一根纤维中传播的光就耦合到另一根纤维中。该文献还提出将一根光子光学纤维与一根传统纤维组装在一起；也就是说，没有孔的纤维；对光子光学纤维进行拉制，并在拉制区域中对其进行切割。光子光学纤维的拉制又关闭了纤维的孔，从而在切割附近不再有孔。传统纤维－根据附图是一根指数突变的纤维－也被拉制和切割，从而使其尺寸与拉制的光子光学纤维的尺寸相同。这两种纤维头尾结合。模式直径在锥形拉制区域中的整个纤维上延伸；在光子光学纤维或传统纤维的未经拉制的部分中，光

按常规方式传播。最后，该文献介绍的多芯光子光学纤维的局部拉制可以得到一个局部定向的耦合器；因为纤维拉制以后会使部分孔关闭，使不同芯的光相互之间出现干扰。

EP-A-1043816 描述了一种双包层纤维；将信号传送到纤维的掺杂芯中，将泵注入第一个包层（gaine）中。为了将泵的光引向掺杂纤维，该文献建议在第一包层中配备指数变化的区域。指数变化的这些区域主要可以由气孔构成。但在该文献中没有介绍任何将泵连接到纤维包层中的方法。

EP-A-893862 描述了一种纤维束，它包括注入泵的 6 根多模纤维，围绕信号的单模纤维。为了将 6 根注入纤维和单模纤维的直径减小到双包层纤维芯的尺寸，利用熔化和拉制方法组装这些纤维。所述注入纤维是多模纤维，它们的数值孔径小于双包层抽吸纤维的数值孔径。单模纤维是指数突变纤维，它用于将需放大的信号注入到双包层纤维中，或从该纤维中提取信号。单模纤维中的模式直径先是随芯的直径减小的函数，然后是随芯的直径变大的函数；因而对于单模纤维来讲，可以在熔化和拉制以后选择芯的直径，这可以在单模纤维的入口和出口确保具有相同的模式直径。

这种方案限制了系统设计的自由度：因为这些芯的直径要连接到耦合器的两个端部。这就会使制造更加复杂。此外，该方案表明，当通过单模纤维的拉制部分时，模式直径先减少，然后增加，这样就会出现问题。最后，对于大数值的芯的直径来讲，不需要保证纤维的单模特性。

发明内容

根据这种教训，本发明需要解决的技术问题在于简化这种耦合器的制造，并沿着信号的传送信道，简化对耦合器的光特性的管理。

更确切地说，本发明提出一种光耦合器，它包括：

- 一个具有拉制部分的光子光学纤维；
- 至少一个与该光子光学纤维相连的多模光学纤维。

在一个实施方案中，光子光学纤维在具有多个多模光学纤维的组装件的中央。利用熔化拉制法可以将光子光学纤维与一个或多个多模光学纤维组装在一起，该光子光学纤维也可以在拉制部分的外面与一个或多个多模光学纤维组装在一起。

光子光学纤维也可以是放大纤维。在一个实施方案中，光子光学纤维是多模光学纤维；因而其好处在于非拉制状态的光子光学纤维具有多模芯的直径，该芯的直径大于或等于 100 微米。在另一个实施方案中，光子光学纤维最好是双包层纤维。此时，处于非拉制状态的光子光学纤维具有多模芯的直径，该芯的直径大于或等于 100 微米，和/或具有大于或等于 15 微米的单模芯的模式直径。

光子光学纤维也可以在与拉制部分相对的端部具有第二拉制部分。

本发明还提出一种光纤激光器，它包括:

- 一个具有一个多模光子光学纤维的耦合器;
- 一个由一个与耦合器的光子光学纤维的拉制端连接的光纤形成的激光腔;
- 至少一个与耦合器的多模光纤的入口相连的多模泵。

光子光学纤维的多模芯的直径和激光腔的多模芯的直径之间的差最好小于或等于 5%。

本发明还提出一种光纤放大器，它包括:

- 一个具有一个双包层光子光学纤维的耦合器;
- 一个与耦合器的拉制端相连的多包层扩大光纤。

在这种情况下，多包层式光纤的单模芯的模式直径和光子光学纤维的单模芯的模式直径之间的差最好小于或等于 5%；也可以使多包层式光纤的多模芯直径和光子光学纤维的多模芯直径之间的差小于或等于 5%。

在一个实施方案中，该放大器有一个同样形式的第二耦合器，与第一耦合器相对的多包层式光纤的端部连接到该第二耦合器的拉制端。

附图说明

通过阅读下面结合附图对作为本发明例子的实施方案的描述后，将会更加清楚地理解本发明的其他特征和优点，这些附图是:

图 1 是根据本发明第一实施方案的光耦合器的示意图;

图 2 是根据本发明另一实施方案的光耦合器的示意图;

图 3 和 4 的曲线表示图 2 的耦合器中的单模芯的模式直径和多模芯的直径。

具体实施方式

为了制成光耦合器，本发明将一个光子光学纤维与至少一个多模光学纤维组装在一起。光子光学纤维可以是多模光学纤维或双包层光学纤维。在第一实施方案中，光子光学纤维是多模纤维；在这种情况下，耦合器特别适用于将多模泵注入到例如由双包层纤维形成的激光腔中。在该第一种实施方案中，光子光学纤维不用来注入信号，但用数值孔径和直径的话来讲，它保证使耦合器很好地适用到激光腔上。

在第二种实施方案中，光子光学纤维是双包层纤维；因此耦合器主要适于用作多路转换器，例如用来将信号和多模泵注入一个双包层掺杂扩大纤维中。所以光子光学纤维的单模芯用来注入要放大的信号（或提取已放大的信号），而光子光学纤维的多模芯用来注入多模泵。

如任一种情况下，可以通过熔化和拉制制造耦合器，也可以通过切割纤维和拉制来制造耦合器。锥形拉制部分就与 EP-A-893862 中的一样，它对应于耦合器各纤维的组装部位；这种实施方式是图 1 所示的方式。一方面也可以使多模纤维的切割与光子光学纤维的切割分开，另一方面对纤维进行拉制；在这种情况下，仅仅拉制光子光学纤维；这种实施方式示于图 2 中。

如上所述，通过光子光学纤维发现有一种纤维不像传统纤维那样完全由一种透明固体材料构成，例如掺杂硅；从断面来看，这种光子光学纤维具有多个气孔－或其他气体的孔，也可以是真空的孔。这些

孔与纤维的轴平行，并在纵向沿纤维延伸。就如本申请人在01年3月16日提出的申请号为0103639、名称为“Fibre optique photonique a forte sueface effective”的申请中所描述的那样，这些孔的作用是为了在纤维中引起局部指数变化；与纤维中用掺杂引起的变化一样，这些变化参与将光引入纤维中。

图1是根据本发明第一实施方案的光耦合器的示意图，在这种实施方案中，光子光学纤维适于接入多模泵的输出纤维10中。光子光学纤维为多模，也就是说它能够按照多种模式传送光；它可以有单模芯，也可以没有。耦合器用多模光子光学纤维2形成，将该光子光学纤维组装到至少一个多模光学纤维中；在图示的实施例中，我们示出了两个多模光学纤维4和6。可以只用一个多模光学纤维；反之，与EP-A-893862中的一样，可以用6个分布在光子光学纤维周围的多模光学纤维。根据光线的特性、有待耦合的光的性能以及所考虑的用途选择多模光学纤维的数量。

通过溶解法将光子光学纤维2和多模光学纤维组装在一起，然后进行拉制形成锥形部分8；在组装件中，光子光学纤维留在中心。这种组装模式对应于EP-A-0893962中提出的模式。另外还提出采用WO-A-9510868、WO-A-9510869或WO-A-9620519介绍的侧部耦接技术将多模光学纤维连接到光子光学纤维上，以便使注入多模光学纤维中的光耦合到光子光学纤维中。锥形部分与内接有纤维的部分不同；在这种情况下，锥形部分只对应于光子光学纤维直径的减少，如果出现这种情况，就会使纤维的孔消失。

在任何情况下，形成锥形都可对拉制成多模芯的直径的组装件进行切割，该芯的直径与接有耦合器的纤维10的多模芯的直径对应；各多模芯的直径之间的差最好小于5%。该纤维10例如是用作激光腔的双包层纤维。在此，通过公知的双包层纤维得知一种纤维，它有一个根据单一模式保证光传播的第一芯，以及一个根据不同模式保证光传播的第二芯；因而该纤维可以将一个信号或单模光引入单模芯中，同时也将泵的光引入多模芯中。单模芯的模式直径通常约为5微米，多

模芯的直径通常约为 200 微米。例如通过用两种方法选择指数剖面就可以得到这种纤维：第一种方法或指数突变法保证限制单模光，而第二种方法保证限制多模光。

光子光学纤维的拉制-必要时与多模光学纤维连接-可以在耦合器的出口使用多模芯的直径和数值孔径。光子光学纤维在开始时具有较大的多模芯的直径和较大的数值孔径；这样，即使在拉制纤维和相应的直径减少时会使多模芯的直径和数值孔径减少，但这种使用仍然可行。利用光子光学纤维可以与耦合器出口的纤维 10 保持良好的耦接。光子光学纤维的多模芯的直径和形成激光腔的纤维的直径之间的差最好小于 5%。用公知方法通过与耦合器相对的激光腔的端部提取激光信号；而通过与耦合器相连的激光腔的端部注入信号。也可以在激光腔中设置耦合器，不管怎样，耦合器的光子光学纤维均属于激光腔的一部分；在这种情况下，最好也能使光子光学纤维掺杂。

例如，在激光腔外的耦合器的情况下，对于形成激光腔的纤维来讲，可以使用双包层纤维，它的多模芯径为 200 微米，其数值孔径为 0.45。作为光子光学纤维，可以使用上面法国专利申请提到的那种，这是多模纤维，不一定要有单模芯；这种纤维在拉制以前的芯的直径约为 600 微米，数值孔径为 0.16。该纤维拉制以后的芯的直径达到 200 微米，数值孔径达到 0.45。

在耦合器设置在激光腔中的情况下，可以将相同的纤维用作激光腔；也可以使用相同的纤维作为光子光学纤维，还可以使用法国专利申请提到的那种掺杂纤维，该申请是本申请人在 01 年 3 月 16 日提出的申请号为 0103640、名称为“Fibre optique photonique a double gaine”的申请。因而，在耦合器的另一端设置一个变细部分或锥形第二部分，以便使该端与激光腔相连。

在多模泵的激光腔内用作泵送的耦合器的例子中，使用光子光学纤维可以提高设计系统的自由度，特别是在选择模式直径和数值孔径时更是如此。

图 2 是本发明的另一个实施方式。在该实施方式中，耦合器用作

多路转换器，光子光学纤维用来注入信号。所以最好使光子光学纤维为双包层纤维；单模芯用来注入信号（或提取信号），而多模光通过组装在光子光学纤维的多模芯内的纤维耦合。在该实施方式中使用光子光学纤维的好处如下。在拉制以前，光子光学纤维对于单模芯具有很大的模式直径，它可以达到约 30 微米，多模芯的直径可以达到 400 微米或更大；在拉制纤维以后，为了使多模芯的直径达到 100 微米，则按相同比例使单模芯的直径减少到 7 微米。数值孔径成反比增加，因而在锥形部分的出口可以达到 0.3－0.6。

已被拉制的纤维的单模芯的模式直径与设置在本发明耦合器出口处的纤维的模式直径基本相同；两者之间的差最好小于 5%。因此本发明可以在耦合器的出口很好地适用于单模信号。这种特性与纤维中存在孔有关，不管该芯的尺寸有多大，这些孔均有助于将单模光限制在单模芯中。

此外，在拉制以前，光子光学纤维也有大尺寸的多模芯；在拉制以后，多模芯的直径与耦合器出口处的纤维的直径相当。各多模芯之间的直径差最好也小于 5%。

图 2 所示的耦合器类似于图 1 的耦合器；但是，要与光子光学纤维的锥形部分 12 相隔一定的距离将各纤维组装到图 2 的耦合器中；另外，将光子光学纤维用来注入信号，因而在与耦合器入口对应的端部有一个拉制部分 14；拉制可以使光子光学纤维的单模芯的模式直径减少，从而使其与纤维 16 的模式直径相适应，该纤维 16 与耦合器的用于注入信号的入口相连。在 SMF 纤维的例子中，模式直径可以约为 10 微米；对于光子光学纤维的单模芯的模式直径来讲，通过减少光子光学纤维的外径就能达到该值；在这种情况下，我们知道，为了注入信号，光子光学纤维的多模芯的直径没有影响。

就像用在耦合器的出口处一样，光子光学纤维可以用在耦合器的入口；光子光学纤维在其整个长度上也有单模芯，即使在未被拉制的部分也是如此。

现在我们给出一些由图 2 所示的那种耦合器构成的放大器的例

子。在第一个例子中，使光子光学纤维掺杂，该光子光学纤维确保放大作用。因而可以将耦合器的各个端部与芯的直径约为10微米的SMF纤维连接。将0103640申请中所描述的那种纤维用作光子光学纤维。如有必要，就增加光子光学纤维的长度。该纤维在拉制前的多模芯的直径为500微米，在拉制以后的多模芯的直径为125微米－它没有影响；单模芯的直径从40微米到10微米，这就确保了SMF纤维的使用。可以使用4个芯的直径为100微米的多模纤维，这些将各泵耦接到光子光学纤维中。

在第二个例子中，多路转换器不同于放大纤维；在这种情况下，可以使用0103639申请中的光子光学纤维，这种纤维不需要掺杂。光子光学纤维的多模芯的直径为400微米，而其单模芯的直径为30微米。在入口处，对光子光学纤维进行拉制，以便使其单模芯的直径约为10微米，这就象提供信号的SMF纤维一样。在出口处，对光子光学纤维进行拉制，以便使其单模芯的直径约为7微米；多模芯的直径达到100微米；数值孔径从0.15到0.6。因而该耦合器在出口处用作具有这些芯的直径值和数值孔径值的放大纤维。我们可以使用与上面的例子相同的泵。

在第三个例子中，我们使用与第二个例子相同种类的光子光学纤维，但多模芯的直径为100微米，单模芯的模式直径为14或15微米，数值孔径为0.15；我们用两个泵，每个泵的多模芯的直径为50微米，数值孔径为0.15。在出口处，对光子光学纤维进行拉制，以便使其单模芯的直径约为7微米；多模芯的直径达到50微米；数值孔径从0.15到0.22。相对于第二个例子来讲，该例子的好处在于：可以使用多于一个的泵，同时在出口具有较小的数值孔径。放大纤维可以是没有涂覆聚合物的指数较小的纤维（这是一种可以增加数值孔径，但机械性能逐渐减弱的纤维）。

通常，我们可以根据多模纤维的数量用下面的关系来确定入口和出口的直径。将d_1和d_2记作入口和出口的多模芯的直径，NA_1和NA_2记作入口和出口的数值孔径，n记作多模纤维的数量。此处将“入口”

称做与多模纤维耦接以前的光子光学纤维的特性，“出口”是与多模纤维耦接以后该光子光学纤维的特性。这样就有:

$$(d_2 . NA_2 / d_1 . NA_1)^2 = n$$

在入口和出口的多模芯的直径相同的 8 个纤维的例子中，该式表示入口处的数值孔径达到 0.12，出口处的数值孔径达到 0.34。

使用光子光学纤维可以沿拉制部分将传播特性保持在至少与耦合器入口和出口处的传播特性一样出色；从质量上来看，拉制光子光学纤维会使纤维中的孔径位似减小，即孔完全消失。如果在开始时光子光学纤维的模式直径很大，则耦合器中的模式直径在锥形区减小，但仍要比耦合器的出口处的模式直径大。

为此，可以参照欧洲文献 EP-A-0893862 的图 4；该图示出模式直径先随拉制纤维的芯的直径减少然后随其增大。该文献建议选择拉制是为了使拉制出的纤维的模式直径等于纤维拉制以前的模式直径。这就相当于模式直径图上的的轮廓线，该线是水平线上的芯的直径的函数，以两个点切割该曲线。反之，本发明建议选择光子光学纤维，在非拉制状态时，光子光学纤维的模式直径应是这样的：可以在耦合器中将其留在函数增大的部分中，它将模式直径与芯的直径相关。这样，在锥形部分中，模式直径减小，并在耦合器的出口点处，达到最小值；但是，在整个耦合器中，它仍然大于该值。此外，光子光学纤维的整个长度上有一个单模芯。

最好选择光子光学纤维，使多模芯的直径在拉制以前至少为 100 微米。该值确保拉制会使多模芯的直径的值与连接到耦合器的纤维相当。如果光子光学纤维是双包层纤维，最好也使它的单模芯的直径至少为 15 微米；这就确保拉制会使单模芯的直径与连接到耦合器的纤维相当。

图 3 和 4 分别表示图 2 所示的第二个例子中的单模芯的模式直径和多模芯的模式直径的曲线。横坐标为沿耦合器的距离，用 mm 表示，纵坐标为多模芯的模式直径或多模芯的直径，用微米表示。横坐标的 0 表示光子光学纤维的开始，换句话说，对应于图 2 的纤维 16 的耦合

点。纤维在此的单模芯的模式直径为 10 微米，这与现有技术中的指数突变纤维的芯的直径对应。多模芯的直径约为 130 微米。变细部分或锥形部分 14 在横坐标上的 0 和横坐标上的 x1 之间延伸；其值可以约为 2m。在该横坐标上，光子光学纤维-未被拉制-具有约 30 微米的单模芯的模式直径，400 微米的多模芯的直径。在横坐标 x1 和 x2 之间，光子光学纤维的直径不变；该部分与图 2 中的光子光学纤维的多模纤维的耦合部位对应；长度 x2－x1 是多模纤维侧部耦合所需要的长度，该长度可以约为 2－3m；在将光子光学纤维用作放大纤维的例子中，该长度会更长。变细部分或锥形部分 12 在横坐标 x2 和横坐标 x3 之间延伸的长度为 2m 。出口处的单模芯的模式直径约为 7 微米，多模芯的直径约为 100 微米：这些数值对应于传统双包层纤维的数值。

图 3 和 4 表明，在耦合器的整个长度上，光子光学纤维的模式直径大于或等于 7 微米。具体地说，在第一变细部分 14 中，横坐标 0 和 x1 之间的模式直径增大。在纤维未变细的部分中，横坐标 x1 和 x2 之间的模式直径达到 100 微米。然后，在耦合器的部分 12 中，模式直径减小。在耦合器的整个长度上，纤维为传送信号保持单模。作为比较，在文献 EP-A-0893862 的装置中，耦合器外的模式直径的标称值为 10 微米，但在耦合器中减少到 7.5 微米。

上面用优选实施方案对本发明进行了描述；本发明可以作很多变换；可以改变限定光子光学纤维或多模光学纤维的参数。也可以将纤维泵而不是多模光学纤维用来注入光。耦合器可以用于除上述放大器或激光器以外的应用，在放大器的例子中，我们描述了双包层纤维放大光纤；也可以用多包层光纤，或本申请人在法国专利申请 0103640 中介绍的那种光子光学纤维。在这些例子中，我们考虑的是单向系统；但也可以是双向系统。可以对称地进行安装，耦合器在激光腔或放大纤维的各端注入信号。也可以进行顺序安装，耦合器按同一方向将泵注入形成激光腔或放大纤维的纤维的逐个截面中。

图1

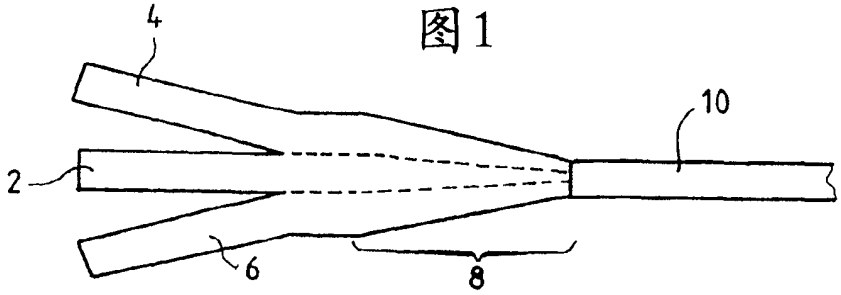

4
10
2
6
8

图2

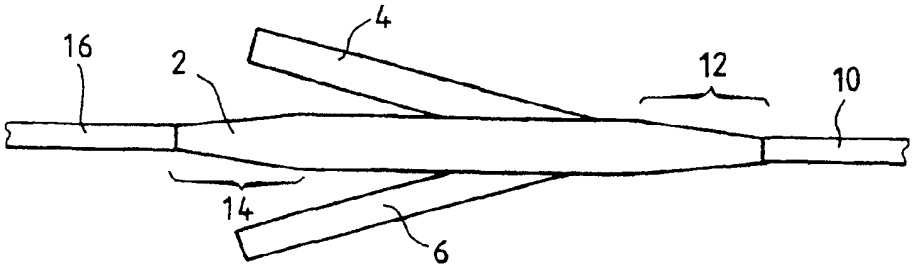

16
2
4
12
10
14
6

图3

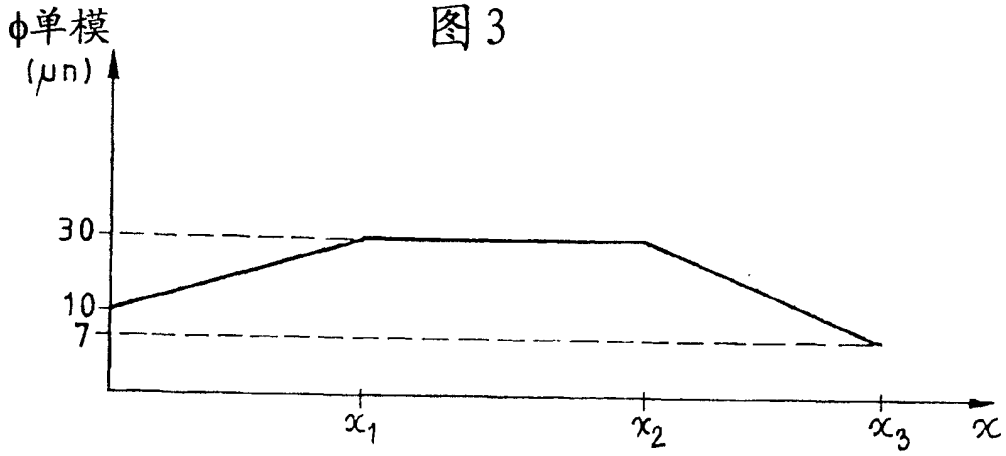
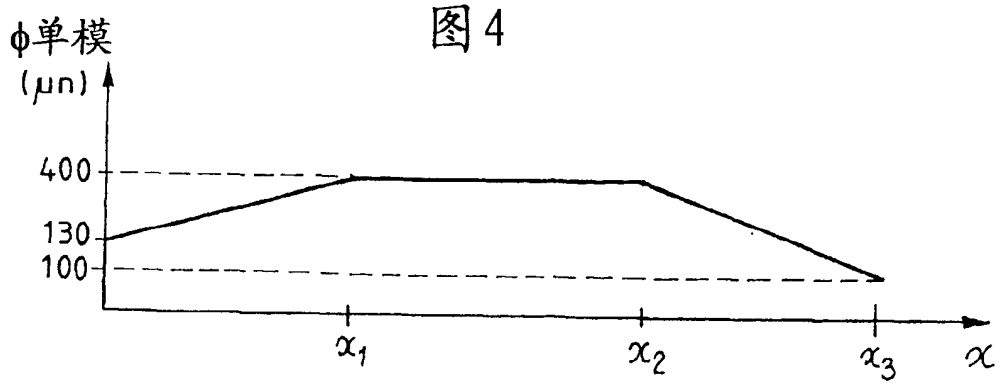

ϕ单模
(μn)
30
10
7
x_1
x_2
x_3
x

图4


ϕ单模
(μn)
400
130
100
x_1
x_2
x_3
x