

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷

G02B 6/32

G02B 6/42 G02B 13/18



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 03132732. X

[43] 公开日 2004 年 5 月 19 日

[11] 公开号 CN 1497280A

[22] 申请日 2003.9.30 [21] 申请号 03132732. X

[30] 优先权

[32] 2002.10.1 [33] US [31] 10/262233

[71] 申请人 伊斯曼柯达公司

地址 美国纽约州

[72] 发明人 P·D·勒丁顿 J·R·比特里

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

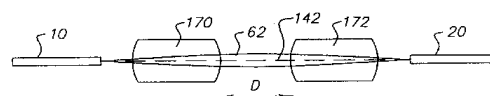
代理人 陈景峻 张志醒

权利要求书 2 页 说明书 14 页 附图 6 页

[54] 发明名称 用在透射和反射光纤部件中的对称、双非球面透镜

[57] 摘要

一对光学透镜，包括：第一双凸光学透镜(134 或 170)，具有两个相同的非球面光学表面和第二双凸光学透镜(172)，远离所述第一双凸光学透镜放置，具有两个相同的非球面光学表面，其中，所述第一光学透镜适合于使从源光纤发射的光成形为一种会聚、发散和准直光束，以及所述第二光学透镜适合于将所述光束聚焦到接收光纤中以便将从所述源光纤发射的所述光耦合到所述接收光纤中。



I S S N 1 0 0 8 - 4 2 7 4

1、一对光学透镜，包括：

5 第一双凸光学透镜（134 或 170），具有两个相同的非球面光学表面；

第二双凸光学透镜（172），远离所述第一双凸光学透镜放置，具有两个相同的非球面光学表面，其特征在于，所述第一光学透镜适合于使从源光纤发射的光成形为一种会聚、发散和准直光束，以及所述第二光学透镜适合于将所述光束聚焦到接收光纤中以便将从所述源光纤发射的所述光耦合到所述接收光纤中。

2、如权利要求 1 所述的光学透镜对，部分所述第一和第二光学透镜限定光轴，其特征在于，所述第一光学透镜适合于使来自位于所述光轴上的源光纤的光形成一种会聚、发散和准直光束以及所述第二光学透镜适合于使所述光束聚焦到位于所述光轴上的接收光纤中。

15 3、如权利要求 1 所述的光学透镜对，部分所述第一和第二光学透镜限定光轴，其特征在于，所述第一光学透镜适合于使来自位于所述光轴外的源光纤发射的光形成一种会聚、发散和准直光束以及所述第二光学透镜适合于使所述光束聚焦到位于所述光轴外的接收光纤中。

20 4、如权利要求 1 所述的光学透镜对，其特征在于，所述第一和第二光学透镜的所述非球面光学表面是二次曲线。

5、如权利要求 1 所述的光学透镜对，其特征在于，在直径 0.972mm，从顶球面的所述第一和第二光学透镜的非球面表面的最大偏转范围从 0.0005 至 0.0040mm。

25 6、如权利要求 1 所述的光学透镜对，其特征在于，所述第一和第二光学透镜的光学表面涂以防反射涂层。

7、如权利要求 1 所述的光学透镜对，其特征在于，所述第一和第二光学透镜的光学透镜材料为玻璃。

30 8、如权利要求 7 所述的光学透镜对，其特征在于，所述第一和第二光学透镜具有从 1.50 至 1.90 的折射率。

9、如权利要求 1 所述的光学透镜对，其特征在于，所述第一和第二光学透镜的光学透镜材料为塑料。

10、如权利要求 9 所述的光学透镜对，其特征在于，所述第一和第二光学透镜具有从 1.40 至 1.60 的折射率。

11、如权利要求 1 所述的光学透镜对，其特征在于，所述第一和第二光学透镜具有从 1.50 至 10.00 的有效焦距。

5 12、一种光学透镜，包括：

双凸光学透镜 (170)，具有两个相同的非球面光学表面，所述光学透镜的一部分限定光轴，其中所述光学透镜适合于使来自位于所述透镜的所述光轴外的源光纤发射的光形成一种会聚、发散和准直光束，然后，使通过所述光学透镜返回的反射光束聚焦到位于所述光学透镜的所述光轴外的接收光纤中以便将从所述源光纤发射的光耦合到所述接收光纤中。

10

用在透射和反射光纤部件中的对称、双非球面透镜

5 技术领域

本发明涉及连接光纤的装置和方法。特别地，涉及在透射和/或反射光学系统中将光从一条光纤耦合到另一光纤中的透镜，以及这种透镜的设计以便允许改进光纤、透镜和相关部分的组装。

背景技术

10 在光纤应用中，通常需要将光从一条光纤耦合到另一光纤。这可在将多条光纤集合在一起的交换机装置处完成，或在密集波分复用应用中通过增加和/或降低波长来完成。完成该操作的已经方法是通过直接将光纤对接在一起。也可通过电熔化 (electrical fusion) 连接这些光纤，其中当使两个光纤端接触时，使用电弧来加热它们。电子熔
15 化光纤，使它们在永久和机械稳定的接合处连接。也可能使用透镜来将光从一条光纤耦合到另一光纤中，如在美国专利 4,421,383 中所述。此时，物理连接器使光纤和透镜相对于彼此保持在适当的位置中。

在许多应用中，期望在光离开源光纤后并在其进入接收光纤前执行光处理和操作。该处理的例子包括衰减和滤波。在一条光纤上利用
20 多个波长的光学通信系统中，通常称为波长除法多路复用，使用掺杂铒的光纤放大器来在宽的波长范围上光学放大光纤中的光学信号。由于在波长除法多路复用的系统中，每个波长来自不同源，为光学放大器的优化操作，需要调整每个波长处的信号功率。信号功率的调整要求光学信号的可变光衰减，以及通常最容易在扩展光束上执行该衰减。

25 另外，如果也已经使来自光纤的光束准直，更容易执行光纤间的光学信号的处理。图 1 表示用于将光从源光纤 10 耦合到接收光纤 20 中的一对传统准直透镜 16 和 18 的例子。在该领域中已经梯度折射率 (GRIN) 透镜通常用于该应用中。通过将掺杂剂扩散到圆柱形玻璃体中来制造 GRIN 透镜。该掺杂剂在透镜的折射率中产生径向梯度。如果
30 该折射率降低到透镜的周围，那么该透镜将聚焦来自远处源的光。折射率分布图的形状控制该透镜的成象属性。在扩散后，将透镜切成特定长度并磨光两端。当在透镜间准直光时，光束几乎保持在适当的工

作距离“D”(通常为10毫米)上的相同大小。由于在该空间中光束几乎是相同的大小,更容易放置衰减或过滤光束的光学部件,诸如,例如,如图2所示的光调制器17。图2所示的光学系统称为透射系统,因为光束透过光学部件。

5 在涉及光信号处理的系统中,当将光信号从一条光纤耦合到另一条光纤时,期望尽可能保持更多的信号功率。对单一模式光纤的情况,能通过分析方法计算耦合效率。(见 R.E.Wagner 和 J.Tomlinson, “Coupling efficiency of optics in single-mode fiber components”、Applied Optics, vol. 21, No. 15, 1982, pg2671)。对将光
10 从一条光纤耦合到另一光纤的情况,透镜必须具有特定的光学功能以便产生高的耦合效率。参考图2,第二准直透镜18产生指向接收光纤20的聚焦光束。通过聚焦光束中的任何象差,将降低耦合到接收光纤中的光的百分比。光纤系统中光功率损耗是非常不希望的,因为它能限制能在通信信道上传送的信息量或增加所需放大量。

15 近来,基于通信系统的更多光纤同时采用多个波长以便增加所载的信息量。将使用多波长的一般原理称为波长除法多路复用。波长除法多路复用系统使用分开存在于光纤中的不同波长的信号的方法,如图3所示。源光纤22位于准直透镜16的后焦面附近。通过准直透镜准直来自源光纤的光并对准光纤24。将光纤的涂层构造成反射除集中在所需波长附近的非常窄的波长带中的光外的所有光。将通过光纤24
20 的光耦合到接收光纤28中。如果正确地对准光纤24,从该光纤反射的光将指向到第二接收光纤26端上。注意光纤22、26和28不位于该系统的光轴上。包括源光纤22、准直透镜16、光纤24和接收光纤26的光学系统称为反射系统,而包括源光纤22、准直透镜16、准直透镜
25 18和接收光纤28的光学系统称为透射系统。

为实现到光纤中的光束的高耦合效率,将光束聚焦到具有少量象差的光纤上是不足的。更具体地说,聚焦光束必须与由该光纤制成的基频匹配。这要求该光束与该光纤模式具有相同的振幅和相位。为匹配该光纤的相位分布,光束应当沿该光纤的光轴进入光纤,或将导致另外的损耗。如果光纤的端面垂直于该光纤的光轴,那么为最高耦
30 合效率,该光束必须垂直于光纤。对正常的成象系统来说,将平行于该系统轴的光束的情况称为焦阑。更具体地说,在正常的成象系统中

的焦阑要求通过光阑的中心行进的光线的主光线在系统中的某些点处必须平行该光轴。为单个元件的光学系统来说，孔径光阑应当位于或靠近透镜的前或后焦面。在光学系统的不同部分，光学系统可是焦阑的。如果主光线平行于物空间中的光轴，在物空间中，可将该系统视为是焦阑的。如果主光线平行于象空间中的光轴，在象空间中，可将该系统视为是焦阑的。例如，图 4 表示 40 透镜和光阑 42 的简化系统，其中该系统在物空间中是焦阑的。图 5 表示在象空间中为焦阑的透镜 50 和光阑的类似系统。

由于光纤源的属性，来自光纤的光束通常被视为物空间焦阑，因为从平行该光轴的光纤出现光束。期望光学系统具有用于耦合在第二准直透镜的象空间中仍然为焦阑的光纤的特征，以便实现进入接收光纤的光的最高耦合效率，该接收光纤位于象空间中。如果光以对该光纤轴的实际角度进入该光纤，那么将显著地降低进入该光纤的耦合效率，或将增加插入损耗。尽管可使光纤倾斜于光轴以便降低光束和光纤的光轴间的有效角，倾斜光纤大大地增加组装最终光学系统的时间和成本。光学元件的位置和类型，以及孔径光阑的位置影响焦阑的状况。

对用来将光从一条光纤耦合到另一光纤的系统来说，不希望具有限制光束，从而降低光功率的任何孔径。因此，通常没有限制光束的限定孔径或光阑。当没有限制光束的物理孔径时，由源和结合光学元件的接收器的特征确定焦阑。更具体地说，如果正在系统中传播光束以及不期望引入以任何方式限制光束的任何孔径，那么通常由主光线穿过该系统的光轴的位置描述光阑的位置。主光线限定为从源发射的光束分布中心的光线，因此不由光学系统的物理孔径确定。

在该领域中已知使用梯度折射率 (GRIN) 透镜来准直来自光纤的光。Nippon Sheet Glass、Somerset、New Jersey 制造这些透镜。图 6 表示使用两个 GRIN 准直透镜的透射光学系统。从源光纤 10 放射 Gaussian 光束并由 GRIN 透镜 16 准直。然后，由 GRIN 透镜 18 将准直光束 62 聚焦到接收光纤 20 中。透镜的傍轴前焦面远离那个透镜的第二原理平面 (principle plane) 一个有效焦距 (FEL)。GRIN 透镜 16 的前焦面 60 非常接近那个透镜的前面 64。这是因为第二原理平面 66 位于 GRIN 透镜中。对反射系统 (见图 3) 来说，光纤 24 应当位于输

入准直透镜的前焦面 60 以便实现最大耦合效率，或最小插入损耗。对组装反射光子器件，诸如 DWDM 多路信号分离器来说，光纤 24 接近 GRIN 透镜的前面 64 来说是很有利的，因为能将光纤直接粘接到 GRIN 透镜 16 的前面 64 而不会招致太多的插入损耗。

5 为具有高耦合效应，聚焦透镜必须不将典型的象差引入光束。对梯度折射率透镜来说，必须精确地设计折射率分布图的形状以便产生最小象差。折射率分布图的控制是很难的，因为分布图的形状仅受扩散到玻璃中的掺杂剂的控制。梯度折射率透镜的另一个缺点在于通常用在扩散中的一种掺杂剂是铊。例如，在 U.S. 专利 3,941,474 和
10 4,246,474 中描述过在梯度折射率透镜使用铊。铊是有毒金属（甚至铊比铅毒性还大）。

除梯度折射率玻璃透镜外，以前尝试使用折射透镜来耦合光纤间的光，如 U.S. 专利 4,421,383 所述。然而，U.S. 专利 4,421,383 未公开使用非球面来提高光学性能，也未公开使用对称双非球面准直透镜。
15 图 7 表示使用如 U.S. 专利 6,438,290 中所述的两个平凸折射准直透镜的透射光学系统。从源光纤 10 放射 Gaussian 光束并由平凸透镜 72 准直。然后由第二平凸透镜 74 将准直光束聚焦到接收光纤 20 中。

对平凸准直透镜来说，也使前焦面 82 远离第二原理平面 80 一个有效焦距（FEL）。因为所有光功率均位于表面 78 上，第二原理平面 80
20 近似地位于表面 78 上。因此，前焦面 82 近似地位于折射光学表面 78 前面一个有效焦距。图 8 表示使用一对平凸准直透镜的反射系统。滤光器 24 必须位于输入准直透镜 72 的前焦面 82 上以便实现到接收光纤 26 中的最大反射光。从前折射面 78 到滤光器 24 的相对大的距离在反射系统中可意识为不利，因为在温度变化期间，滤光器（或反射镜）
25 中位置改变。将反射耦合效率定义为耦合到接收光纤 26 中的光部分，假定滤光器（反射镜）24 是理想的反射器。反射插入损耗量化在反射光纤部件中损失的光量。

从菲涅耳反射面反射回到源光纤的光称为回波损耗或背射。非常小的背射光能引起激光二极管源中的严重性能恶化。为降低该效应，
30 本领域非常公知的是磨光光纤和准直透镜上的倾斜面，以及将高效防反射涂层应用于光纤面和透镜表面上。图 9（a）表示具有磨光的倾斜面 102 的源光纤 100 和具有相似的倾斜面 106 的 GRIN 透镜 104。图 9

(b)表示用于具有倾斜面108的平凸准直透镜110的相似的结构。源光纤和准直透镜上的8度倾斜面将产生可接受的少量背射是很公知的。

主要由透镜的折射率来确定准直透镜的最佳设计。通常选择准直透镜的形状以及每个曲率半径的比率以便最小化第3次球面象差。对低于约1.68的折射率来说,最佳光学设计是双凸面透镜,如图10(a)所示。透镜122将准直光束120聚焦到焦平面124上。如果折射率约为1.68,那么平凸透镜形状126是最佳的(见10(b))。最后,对高于约1.68的折射率来说,需要凹凸透镜形状128。

可通过使用一个或两个非球面光学表面来实现另外的光波前性能。使用传统的研磨和抛光来制作非球面光学表面很费时且昂贵。对大量应用来说,期望模塑玻璃或塑料中的非球面表面。几个公司,例如,Lightpath Technologies和Hoya制造了大量玻璃模塑的、双非球面准直透镜。在每种情况下,通常选择透镜的形状以及曲率半径的比率以便最大化光波前性能(wavefront performance)。通常,不选择对称双凸形状来最小化准直透镜的三次球面象差。

Eastman Kodak Co.市面上出售两种用在准直来自激光二极管的光的玻璃模塑的、对称双非球面透镜,每个激光二极管包含盖玻片。A-414透镜具有3.30mm的焦距,而A-439具有0.71mm的焦距。在这两种情况下,不将透镜设计成焦阑。

另外,U.S.专利5,301,249描述了使用反射镜系统来将来自激光二极管的光耦合到光纤。然而,该专利没有在数量上描述所期望的单模耦合效率,也没有描述该系统的离轴性能。同样地,需要提供位于光轴上或外的高效耦合的光纤的透镜。

发明内容

一对光学透镜包括具有两个等效的非球面光学表面的第一双凸光学透镜和具有两个等效的非球面光学表面的、远离第一双凸光学透镜放置的第二双凸光学透镜,其中第一光学透镜适合于将从源光纤发射的光成形为会聚、发散和准直光束,以及第二光学透镜适合于将该光束聚焦到接收光纤中以便从源光纤发射的光耦合到该接收光纤中。

光学透镜包括具有两个等效非球面光学表面的双凸光学透镜,一部分光学透镜定义光轴,其中该光学透镜适合于将从远离透镜的光轴

的源光纤发射的光成形为会聚、发散和准直光束的光，随后将通过光学透镜返回的反射光束聚焦到远离光学透镜的光轴的接收光纤中以便从源光纤发射的光耦合到接收光纤中。

附图说明

- 5 在下述呈现的本发明的实施例的详细描述中，将参考附图，其中：
图 1 表示用于将来自源光纤的源耦合到接收光纤的一对 GRIN 准直透镜；
图 2 表示引入到准直光束中以便提供另外的处理的光学部件；
图 3 表示具有滤光器的光学系统以便分开不同波长的光；
10 图 4 表示物空间中的系统焦阑；
图 5 表示象空间中的系统焦阑；
图 6 表示用来将来自源光纤的光耦合到接收光纤的一对 GRIN 准直透镜；
图 7 表示用来将来自源光纤的光耦合到接收光纤的一对平凸准直
15 透镜；
图 8 表示由两个平凸准直透镜和光纤组成的光学系统；
图 9a 表示具有倾斜面的 GRIN 透镜；
图 9b 表示具有倾斜面的平凸透镜；
图 10a 表示双凸准直透镜形状；
20 图 10b 表示凸平准直透镜形状；
图 10c 表示凸凹准直透镜形状；
图 11 表示对称双凸透镜；
图 12 表示用来将来自源光纤的光耦合到接收光纤的一对对称双凸
准直透镜；
25 图 13 表示具有位于远离准直透镜的光轴的源和接收光纤的透镜光学系统；
图 14 表示具有两个对称双凸准直透镜和光纤的光学系统；
图 15 表示为用于 1.944mm 的标准焦距的透镜中心厚度的函数的非球面二次常数的图形；
30 图 16 表示为用于 1.944mm 的标准焦距的透镜中心厚度的函数的曲率半径的图形；
图 17 表示远离凸光学表面反射的 Gaussian 光束；

图 18 表示通过 GRIN 透镜传播的主射线;

图 19 表示通过平凸透镜传播的主射线;

图 20 表示通过对称双凸透镜传播的主射线;

图 21a 表示在第二光学表面具有装配基准面的对称双凸透镜; 以

5 及

图 21b 表示在两个光学表面上具有装置基准面的对称双凸透镜。

具体实施方式

本发明将特别针对形成或更直接与根据本发明的装置协作的元件。应当理解, 未特别示出或描述的元件可采用本领域的技术人员公知的多种形式。在该讨论中, 假定使用单模光纤, 尽管本领域的技术人员将意识到本发明的优点也适合于使用具有多模光纤的发明。

参考图 11, 将源光纤 10 安装在透镜 134 的光轴 142 上, 该透镜 134 包含两个凸光学表面 136 和 138。第一表面 136 和第二表面 138 具有相同的光学形状。从源光纤 10 放射的 Gaussian 光束首先在表面 136 上反射, 然后在表面 138 上准直, 准直 Gaussian 光束 62 的大小在远离透镜表面 138 的某些特定距离基本保持恒定。为产生良好准直的光束, 将源光纤 10 放在或靠近透镜 134 的后焦面 130 处。使透镜 134 的前焦面远离该透镜的第二原理平面 144 一个焦距。第二原理平面 144 位于透镜内部, 因为光功率存在于透镜 134 的第一表面 136 和第二表面 138 上。因此, 前焦距 “FF” 小于平凸准直透镜的等效焦距, 如 (图 7) 所示。对对称设计来说, 后焦距 “BF” 和前焦距 “FF” 是等效的。由光表面 136 和 138 的曲率半径确定双凸透镜 134 的有效焦距 EFL, 以及透镜的透镜材料的折射率以及中心厚度 CT。对指定折射率和指定有效焦距来说, 能调整光学表面 136 和 138 的曲率半径以便增加或减少透镜的中心厚度。对指定折射率和指定有效焦距来说, 存在最大化耦合效率, 或最小化插入损耗的最佳中心厚度。在优选实施例中, 光纤是单模光纤。另外, 也能使用多模、极化维持, 以及掺杂溶液光纤。

图 12 表示用在透镜结构中的一对双凸透镜。源光纤 10 发射由透镜 170 准直的 Gaussian 光束。然后, 通过透镜 172 将准直的 Gaussian 光束 62 聚焦到接收光纤 20 中。源光纤 10 和接收光纤 20 均位于准直透镜的光轴 142 上或其附近。在诸如光开关的应用中, 期望使透镜间的工作距离 D 尽可能大。为实现对长工作距离器件的最佳耦合效率,

必须增加每个准直透镜的有效焦距。对工作距离在 5mm 和 1000mm 之间来说, 准直透镜的有效焦距应当在 1.9mm 至 8mm 的范围内。

在某些应用中, 也期望使源和接收光纤位于准直透镜的光轴外。图 13 表示源光纤 10 和接收光纤 20 均位于准直透镜 170 和 172 的光轴 142 外的透射系统。如果每个准直透镜的有效焦距相等, 光纤的横向位移将相等。

使用一对对称双凸准直透镜的折射系统如图 14 所示。在这种情况下, 由透镜 170 准直来自源光纤 22 的光。一部分光反射离光纤 24 并通过透镜 170 传播回来并进入接收光纤 26。未反射离光纤 24 的光透射过第二透镜 172 并进入接收光纤 28。由于主射线平行于光轴 142, 现在光学系统在象空间是焦阑的以及可实现到单模光纤中的高耦合效率, 即使光纤不位于该系统的光轴上。光纤 24 必须位于透镜 170 的前焦面 140 处或其附近以便最大化进入光纤 26 的反射光量。用于光学系统的放大大小等于第一透镜的焦距与第二透镜的焦距之比, 因此, 在图 14 的结构中, 期望具有相等焦距的两个透镜。

可使用一对对称双非球面透镜来耦合来自在波长范围为约 1300 至 1625nm 上操作的单模或极化维持光纤的光。也可使用一对对称双非球面透镜来耦合来自在波长范围为 850 至 1300nm 上操作的多模光纤的光。在每种情况下, 选择光学表面的规定、折射率以及中心厚度以便最大化耦合效率。如果源和接收光纤是相等的, 那么两个准直透镜的焦距也是相等的。然而, 如果源和接收光纤不相等, 那么将选择两个准直透镜的焦距以便与每个光纤的模场半径 (mode field radii) 匹配。

能选择图 11 中的透镜 134 的凸表面 136 和 138 以便具有非球面形状式样以便最小化由透镜产生的光束的象差。该形状通常以二次曲线方程的形式指定, 其中该表面的垂度由下述等式给出

$$sag = \frac{\frac{y^2}{R}}{1 + \sqrt{1 - (1+k)\frac{y^2}{R^2}}}$$

其中 R 是该表面的基圆半径, y 是半径坐标, 以及 k 是二次曲线常数。如果 k=0, 该表面为球面。可使用相等的数学公式来描述相同

的光学表面形状，而不改变该表面的有效函数。对在此所示的例子，仅使用二次曲线非球面表面。然而，具有高阶项的非球面表面也将产生可接受的结果。

5 对轴上物体，能选择非球面的特定形状以便使所有阶的球面象差为零。椭圆表面产生无限物象而没有任何球面象差。由 $(-1/n)^2$ 给出二次曲线常数，其中 n 是透镜的折射率。然而，椭圆体给出仅用于在光轴上成象的点的最佳成象。为确定最佳整体性能，并假定透镜必须用于轴上和轴外点，必须改变二次曲线常数以便实现最佳整体性能。通过最小化轴上和轴外场点的光程差的平均均方根来选择二次曲线常数的最佳值。

10 用于设计对称、双非球面、光纤准直透镜的简化过程描述如下。首先，选择标准有效焦距 1.944。然后，使用商业上可获得的光学设计程序，诸如来自 Optical Research Associate 的 CODE V™ 来确定用于范围从 1.5 至 1.9 的折射率的透镜材料的最佳二次曲线常数、中心厚度和曲率半径。从该数据，创建线性方程以便预测最佳二次曲线常数、曲率半径以及中心厚度如何随透镜材料折射率改变。能通过简单地将中心厚度和曲率半径乘以所需中心焦距与标准焦距之间的比率来设计具有非标准焦距的准直透镜。另一方面，最佳二次曲线常数与透镜的有效焦距无关。需要某些另外的优化来达到用于非标准有效焦距的“最佳”透镜设计方案。

过程步骤

步骤 1: 选择透镜材料，其将指定折射率 N 。

步骤 2: 使用下述方程来确定最佳二次曲线常数 k 。

$$k = -1.7843 * N + 0.6713$$

25 注意当透镜材料的折射率增加时，二次曲线常数的大小减小（或更接近于 0）。更接近于 0 的二次曲线常数表示需要更小的非球面偏转以便产生最佳波前。更低的非球面偏转表示制作更容易，因为如本领域所公知的，制作难度随增加非球面偏转增加。也可使用不同于由上述方程给出的最佳值的二次曲线常数来产生可接受耦合效率。

30 步骤 3: 计算用于 1.944mm 的标准有效焦距 EFL_0 的最佳标准曲率半径 R_0 ，以及最佳标准中心厚度 CT_0 。

$$R_0 = 2.6887 * N - 2.4097$$

$$CT_0 = 2.4623 * N - 2.0505$$

步骤 4: 指定所需有效焦距 EFL 并按比例决定标准曲率半径和标准中心厚度。

$$R = \frac{EFL}{EFL_0} * R_0$$

$$CT = \frac{EFL}{EFL_0} * CT_0$$

5 增加透镜的中心厚度以便降低光纤和准直器间的倾斜和轴偏误差是很有利的。对给定焦距和折射率来说, 可将中心厚度拉长到点同时仍然产生可接受耦合效率(或插入损耗)。图 15 表示描述二次曲线常数 k 如何随用于 1.944mm 的标准焦距的中心厚度 CT 改变的曲线族。图 16 表示描述曲率半径 R 如何随用于 1.944 的标准焦距的中心厚度 CT 改变的曲线族。例 4 描述具有增加的中心厚度的准直透镜。用于 1.944 的焦距和 1.70 的折射率的最佳中心厚度为约 2.13mm。通过调整曲率半径 $R=2.0323$ 以及二次曲线常数 $k=-1.87767$, 使中心厚度增加到 2.50。在这种情况下, 模塑反射插入损耗低于 0.01dB 以及在原型透镜上所测量的反射插入损耗为 0.07dB。

15 透镜可用玻璃或铸模塑胶制成。玻璃具有比塑料更大的环境稳定性。不象塑料透镜, 玻璃将不会因化学变化或温度而改变折射率。期望在模塑过程期间保持透镜材料的均匀性。如该行业所公知的, 光学材料的不均匀性会相反地影响透镜的性能。与通过扩散制成的梯度折射率透镜相比, 该透镜的有利之处在前没有用于扩散的有毒金属诸如铊。当透镜由玻璃制成时, 可模塑、落地和抛光玻璃。

20 本发明的有利之处在于可选择用于透镜的较高折射率镜。较高折射率透镜降低了提供给定折射率所需的曲线的强度, 从而使制造更容易。另一个优点在于对较高折射率材料来说, 单层光学涂层会导致从透镜表面反射的光量显著降低。这是因为对单层防反射涂层的折射率来说的最佳选择是等于在涂层的第页上两种介质折射率的几何平均值。一种通用的涂层材料是氟化镁, 具有 1.38 的折射率。因此, 对 1.90 的衬底折射率来说, 氟化镁是最佳的。衬底折射率越接近 1.90, 单层氟化镁涂层的性能越好。另外, 能可用多层分光防反射涂层涂透镜。

本发明的另一优点在于前焦距“FF”小于平凸准直透镜。较短的前焦距有助于将滤光器或其他光学部件安装在光子器件诸如 DWDM 多路信号分离器中（见图 14）。本发明的另一优点是由于两个光学表面上相等的功率而改进的可制造性以及降低的对准灵敏度。参考图 11，在两个光学表面 136 和 138 上折射 Gaussian 光束 62，当其通过透镜 134 时。这降低了由制造扰动、诸如中心厚度、功率、不规则性、光学表面的倾斜以及光学表面的轴偏引起的另外的插入损耗。两个表面上的相等功率也降低由组装对准误差，诸如透镜倾斜和轴偏引起的性能恶化。

本发明的另一优点是透镜的第一光学表面上的降低的划痕-短划伤规格。在 Gaussian 光束分布图内的光学表面上的任何表面缺陷，诸如划痕-短划伤将引起耦合效率降低。当光学表面上的光束大小降低时，划痕或短划伤的可接受大小也降低。从光纤面对 GRUB 和平凸透镜的第一光学表面的距离非常小 - 通常是 0.25mm。参考图 1，GRIN 透镜 16 的第一表面 12 的光束直径 14 通常小于 50 微米。这对如图 7 所示的平凸透镜也是一样。在这种情况下，第一表面 76 上的光束直径 82 也小于 50 微米。因为第一光学表面上的光束直径非常小，可接受的划痕或短划伤的大小也变得非常小。现在参考图 11，对称双凸透镜 134 的第一表面 136 的光束直径 132 通常大于 200 微米。因此，用于第一光学表面或对称双非球面透镜的划痕-短划伤规格也将大大地降低，使得制造更容易。

为实现可接受回程损耗或背射，通常劈开光纤端并且通常使准直透镜的第一表面倾斜 8 度。还将这些表面涂以高效防反射涂层。图 9 (a) 表示具有倾斜面 106 的 GRIN 透镜 10，其中图 9 (b) 表示具有倾斜面 108 的平凸透镜 110。制造具有倾斜光学面的准直透镜很难且成本很高，这对模塑玻璃准直透镜来说尤其如此。

本发明的另一优点是实现可接受回程损耗而不需要倾斜面的能力。参考图 17，发散 Gaussian 光束 182 通过涂有防反射的倾斜面 102 离开源光纤 100。Gaussian 光束 182 继续发散直到它透过透镜 134 的第一光学表面 16 为止。在该表面，非常少量的光反射离涂有防反射的表面 136。凸光学表面 136 也增加反射光束 180 的发散角。反射光束 180 继续发散直到它到达倾斜光纤面 102 为止。在该点，反射光束 180 足

够大以便大大地降低进入源光纤 100 的光量。因此，较长的后焦距和凸光学表面均有助于降低将后反射光降低到可接受的程度。

5 本发明的另一优点在于从便于由对称透镜产生的组装。在组装过程期间，操作员不用确定首先应当将哪个光学表面插入安装管或 V 形凹槽，因为每个光学表面是相同的。当透镜的大小变得越来越小时，在组装中的方便变得很重要。

10 本发明的另一优点由缺少倾斜透镜面而产生。再参考图 9(a)，例如，必须相对于倾斜透镜面 106 对准倾斜光纤面 102 以便实现最佳耦合效率。在某些情况下，光纤面和透镜面需要对准，如图 9(a) 所示。在其他情况下，必须相对于透镜面 106 将光纤面 102 调整 90 度。将对透镜面的光纤面的调整称为同步。同步对准过程非耗时且困难，因为部件尺寸小且因为难以得到光纤面和透镜面。对本发明来说不需要同步，因为对称双非球面准直透镜不需要倾斜光学表面。

15 GRIN 透镜和平凸透镜的倾斜光学表面也导致准直 Gaussian 光束相对于用于 GRIN 透镜的如图 18 所示的光轴倾斜。这种效应称为光学定向 (optical pointing)。源光纤 100 具有倾斜面 102 以便降低背射。主射线 192 以相对于透镜 104 的光轴 142 和源光纤 100 的角度离开倾斜光纤面 102。主射线 190 以相对于光轴 142 的角度 190 离开透镜 104。主射线 190 还相对于透镜 104 的外直径 194 倾斜。图 19 表示具有倾斜面 108 的平凸透镜 110。主射线 204 还经相对于光轴 142 和透镜 202 的直径的角度离开透镜 110。由于不能实现使来自源光纤的“第一光”进入接收光纤，因此 Gaussian 光束的大的光学定向能增加对准光子器件的难度。在许多有源对准过程期间，检测“第一光”是很关键的。本发明由于缺少倾斜光学表面，因此不遭受光学定向。图 20 表示主射线 210 如何穿过对称双非球面透镜 134。主射线 210 相对于光轴 142 或透镜的外直径 212 没有倾斜地离开透镜。这是本发明的另一优点。

30 也将安装基准面增加到光学表面以帮助对准，如图 21(a) 和 (b) 所示。图 21(a) 表示具有在第二光学表面 226 上形成的平的基准面 224 的对称双凸透镜 220。能在模塑或第二对准中心操作期间形成该基准面。图 21(b) 表示具有在第一光学表面 232 上形成的基准面 234 以及在第二光学表面 236 上形成的另一基准面 328 的透镜 230。能使用

这些基准面的一个或两个来对准另外的光学部件，诸如光纤箍和衰减器。

下述的例子给出了本发明的特定实施例，并且不用来将本发明限定到特定的尺寸。

5 例 1

例 1 具有对称双非球面透镜，其具有 1.944 的有效焦距以及 1.50 的折射率。

第一光学表面的曲率 1: 0.61903mm^{-1}

第一光学表面的二次曲线常数: $k=-2.000878$

10 中心厚度: 1.64mm

第二光学表面的曲率 1: -0.61903mm^{-1}

第二光学表面的二次曲线常数: $k=-2.000878$

在 1550nm 的折射率: 1.50

后焦距: 1.29mm

15 前焦距: 1.29mm

单个透镜的有效焦距: 1.944mm

特定入射光瞳直径: 凸表面上 1.0mm

轴均方根值波前误差: 0.001 波

例 2

20 例 2 具有对称双非球面透镜，其具有 1.944 的有效焦距以及 1.60 的折射率。

第一光学表面的曲率 1: 0.527295mm^{-1}

第一光学表面的二次曲线常数 $k=-2.185689$

中心厚度: 1.89mm

25 第二光学表面的曲率 1: -0.527295mm^{-1}

第二光学表面的二次曲线常数: $k=-2.185689$

在 1550nm 的折射率: 1.60

后焦距: 1.22mm

前焦距: 1.22mm

30 单个透镜的有效焦距: 1.944mm

特定入射光瞳直径: 凸表面上 1.0mm

轴均方根值波前误差: 0.001 波

例 3

例 3 具有对称双非球面透镜，其具有 1.944 的有效焦距以及 1.70 的折射率。

第一光学表面的曲率 1: 0.461127mm^{-1}

5 第一光学表面的二次曲线常数: $k=-2.366173$

中心厚度: 2.14mm

第二光学表面的曲率 1: -0.461127mm^{-1}

第二光学表面的二次曲线常数 $k=-2.366173$

在 1550nm 的折射率: 1.70

10 后焦距: 1.15mm

前焦距: 1.15mm

单个透镜的有效焦距: 1.944mm

特定入射光瞳直径: 凸表面上 1.0mm

轴均方根值波前误差: 0.0008 波

15 例 4

例 4 具有两个对称双非球面透镜。已经增加透镜的中心厚度以便最小化光纤和准直透镜间的倾斜和轴偏。

第一光学表面的曲率 1: 0.48976mm^{-1}

第一光学表面的二次曲线常数: $k=-1.946435$

20 中心厚度: 2.500mm

第二光学表面的曲率 1: -0.48976mm^{-1}

第二光学表面的二次曲线常数: $k=-1.946435$

在 1550nm 的折射率: 1.7028

后焦距: 0.963mm

25 前焦距: 0.963mm

单个透镜的有效焦距: 1.944mm

特定入射光瞳直径: 凸表面上 1.0mm

轴均方根值波前误差: 0.0027 波

30 已经具体参考其优选实施例来描述了本发明，但将理解到在本发明的范围内能实现各种改变和改进。

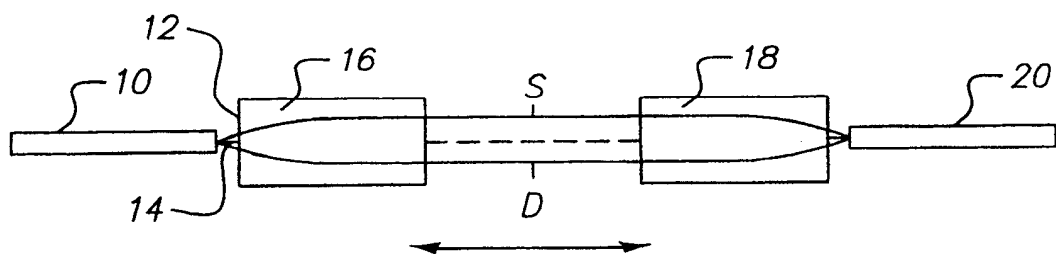


图 1
(现有技术)

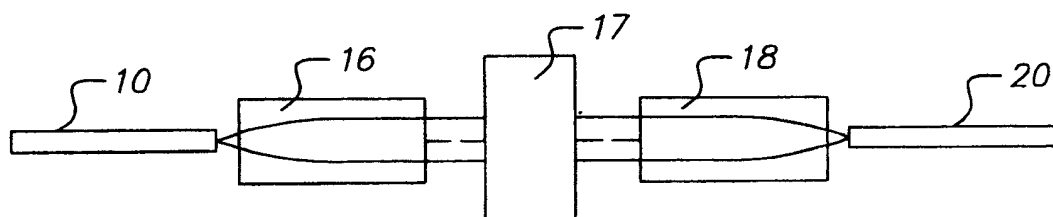


图 2
(现有技术)

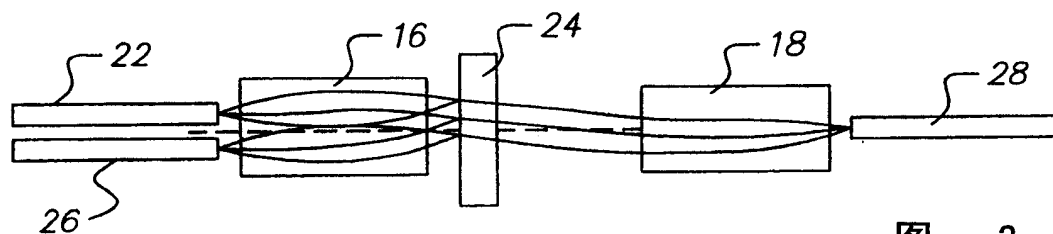


图 3
(现有技术)

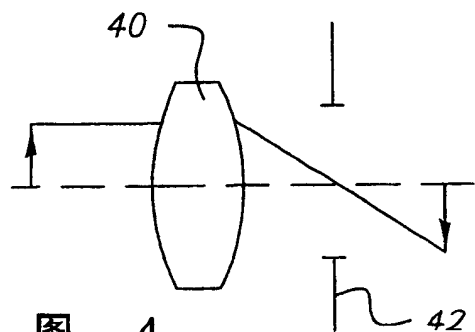


图 4
(现有技术)

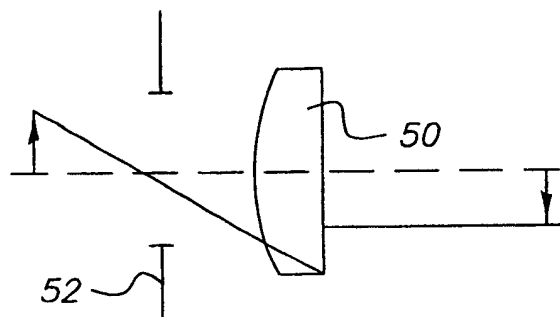
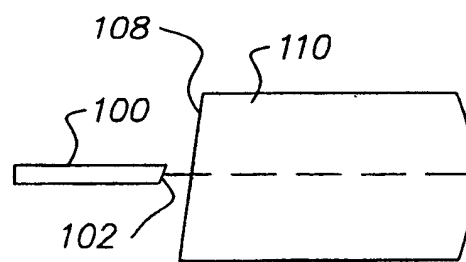
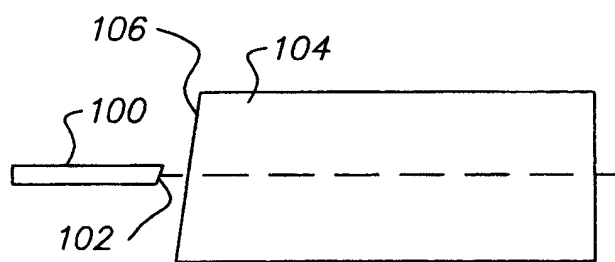
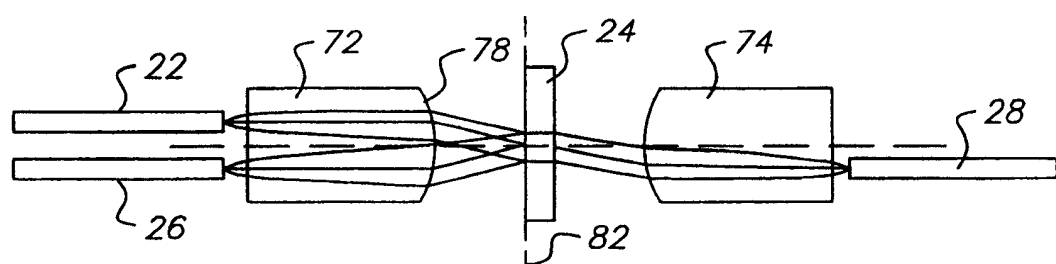
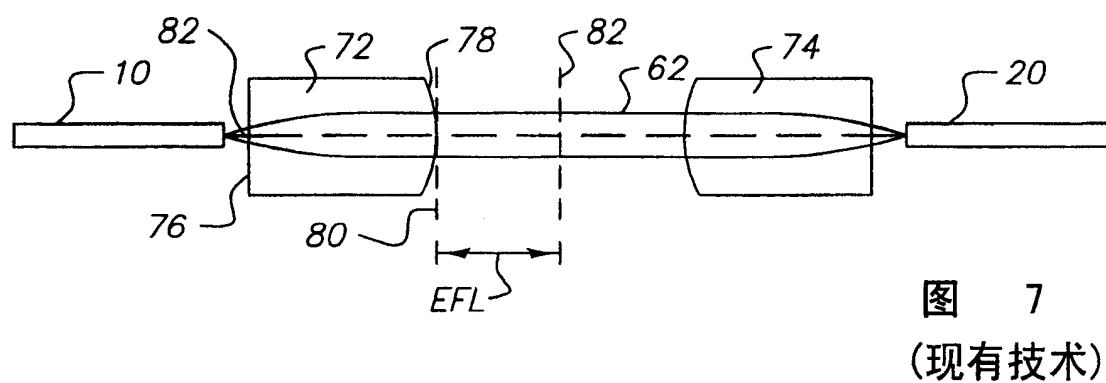
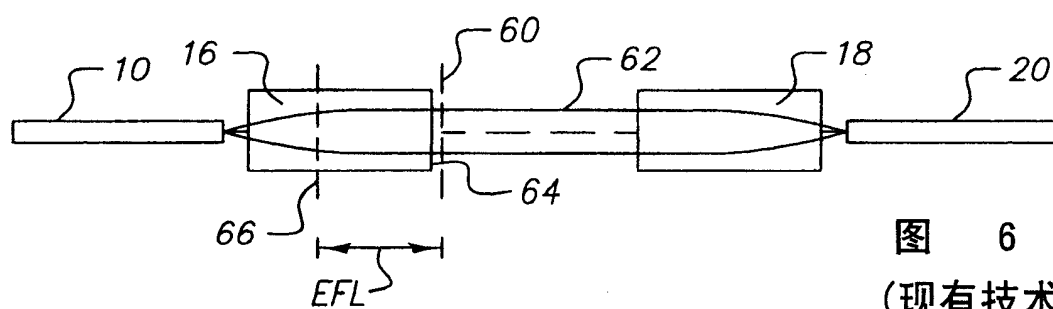


图 5
(现有技术)



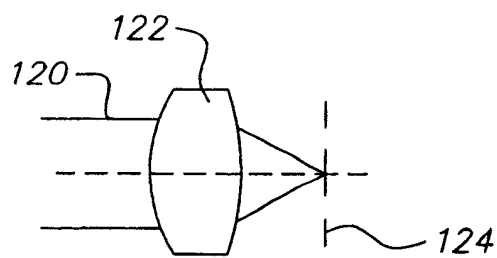


图 10a

(现有技术)

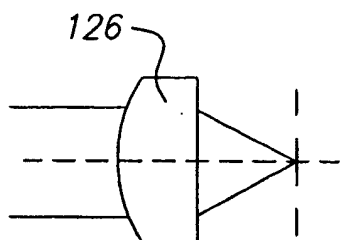


图 10b

(现有技术)

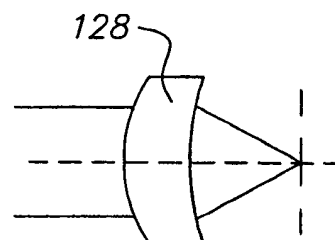


图 10c

(现有技术)

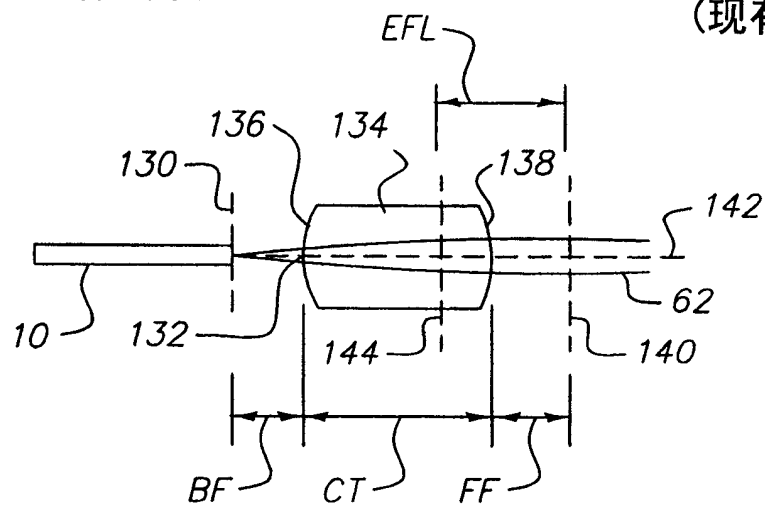


图 11

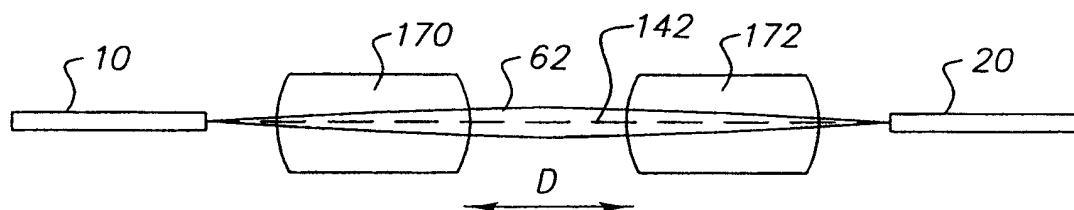


图 12

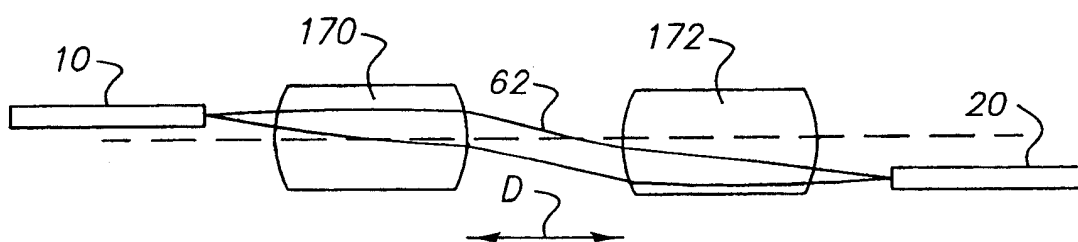


图 13

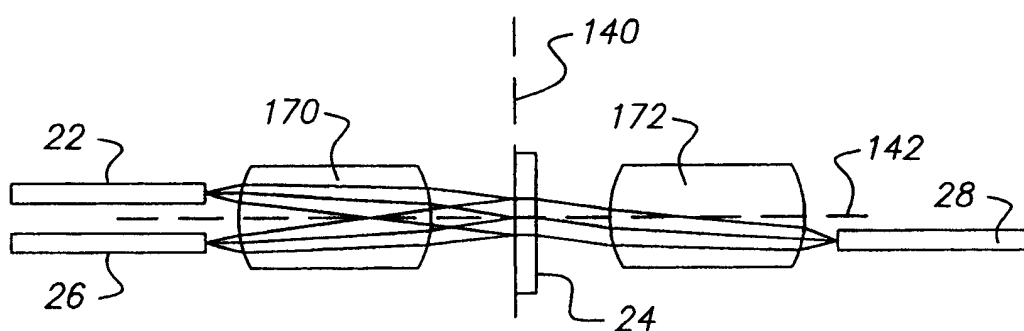


图 14

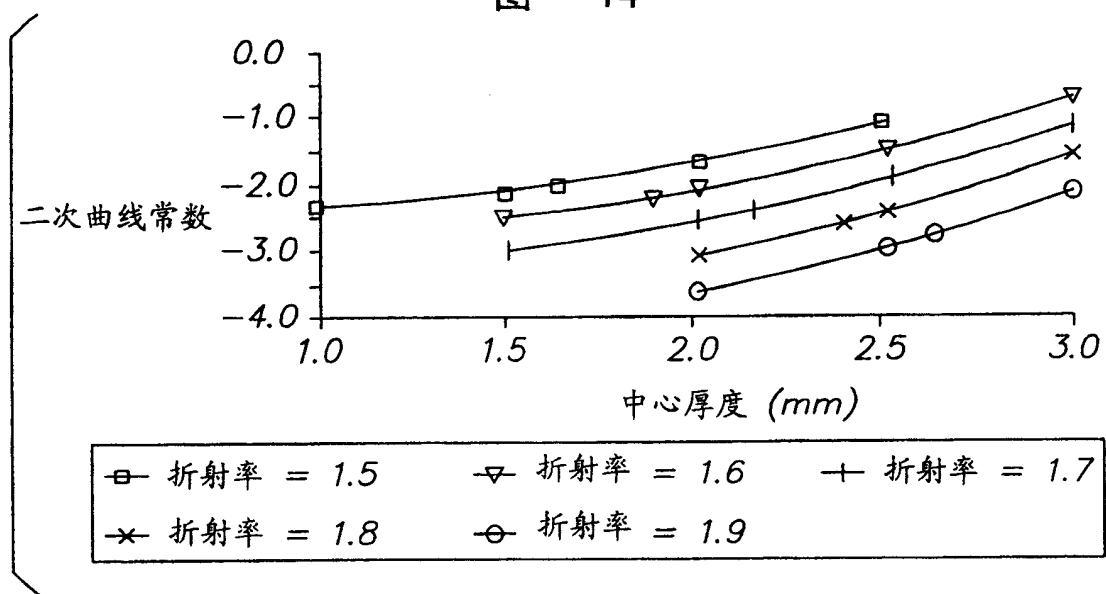


图 15

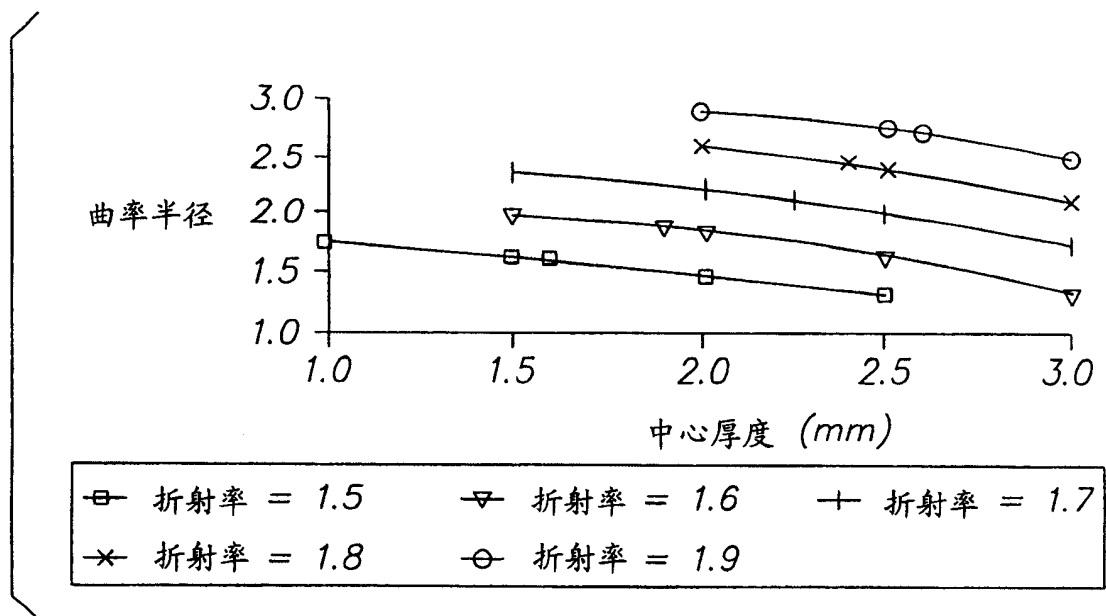


图 16

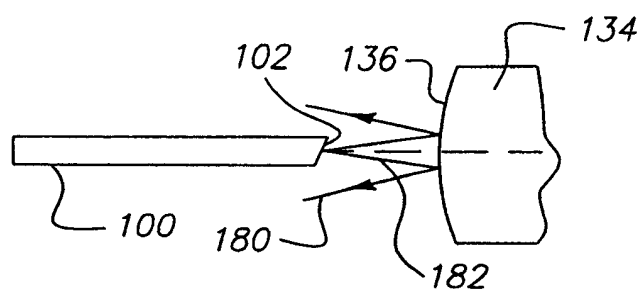


图 17

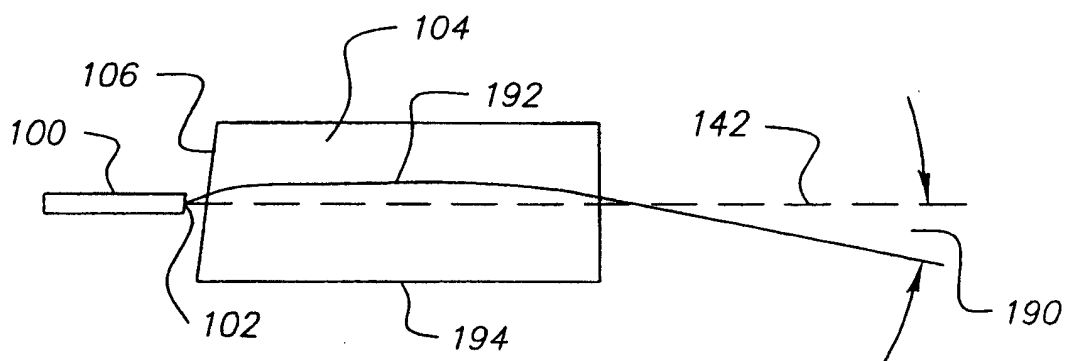


图 18

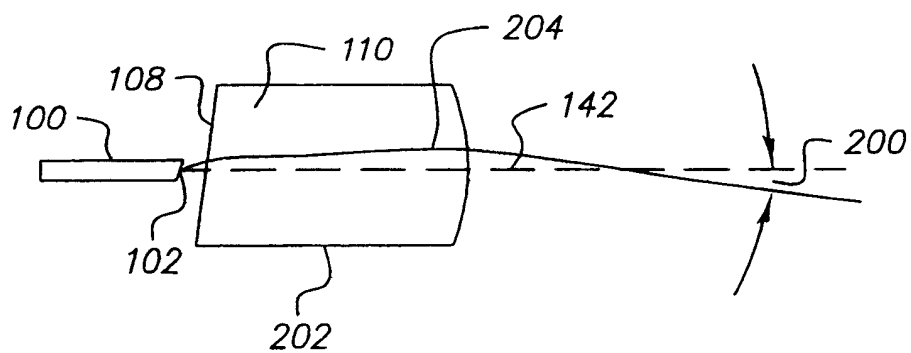


图 19

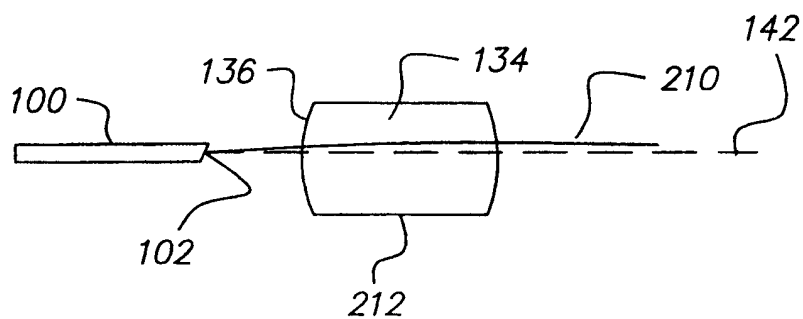


图 20

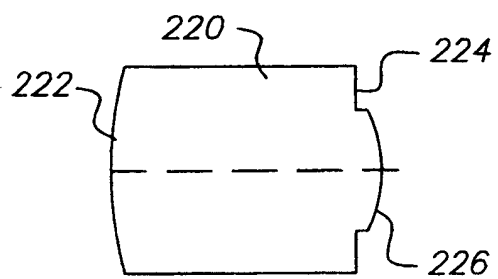


图 21a

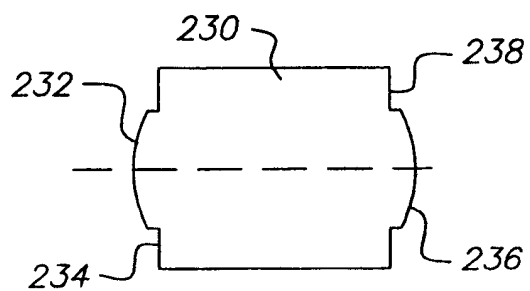


图 21b