[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl[7]
H04J 14/02

[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 00102282.2

[45] 授权公告日 2004 年 6 月 16 日

[11] 授权公告号 CN 1154281C

[22] 申请日 2000.2.18 [21] 申请号 00102282.2

[30] 优先权

[32] 1999.2.19 [33] US [31] 09/255454

[71] 专利权人 卢森特技术有限公司

地址 美国新泽西州

[72] 发明人 A·R·克拉普里弗

B·R·艾肯鲍姆 G·P·埃默里

J·B·哈伯 D·卡利斯

R·B·库默

审查员 冯晓明

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

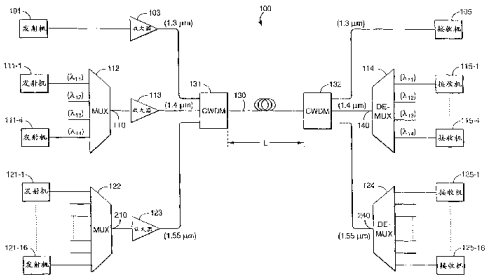
代理人 梁 永 张志醒

权利要求书 1 页 说明书 11 页 附图 5 页

[54] 发明名称 工作在 1.4μm范围的高容量光纤网络

[57] 摘要

高容量光纤网络包括 1.4 微米波长范围内的波分复用。该系统包括在 1.4μm范围内的峰值损耗低于 1310nm 的损耗的光纤。光纤在大约 1310nm 具有零色散波长，线性色散在 1.4μm范围内为 1.5 至 8.0ps/nm－km。至少有三个 WDM 通道在 1.4μm波长范围内工作在 10Gb/s，其通道间隔为 100GHz。在本发明的一个示例性实施方案中，具有幅度调制的残留边带调制的广播电视通道同时工作在 1.3μm范围和/或 1.55μm范围。



ISSN1008-4274

1. 波分复用系统（100），包括：

第一多路调制器（112），将多个数字信息通道接入传输路径；

连接到第一多路调制器(112)的多个发射机(111－1，...111－4)；

传输路径包括光纤跨距（130），其长度（L）超过10公里，其零色散波长（λ_0）大约为1310nm；

将传输路径连接到多个接收机（115－1，...115－4）的第一多路解调器（114）；

其特征在于

光纤在1385nm的损耗低于在1310nm的损耗，在1.4μm波长范围内的色散在1.5和8.0 ps/nm-km之间；和

其中，第一多路调制器在1.4μm波长范围内至少将三个通道的波分复用信号提供到传输路径上。

2.权利要求1的波分复用系统（100），其中所述多个发射机（111－1，...111－4）的每一个在互不相同的预定波长上提供调制的光信号。

3. 权利要求1的波分复用系统(100)，其中相邻通道间隔200GHz或更少。

4. 权利要求1的波分复用系统（100），还包括将一个调制光信号通道连接到1.3μm波长范围内的传输路径的发射机（101）。

5. 权利要求4的波分复用系统（100），其中在1.3μm波长范围内的通道调制方案包括幅度调制的、残留边带调制。

6. 权利要求1的波分复用系统（100），还在1.55μm波长范围内至少包括一个调制光信号通道。

7. 权利要求6的波分复用系统（100），其中在1.55μm波长范围内的通道调制方案包括幅度调制的、残留边带调制。

8. 权利要求6的波分复用系统（100），还包括将多个数字信息通道连接到1.55μm波长范围内的传输路径的第二多路调制器（122）。

工作在1.4μm范围的高容量光纤网络

技术领域

本发明涉及单模光纤系统，具体地讲是涉及该系统中的波分复用（WDM）。

背景技术

色散是一种不同波长的光以不同的速度通过色散媒质例如玻璃的现象。由于调制载波信号包含多种波长，所以由玻璃光纤远端射出的光信号是由其近端射入的信号的模糊形式。在线性色散的情况下，这可以通过周期性地沿着光纤路径提供补偿来解决，补偿步骤越少越好。

普通的单模光纤系统主要工作在1285至1335纳米（nm）的波长范围内，并且具有在大约1310nm处的零色散波长。然而，由于通道之间的非线性作用的混合，该系统中使用的光纤并不适于传送多个紧密间隔的载波波长。这种非线性现象的有限形式－4光子混合（4PM）－在文献中已有描述（见D. Marcuse, A. Chraplyvy and R. Tkach所著的题为“Effect of Fiber Nonlinearity on Long-Distance Transmission”，Journal of Lightwave Technology, vol. 9, No. 1, January 1991, pp. 121-128的文章）。简而言之，由于不同信号通道之间的相加干涉和相消干涉，4PM表现为增益涨落或损耗。4PM的幅度是与功率有关的，它可以通过降低发射功率而降低。

多通道光学系统极其充分地利用了光纤，包括波分复用器，该波分复用器将多个紧密间隔的通道（波长范围）合并到一个传播方向上的单个光学路径中，并将其从另一个传播方向上的光学路径中分离。尽管普通的单模光纤系统可以在1.55μm波长范围内提供WDM操作，但是需要补偿的线性色散（例如，大约为17ps/nm-km）太大。例如，每50至100公里就需要一次补偿，这种短距离是无法实用化的。

光纤的预期用途包括分别和/或同时传送各种类型的数字和模拟信息。具体的用途包括数据（例如因特网传送）以及广播电视（TV）信号，该信号通常采用幅度调制的残留边带（AM－VSB）调制。模拟信号本身是对噪声敏感的，噪声在TV图像中很容易观察到。具体地讲，

当在单个光纤上传送多种波长例如 WDM 信号时，受激喇曼散射（SRS）使能量由 WDM 信号传递到长达 120nm 的另一个波长范围。现在，还没有能够在同一光纤上提供 WDM 和模拟 TV 信号的系统。

在 Electronics Letters, August 28, 1980 vol. 16 No. 19 中题为“Fabrication Of Completely OH-Free V.A.D. Fiber”的文章中得知，在某些情况下，需要完全没有 OH 的光纤，它在由紫外到红外的损耗谱中的任何波长上都没有 OH 离子引起的损耗峰；这种光纤在 WDM 系统中作为传输媒质起到重要作用。然而，该文章没有提供关于该光纤的色散特性的信息，以及在可用的光纤损耗谱中分配光学通道的信息。

由于这些和其它原因，最期望的是能够与为普通单模光纤系统设计的装置兼容的光学传输系统，该系统允许 WDM 操作而不会在 WDM 信号中产生 4PM 干涉，并且可以在 WDM 和模拟 TV 信号之间消除 SRS 干扰。本申请书将公开这样一种系统。

术语

普通光纤－单模玻璃光纤，其特征是零色散在大约 1310nm、最小损耗在大约 1550nm、高损耗区在大约 1385nm，高损耗区是由氢氧基（OH）离子吸收光学能量引起的。

色散－在单独使用时，该术语是指色散现象－一种在载波谱中由与波长有关的传播速度引起的线性现象。

跨距－是指没有再生器的光纤长度。该长度，可以包括光学放大器，是将信号转换成电信号形式/由电子信号形式转换出信号的基站之间的距离（通常是最近邻的信号再生器之间的距离）。跨距可以确定整个系统，或与一个或多个附加跨距结合在一起。

平均系统波长－由一组 WDM 通道的载波频率的算术平均确定的特定波长。

波长范围－波长特定范围的简写表达。1.3 微米（μm）波长范围在此的定义是包括 1285 至 1335nm 之间所有波长；1.4μm 波长范围在此的定义是包括 1335 至 1435nm 之间所有波长；1.55μm 波长范围在此的定义是包括 1500 至 1600nm 之间所有波长。

WDM－波分复用。多个通讯通道，合并在单个传输路径例如光纤上的情况，其中每个通道都具有不同的中心波长。

我们已经发现现有系统的上述不足可以用在 1.4μm 波长范围内传输多个 WDM 通道的光学传输系统中得到克服。这种系统包括在 1385nm 具有低损耗、在大约 1310nm 具有零色散波长（λ_0）、在 1.4μm 波长范围内具有大约 1.5 至 8.0 ps/nm-km 的线性色散的光纤。这种小但重要的色散值显著地降低了四光子混合效应。按照最广泛的术语，本发明考虑如下几个实验:（i）四光子混合是在设计 WDM 系统的过程中必需考虑的相关机理;（ii）WDM 通道产生的受激喇曼散射对 1550nm 的模拟信号传输有负面影响，和（iii）期望的是，新的 WDM 系统应当与普通单模光纤系统中使用的装置兼容。

发明内容

本发明提供了一种波分复用系统，包括:

第一多路调制器，将多个数字信息通道接入传输路径;

连接到第一多路调制器的多个发射机;

传输路径包括光纤跨距，其长度（L）超过 10 公里，其零色散波长（λ_0）大约为 1310nm;

将传输路径连接到多个接收机的第一多路解调器;

光纤在 1385nm 的损耗低于在 1310nm 的损耗，在 1.4μm 波长范围内的色散在 1.5 和 8.0 ps/nm-km 之间; 和

其中，第一多路调制器在 1.4μm 波长范围内至少将三个通道的波分复用信号提供到传输路径上。

本发明的优点是，通过将 WDM 通道放置在 1.4μm 的波长范围内，1310nm 和 1550nm 附近的波长范围还可以由工作在那些范围内的设备继续使用。

本发明的另一个优点是，通过将 WDM 通道放置在 1.4μm 的波长范围内，其中的色散小于大约 8 ps/nm-km，在距离小于 200 公里的大多数陆上光传输系统中可以不使用色散补偿。

本发明的另一个优点是，通过将 WDM 通道放置在 1.4μm 的波长范围内，将存在足以防止工作在 1550nm 的模拟信号，例如广播电视信号受到 SRS 噪声干扰的缓冲区（大约 120nm）。

附图说明

在结合附图进行阅读时，由下面的详细描述可以更加清楚地理解本发明及其操作模式，其中:

图 1 公开了高容量光纤网络的第一实施方案，包括以高达 10Gb/s 的速度、在 1.4μm 的波长范围内工作的各 WDM 通道，和以高达 2.5Gb/s 的速度、在 1.55μm 的波长范围内工作的各 WDM 通道；

图 2 公开了高容量光纤网络的第二实施方案，包括以高达 10Gb/s 的速度、在 1.4μm 的波长范围内工作的各 WDM 通道，和一个在 1.55μm 的波长范围内的模拟 CATV 通道；

图 3 是示出了在本发明中使用的光纤的色散（线性）和传输损耗特性的图；

图 4 是用于制作在本发明中使用的光纤的商业可行技术的流程图；

图 5 简要示出利用汽相轴向淀积工艺制作芯棒；

图 6 示出用于拉制在本发明中使用的玻璃光纤的光纤坯料的剖面图；

图 7 是示出了在泵捕波长为 1500nm、针对石英玻璃的喇曼增益系数对频率漂移的曲线。

具体实施方式

图 1 公开了根据本发明的高容量光纤网络 100。其特点是多个波分复用（WDM）通道工作在 1.4μm 的波长范围（即，1330－1435nm）内。另外，WDM 通道与工作在 1.3μm 波长范围（即，1285－1335nm）内的模拟 CATV 信号和工作在 1.55μm 波长范围（即，1500－1600nm）内的其它 WDM 通道共享同一光纤。直观地说，示出了具有载波波长（λ_{11}，λ_{12}，λ_{13}，λ_{14}）的四个高速数据通道，每个载波在发射机 111 中以 10 千兆比特每秒（Gb/s）的数据速率进行调制。每个通道可以有效地发射相当数量的数字信息，包括电话、数据和视频。这些通道示例性地聚集在 1400nm 周围，通道间的中心间隔为 100 千兆（GHz）。尽管只示出了四个通道，还可以使用更多或更少的通道。另外，通道间隔可以大于或小于 100GHz，这由网络设计者根据某些考虑例如放大器带宽以及可用性和/或辅助设备例如多路调制器和多路解调器的价格来确定。发射机 111－1 以 10Gb/s 的速率接收输入数据，并调制标定波长 λ_{11} 大约为 1400nm 的相干光源。然后，光信号进入光学多路调制器 112，其任务是将多路输入合并到单个输出口 110，每路输入都具有不同的波长。

另外，还在 1.55μm 波长范围内示出了 16 个数字通道，每个通道包括在发射机 121 中以 2.5Gb/s 的速率进行调制的载波。这种通道可以有效地发射数字信息，包括电话、数据和视频。这些通道聚集在 1550nm 周围，载波间隔为 100GHz，这在 1550nm 对应于 0.8nm。尽管只示出了 16 个通道，还可以使用更多或更少的通道。另外，通道间隔可以大于或小于 100GHz，这由网络设计者根据某些考虑例如放大器带宽以及可用性和/或辅助设备例如多路调制器和多路解调器的价格来确定。来自发射机 121 的光学信号进入光学多路调制器 122，其任务是将多路输入合并到单个输出口 210，每路输入都具有不同的波长。

光学多路调制和多路解调制可以通过一对由光栅（即，多个相互平行的波导－每个波导相对于最近邻波导的长度差是预定的固定值）互连的星形耦合机在频率上实现。这种器件的实例见美国专利 No. 5,002,350 和 5,136,671 和 5，412，744。在光发射的一个方向上，多路调制器可以用作多路调制器，其中多个独立的不同波长（λ_{11}，λ_{12}，…，λ_{1n}）射入一个星形耦合机的不同输入口，并在另一个星形耦合机的单个输出口上射出。在光发射的另一个方向上，多路调制器用作多路解调器，其中多个不同的波长射入一个星形耦合机的单个口，并根据其特定的波长在另一个星形耦合机的多个口上射出。

根据发射机（101，111，121）和接收机（105，115，125）在网络 100 中的距离，可能需要放大光信号。光放大器优选地用作再生器，因为它们可以直接放大光信号，而不必将其转换为用于电子放大的电信号，然后再转换为光信号。优选地是，喇曼放大器 103，113 用于 1.3 和 1.4μm 的波长范围，而铒放大器 123 用于 1.55μm 的波长范围。尽管如此，喇曼放大器可以用于网络 100 内部的所有相关波长。喇曼放大器的可用带宽为 25－30nm（见 1997 年 4 月 22 日发布的美国专利 No. 5,623,508），这适用于本发明。此外，喇曼放大器可以平行配置，以增加带宽。实际上，相当大的努力是针对多级、宽带光放大器的设计的。M. Yamada 等人在 Electronics Letters, vol. 33, No. 8, 1997 年 4 月 10 日，pp 710-711 中的文章最具代表性。应当理解，在本发明中还可以在所有的相关波长上使用半导体光放大器，成本较低、但性能也较低。

合并三个不同波长范围内的光信号是由粗 WDM（CWDM）131 实现

的，将其恰当地称为“粗”是为了将其与容纳 WDM 通道组的多个紧密间隔通道的路由器区分开。CWDM131 将 1.3μm，1.4μm 和 1.55μm 范围内的光信号合并到单个光纤 130 中。Mach-Zehnder 干涉仪是众知的，适用于构造 CWDM131。光纤 130 包括单模光纤，其损耗和色散特性示于图 3。下面还将详细描述光纤 130 的构造和特性，其不需要再生或色散补偿的延伸长度为 L。

由于大多数光学器件是双向的，又由于图 1 所示的网络 100 基本上是对称的，可以容易地推断出右侧部分的操作。例如，CWDM132 是粗 WDM，其将 1.3μm 范围内的波长导向接收机 105、将 1.4μm 范围内的波长导向多路解调器 114、将 1.55μm 范围内的波长导向多路解调器 124。类似地，多路解调器 114 将出现在输入口 140 上的光信号根据其波长导向特定的输出口。这就是说，具有载波波长λ_{11}的一个 10Gb/s 通道被路由到一个输出口，而具有载波波长λ_{12}的另一个 10Gb/s 通道被路由到另一个输出口。依次地，每个 10Gb/s 通道都导向接收机 115，以便进行多路解调制和由光信号到电信号的转换。图 1 的下部说明在 1.55μm 范围内的发射，其中 16 个信息通道由发射机 121 发射到接收机 125。在该波长范围，铒放大器 123 是优选的。多路调制器 122 和多路解调器 124 的功能类似于上述的多路调制器 112 和多路解调器 114。示例性地，发射机 121 和接收机 125 以 2.5Gb/s 的速率传输数字信息。发射机（101，111，121）、接收机（105，115，125）、多路调制器（112，122）和多路解调器（114，124）的设计对于相关领域的技术人员是众知的，并已公开在众多的出版物中。

主要优点是光纤 130 在网络 100 中的跨距可以以 10Gb/s 的速率长达 200 公里，而不需要色散补偿。这是可能的，因为光纤 130 的色散在 1.4μm 波长范围内小于大约 8.0ps/nm-km，因为 WDM 通道在 1.55μm 范围内的数据率大约为 2.5Gb/s 或更低。这种距离足以覆盖几乎所有的都市网络。

图 2 公开了高容量光纤网络 200 的第二实施方案，包括在 1.4μm 波长范围内工作速度均高达 10Gb/s 的多个 WDM 通道和一个在 1.55μm 波长范围内的模拟 CATV 通道。网络 200 中使用的部件除发射机 141 和接收机 145 之外，基本上与网络 100（见图 1）中的相同，这些部件用于在 1.55μm 范围内通过幅度调制的残留边带（AM－VSB）调制发射和

接收广播 TV 信号。AM－VSB 受激调制是噪声敏感的，因为 TV 图像在添加寄生信号时而劣化。图 2 公开了与广播 TV 一起传送多个数字传输光学通道的技术，其中 TV 光学通道为了由 Super Head End 的广泛分布而处于优选波长（即，1550nm）。

如果在单个光纤上发射多个波长，那么将存在几种将信号能量由一个波长传递到另一个波长的非线性机制。这些机制中的一种是受激喇曼散射，在由一根光纤承载多个波长时，该机制由于 SRS 提供了向更高波长传递能量的途径而变得特别讨厌。下述讨论引自 Kaminow 和 Koch 所著的 Optical Fiber Telecommunications IIIA 中的 239 至 248 页。

受激喇曼散射（SRS）是光与分子振动之间的非线性参量作用。射入光纤中的光线部分地受到散射，并引起频率下移。光学频率的变化对应于分子振动的频率。SRS 类似于受激布里渊散射（SBS），但是可以在前向或后向中发生。喇曼增益系数大约比布里渊增益系数小三个数量级，所以在单通道系统中，SRS 阈值大约比 SBS 阈值大三个数量级。然而，SRS 的增益带宽，数量级为 12THz 或 120nm，远大于 SBS 的带宽。SRS 可以耦合 WDM 系统中的不同通道，产生串扰。

简要地参考图 7，其中示出了石英玻璃光纤的喇曼增益。由于 SRS，在 WDM 系统中，波长较长的信号受到波长较短的信号的放大，这使波长较短的信号劣化，并在较长的波长中引入噪声。SRS 可以耦合波长间隔达 140nm 的通道，尽管耦合间隔超过 120nm 时显著下降。如果存在多个承载信号的波长，作为提高 WDM 传输系统的容量的最有效和优选的方式，它们全部可以为承载在长达 120nm 的波长上的任何信号累积贡献能量。对于在 1.55μm 范围内传播的 AM－VSB 信号，如图 2 所示，这意味着在 1430 和 1550nm 之间的波长上的任何信号都可以向 AM－VSB 信号传递能量，并使其劣化。这样，一方面，广播 TV 信号应当尽可能大地进行隔离，而另一方面，还希望尽可能多地利用光纤中的有效波长。

图 3 是示出了光纤的线性色散（303）和传输损耗（301）特性的图，该图适用于本发明。在所示波长范围内的损耗主要是由于瑞利散射和氢氧基离子（OH）的吸收。瑞利散射是一种由于光纤内部的密度和成份变化而导致的基本现象。瑞利散射比例于 $1/\lambda^4$，其中λ是光线的

波长。该现象是基本的、无法消除的，它确定了光纤损耗的下限。例如，在1.4μm范围内的损耗还可以由玻璃中存在的OH离子数目确定。这种损耗源于OH离子在与不同振动模式有关的波长上吸收的光波能量。至此，由于OH离子吸收能量而导致的损耗，在1.4μm范围内的操作有效地防止了长距离光学传输（即，大于10公里）。这种损耗在图3中显示为水峰（water peak）302，该峰与普通玻璃光纤有关。在本发明使用的玻璃光纤中没有这种损耗。实际上，已经开发出了适用于本发明的光纤参数表。然而，该表并不是用于确定可以采用光纤的全部范围，而仅仅是为了说明目的。

示例性光纤参数表

最大衰减:	
1310nm	0.35－0.40dB/km
1385nm	0.31 dB/km
1550nm	0.21－0.25dB/km
模场直径:	
1310nm	9.3±0.5μm
1550nm	10.5±1.0μm
芯/包层偏心率	<0.6μm
包层直径	125±0.1μm
截止波长	<1260nm
零色散波长	1300-1322nm
色散	>0.8 ps/nm-km（1335-1435nm）
色散梯度	<0.092 ps/nm^2-km（最大）
宏观弯曲度	<0.5 dB 在1550nm（1圈，32毫米）
宏观弯曲度	<0.05 dB在1550nm（100圈，75毫米）
套层直径	245±10μm
验证测试·	100 kpsi

本发明利用在1.4μm波长范围内具有低损耗的光纤。“低损耗”的含义是光信号的衰减基本上小于普通单模光纤。下面简要叙述制备这种光纤的技术。

图4给出制备在1385nm具有低损耗的光纤的技术的概要。各步骤

具有独立的号码（41－48）。前三个步骤（号码 41－43）涉及具有适度低 OH 含量（即，小于 0.8 份每十亿）的芯棒的制备，芯棒外部用玻璃管包裹。因此，前三个步骤可以由制作芯棒的单个步骤代替，该芯棒具有小于 0.75 的淀积包层/芯比率，和重量比例小于 0.8 份每十亿的 OH 含量。优选地，芯棒在步骤 41 由汽相轴向淀积（VAD）工艺制作，如下所述：

芯棒的制备

为讨论 VAD 工艺，参考图 5，其中玻璃微粒或“碳黑”淀积在硅原料棒上。芯棒 50 包括芯 51，其折射率高于淀积包层 52 的折射率。注意，光线向折射率较高的区域弯曲，这就是使光线沿着光纤中心传播的物理定律。为了产生折射率相对较高的区域，向焊灯 501 提供燃料（例如，氧气和氢气）和原料（例如 $GeCl_4$ 和 $SiCl_4$），使焊灯在火焰中向玻璃棒中心喷出气化原料。火焰使原料发生反应，使玻璃微粒或（碳黑）淀积在芯棒 50 上。芯棒通常相对于上端部的初始淀积位置垂直延伸。然后，垂直向上进行移动和旋转，这样玻璃碳黑就沿着整个长度和四周进行淀积。另一个焊灯 502 用于将称为淀积包层的玻璃层 52 淀积到芯 51 上。在焊灯 502 中用于制作包层 52 的原料是 $SiCl_4$，例如。注意，在芯 51 中掺杂锗是制作折射率高于包层的芯的一种方法。另外，$SiCl_4$ 可以是制作芯 51 的原料，而在淀积包层中掺杂氟可以制作折射率小于芯的包层。在这种情况下，氟化物例如 SF_6、CCl_2F_2、CF_4 在包层焊灯 502 中与 $SiCl_4$ 混合。关于制作不同光纤的具体工艺细节包含在教科书 Optical Fiber Telecommunications II, Academic Press, Inc. ©1988 AT&T 中的第四章，Bell Communications Research, Inc. In particular, section 4.4.4 （pp 169-180）讲述了 VAD 工艺。

在上述 VAD 工艺中，淀积包层的直径（D）小于芯直径（d）的 7.5 倍。因为芯棒的制备是一种昂贵的工艺，因此在制备芯棒的过程中节省任何时间都将直接降低光纤的成本。实际上，制作芯棒所需的 VAD 淀积量比例于 $(D/d)^2$。但是随着芯棒的 D/d 的减小，对包裹管中的纯度要求就将提高。通过降低 D/d，光纤中的更多的光功率将在包裹管中传播，杂质例如 OH 离子将产生额外的吸收损耗。这是因为 OH 离子是可以移动的，并将向芯移动，特别是在拉制光纤的操作中。更坏的是，OH 离子分解成氢，氢比 OH 更易于移动，还可能在拉制光纤的过程

中扩散到光纤芯中。氢和光纤芯中的原子缺陷之间的后续反应将在那里形成 OH 离子。淀积包层/芯比率小于 2.0 的芯棒需要 OH 含量极低的包裹管，这在当前是不经济的。因此，对于淀积包层/芯比率，当前的商业可行范围是 2.0<D/d<7.5。

图 4 中的步骤 42 指出在大约 1200°C 的温度下，将芯棒放置在含氯或氟的气氛中可以使其脱水。在现阶段，芯棒是多孔的碳黑体，例如，氯气将易于进入碳黑体中的空隙，并由氯离子替换 OH 离子，由此使碳黑体基本上脱水。OH 离子替换率与氯气流速和脱水温度有关。

图 4 中的步骤 43 指出在大约 1500°C 的温度下，将芯棒放置在氦气氛中可以使其固化。固化是使多孔碳黑棒转变成没有边界颗粒的致密玻璃的步骤。关于脱水和固化的具体细节包含在 1976 年 1 月 20 日公布的美国专利 3，933，454 中。

图 4 中的步骤 44 指出优选地利用氧－氢焊灯拉长芯棒。这是提供该步骤所需的大量热能的有效方法。另外，该步骤可以用无氢的等离子体焊灯完成，如下所述，它可以有利地消除刻蚀工艺（步骤 45）。通常，VAD 工艺生长的芯棒太大以至于无法插入具有合理尺寸的包裹管中，通常需要在插入之前对芯棒进行拉伸，以便减小其直径。拉伸是在玻璃车床上完成的，该车床的结构在本领域是众知的。芯棒安装在车床的头架和尾架之间，以便联动旋转。在芯棒旋转时，焊灯在其下面沿着中心轴以恒定的速率向头架移动。在焊灯移动的同时，尾架离开头架，使芯棒拉伸，从而降低其直径。易燃气体，例如氢气和氧气分别以 30 升每分钟（1pm）和 151pm 的典型速率流过焊灯。尽管使用氢气是商业可行的，但是这将在芯棒表面上产生 OH 层。芯棒拉伸在本领域是众知的，其具体细节公开在，例如 1986 年 3 月 25 日发布的美国专利 4，578，101 中。

芯棒刻蚀

步骤 45 指出优选地利用无氢等离子体焊灯刻蚀拉伸后的芯棒。下面简要讨论等离子体刻蚀工艺，尽管可以理解的是还可以利用其它刻蚀技术有效地从棒表面上去除 OH 离子。这些其它的刻蚀技术包括机械抛光和化学刻蚀，但并不仅限于此。

等温等离子体可以用来快速地从玻璃棒的外表面上去除（刻蚀）硅和硅化玻璃（见，美国专利 5，000，771）。利用等温等离子体焊灯，

去除材料的主要机理是由等离子体的高温产生气化，该温度在等离子体的中心通常可高于 9000°C。导电火球与难熔介质表面的接触可以有效地向表面传递能量，使表面温度高于介质材料的气化温度。

利用较大的包裹管可以降低光纤的总体造价。优选地是，管包含以高纯度、低衰减和高抗拉强度而闻名的人造硅。包裹管的纯度将决定它可以放置在距离芯多近的位置。步骤 46 指出芯棒用 OH 含量较低的玻璃管进行包裹，也就是说，随着 D/d 值的减小，管的纯度就需要提高（即，OH 含量需要更低）。例如下表示出对于本发明中的用途相对较低的、包裹管中的各种 OH 浓度值：

D/d	OH 浓度
7.5	<200ppm
5.2	<1.0ppm
4.4	<0.5ppm

图 4 中的步骤 47 指出玻璃管收缩到芯棒上，形成坯料 60，其剖面图示于图 6。收缩是利用环形焊灯加热包裹管 62 实现的，其中的包裹管 62 是垂直放置的，并环绕芯 50。该工艺的细节包含在美国专利 4,820,322 中。最后，图 4 中的步骤 48 指出众知的、由坯料的加热端（大约 2000°C）拉制光纤的工艺。

尽管已经示出和描述了各个特定的实施方案，应当理解的是，在本发明范围内进行修改是可能的。这些修改包括，但不限于此：多路调制通道的数目不同于图 1 和图 2 所示实施方案；使用半导体光放大器，而不是铒放大器或喇曼放大器，WDM 通道的非均匀间隔，工作数据率不同于已公开的数据率。

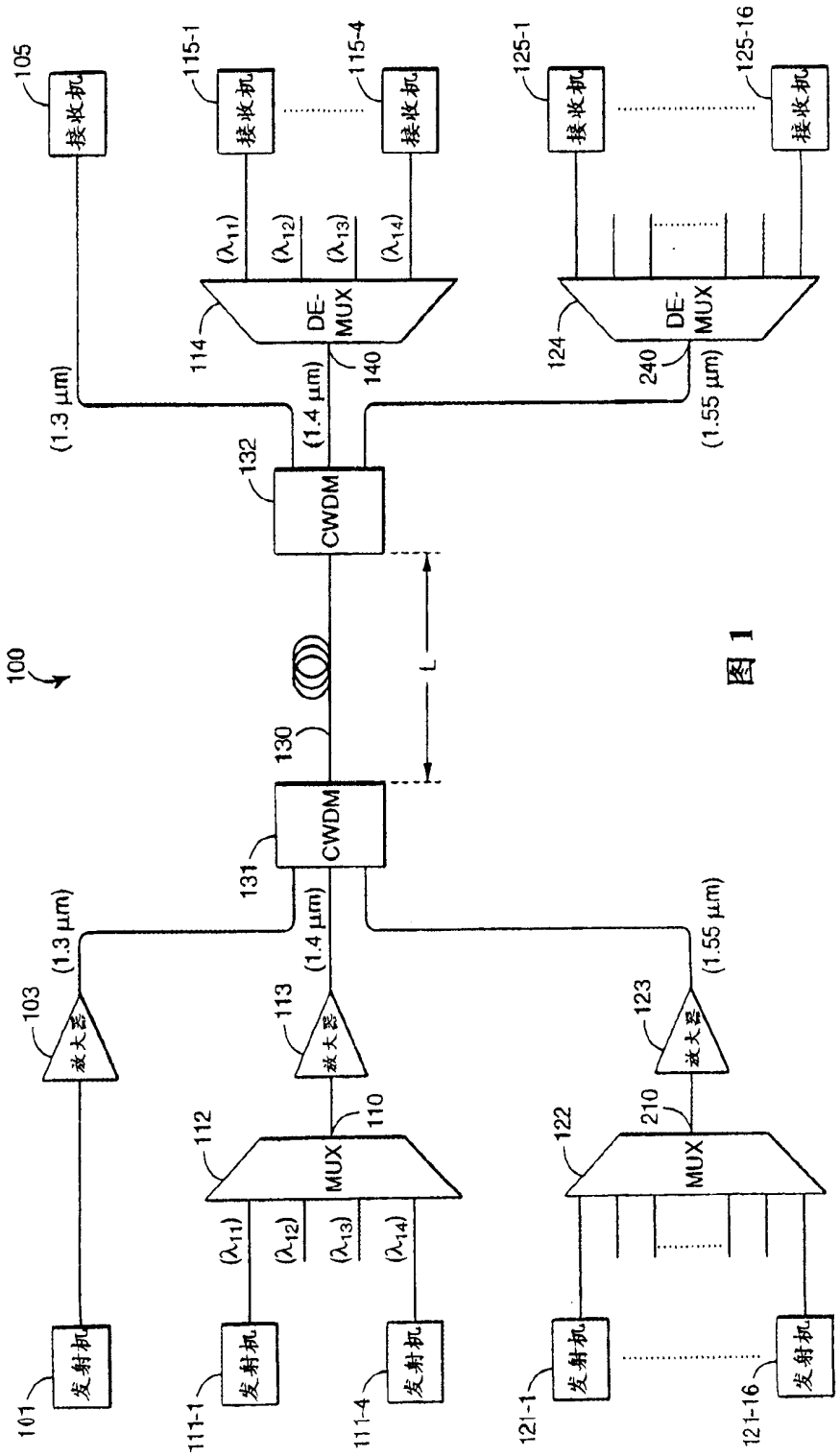

100
105
接收机
115-1
115-4
125-1
125-16
(λ11)
(λ12)
(λ13)
(λ14)
DE-MUX
114
124
140
240
(1.3 μm)
(1.4 μm)
(1.55 μm)
132
CWDM
L
130
131
103
113
123
放大器
112
MUX
110
210
122
发射机
101
111-1
111-4
121-1
121-16

图 1

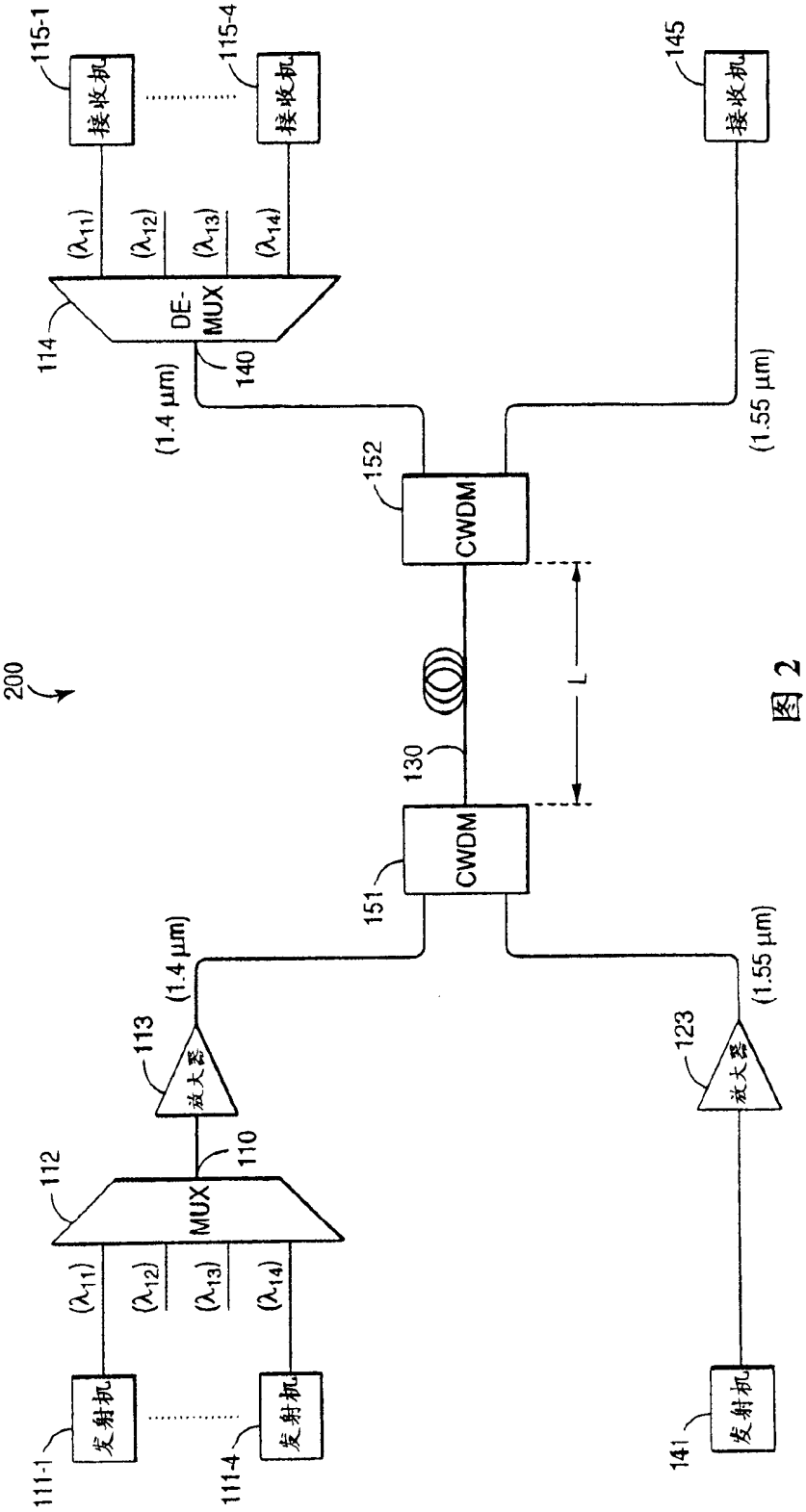

200
115-1
接收机
115-4
接收机
145
接收机
(λ11)
(λ12)
(λ13)
(λ14)
DE-MUX
114
140
(1.4 μm)
(1.55 μm)
152
CWDM
L
130
151
CWDM
(1.4 μm)
(1.55 μm)
113
放大器
123
放大器
110
112
MUX
(λ11)
(λ12)
(λ13)
(λ14)
111-1
发射机
111-4
发射机
141
发射机

图 2

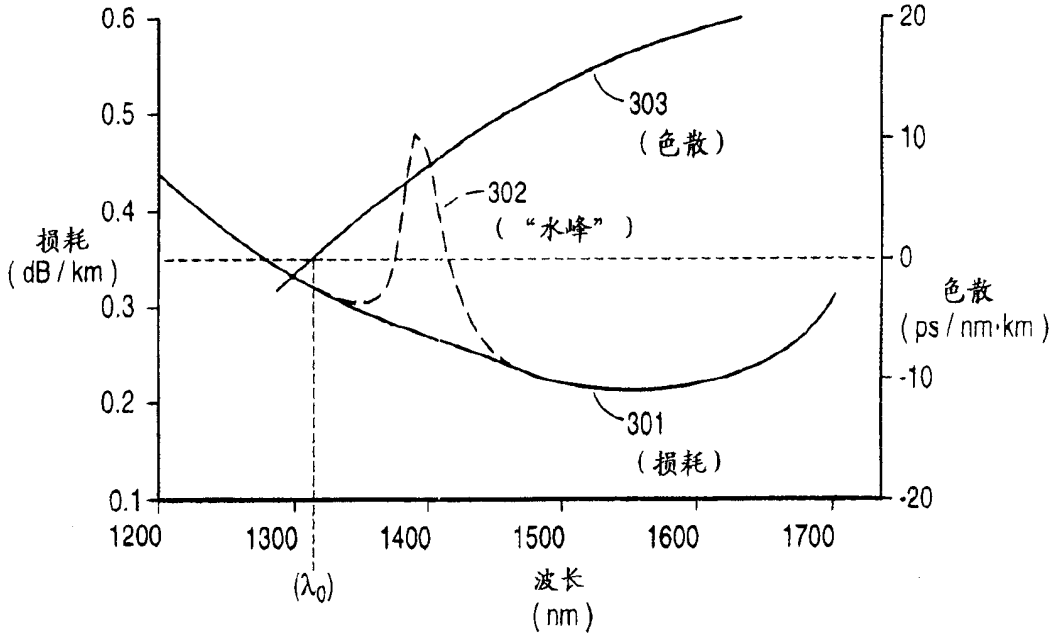

0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
损耗
(dB/km)
20
10
0
-10
-20
色散
(ps/nm·km)
303
(色散)
302
("水峰")
301
(损耗)
1200
1300
1400
1500
1600
1700
(λ_0)
波长
(nm)

图 3

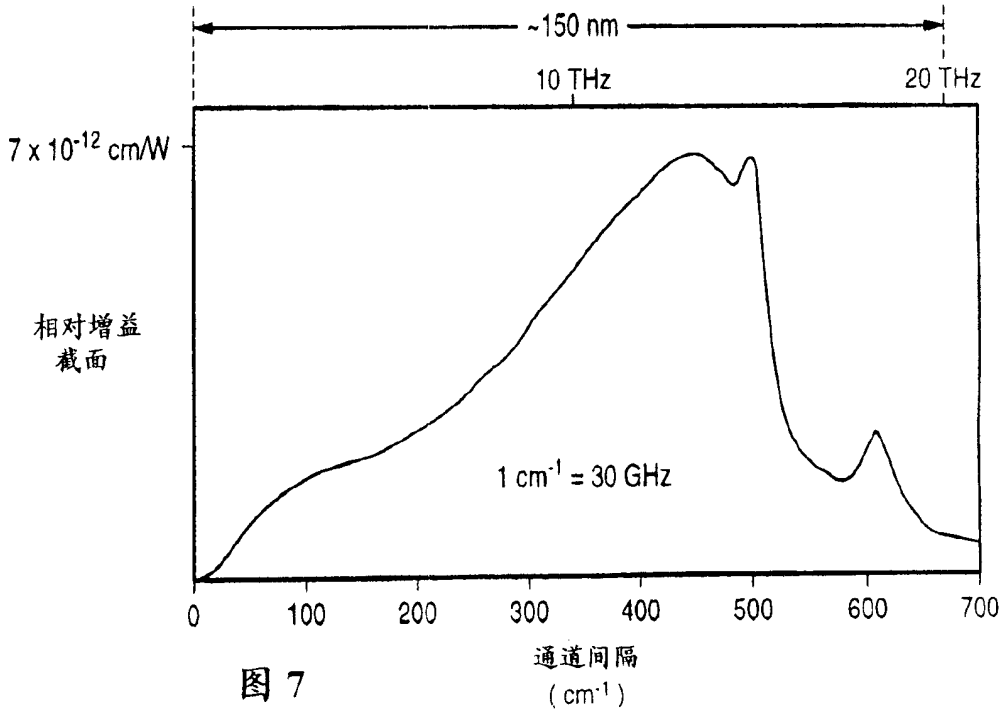

~150 nm
10 THz
20 THz
7×10^{-12} cm/W
相对增益
截面
$1\ cm^{-1} = 30\ GHz$
0
100
200
300
400
500
600
700
通道间隔
(cm^{-1})

图 7

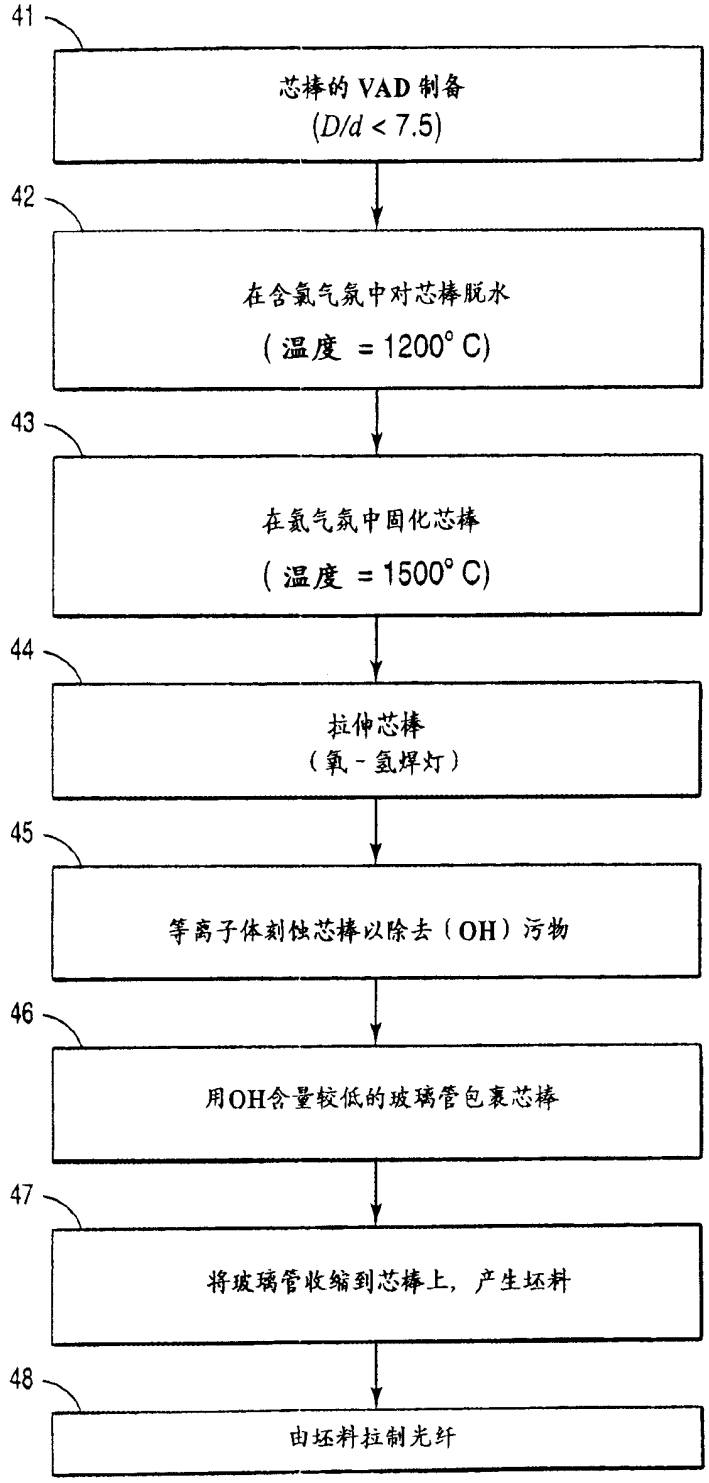

41
芯棒的 VAD 制备
(D/d < 7.5)
42
在含氯气氛中对芯棒脱水
(温度 = 1200° C)
43
在氦气氛中固化芯棒
(温度 = 1500° C)
44
拉伸芯棒
(氧 - 氢焊灯)
45
等离子体刻蚀芯棒以除去(OH)污物
46
用OH含量较低的玻璃管包裹芯棒
47
将玻璃管收缩到芯棒上，产生坯料
48
由坯料拉制光纤

图 4

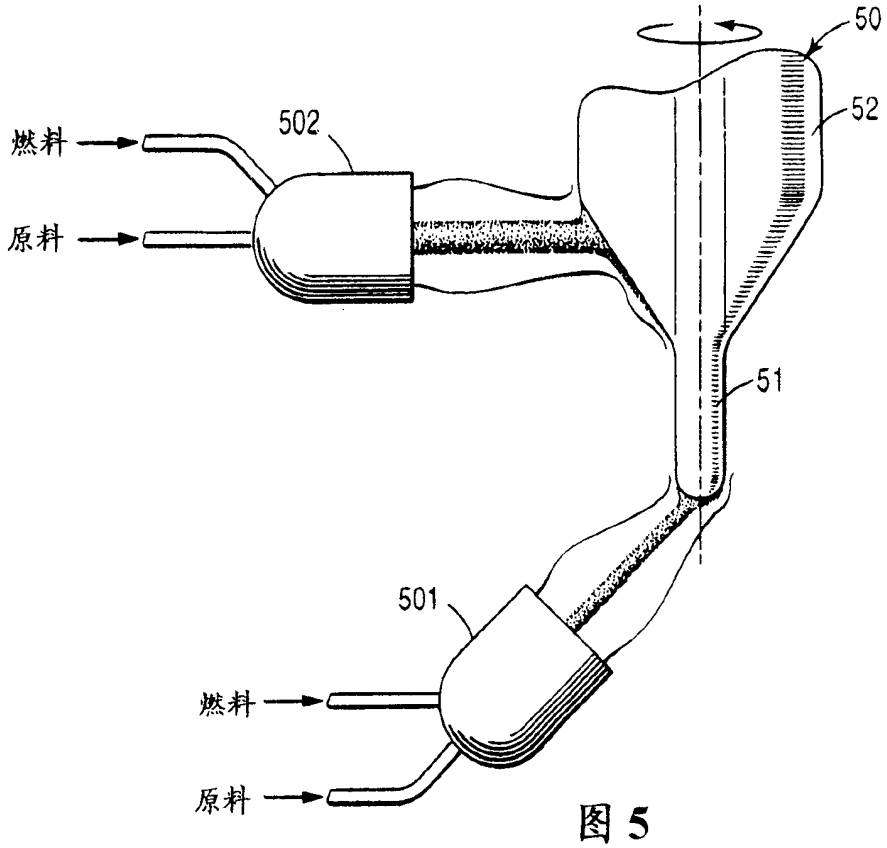


图 5

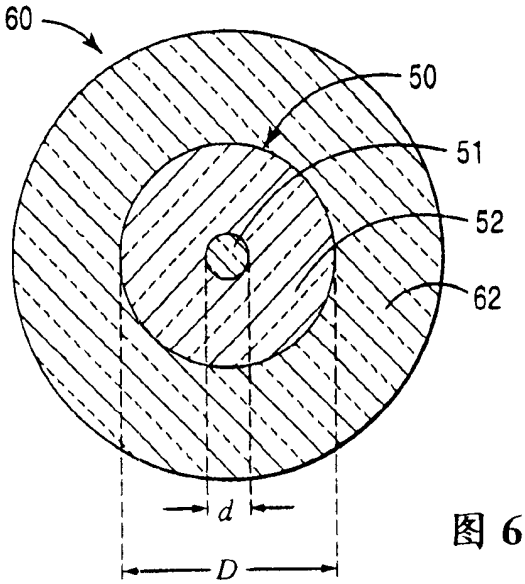


图 6