[19]中华人民共和国国家知识产权局

[51]Int. Cl[7]
G02F 1/29

# [12]发明专利申请公开说明书

[21]申请号 01111367.7

[43]公开日 2001年9月19日

[11]公开号 CN 1313522A

[22]申请日 2001.3.14 [21]申请号 01111367.7

[30]优先权

[32]2000.3.15 [33]US [31]09/525,512

[71]申请人 朗迅科技公司

地址 美国新泽西州

[72]发明人 戴维·A·阿克曼
理查德·B·柏尔斯玛
罗伯特·L·哈特曼 托马斯·L·科克
格伦·R·考克 马尔科姆·E·莱恩斯
林恩·F·施尼梅尔

[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

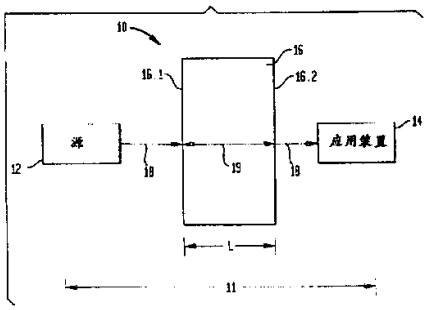
代理人 马 浩

权利要求书5页 说明书11页 附图页数4页

[54]发明名称 利用晶体材料来控制光路的热-光学特性

[57]摘要

在一定温度范围ΔT内,通过确定该光路的品质因数(FOM)以及将一片晶体材料放入该光路中,使得由FOM确定的条件得以满足,来控制光路中的热-光学特性。该晶体材料对于光路中传播的波长λ高度透明,并且具有热膨胀系数(CTE)和折射率n,通过相互调节CTE和n,可在一定范围ΔT内满足FOM的要求。在一个实施例中,标准具的CTE和dn/dT相互补偿,来完成在范围ΔT内对温度不敏感的鉴频功能。在光学标准具的一最佳实施例中,该晶体材料包括$LiCaAlF_6$。




ISSN1008-4274

# 权 利 要 求 书

1、 一种控制光路中一定温度范围内热－光学特性的方法，包括以下步骤:

确定光路的品质因数（FOM);

将一片晶体材料放入该光路中，该材料对于光路上传播的辐射的波长高度透明，并且具有一热膨胀系数（CTE）和随温度变化的折射率（dn/dT），通过相互调节热膨胀系数和随温度变化的折射率来在所述温度范围内满足该 FOM 的要求。

2、 如权利要求 1 所述的发明，其中所述将一晶体材料放入该光路的步骤，包括提供一种晶体材料，其中所述 CTE 和 dn/dT 具有相同的符号。

3、 如权利要求 1 所述的发明，其中所述将一晶体材料放入该光路的步骤，包括提供一种晶体材料，其中所述 CTE 和 dn/dT 具有相反的符号。

4、 如权利要求 3 所述的发明，其中所述将一晶体材料放入该光路的步骤，包括提供一种由 $LiRQF_6$ 组成的晶体材料，其中 R 从 Ca 和 Sr 的组中选择一种或两者都包括，Q 从包括 Ga 和 Al 的组中选择一种或两者都包括。

5、 如权利要求 4 所述的发明，其中所述将一晶体材料放入该光路的步骤，包括提供一种由 $LiCaAlF_6$ 组成的晶体材料。

6、 如权利要求 3 所述的发明，其中所述将一晶体材料放入该光路的步骤，包括提供一种由 $RCO_3$ 组成的晶体材料，其中 R 从 Ca 和 Sr 组中选择一种或两者都包括。

7、 如权利要求 6 所述的发明，其中所述将一晶体材料放入该光路的步骤，包括提供一种由 $CaCO_3$ 组成的晶体材料。

8、 如权利要求 3 所述的发明，其中所述将一晶体材料放入该光路的步骤，包括提供一种由 $RWO_3$ 组成的晶体材料，其中 R 从 Ca 和 Sr 组中选择一种或两者都包括。

9、 如权利要求 8 所述的发明，其中所述将一晶体材料放入该光路的步骤，包括提供一种由 $CaWO_3$ 组成的晶体材料。

10、如权利要求 3 所述的发明，其中所述将一晶体材料放入该光路的步骤，包括提供一种包括卤化 K，Cs 或两者都有的晶体材料。

11、如权利要求 3 所述的发明，其中所述将一晶体材料放入该光路的步骤，包括提供一种由钼酸盐组成的晶体材料。

12、如权利要求 11 所述的发明，其中所述钼酸盐从包括 $PbMoO_4$ 和 $CaMoO_4$ 的一组中进行选择。

13、如权利要求 1 所述的发明，其中所述光路由对温度不敏感的标准具限定，并且所述 FOM 被确定为 CTE=-(1/n)(dn/dT)，其中 n 是所述标准具的晶体材料的折射率。

14、如权利要求 13 所述的发明，其中 dn/dT 在感兴趣的工作范围内对温度和波长比较不敏感。

15、如权利要求 13 所述的发明，其中所述材料从包括 AgCl、$LiCaAlF_6$、$LiIO_3$、$CaCO_3$ 和 $CaWO_4$ 的一组中进行选择。

16、如权利要求 1 所述的发明，其中所述光路由望远镜物平面与像平面限定，物平面与像平面有固定的间距，并在它们之间放置一个透镜，而且所述 FOM 被确定为（n-1）CTE=-dn/dT，其中 n 为所述透镜晶体材料的折射率，CTE 是所述透镜晶体材料的热膨胀系数。

17、如权利要求 1 所述的发明，其中所述光路是在其至少一个位置折叠的光路，所述将晶体材料放入光路的步骤包括将所述晶体材料片放置在所述位置。

18、如权利要求 1 所述的发明，其中所述光路包括长度为 $L_1$、$L_2$ 和 $L_3$ 的第一、第二和第三段，折射率分别为 $n_1$、$n_2$ 和 $n_3$。

19、如权利要求 18 所述的发明，其中所述第三段被放置在所述第一和第二段之间，并且包括所述晶体材料片，所述 FOM 被确定为：

$$FOM_3 = -(n_2 L_2 / n_3 L_3) FOM_2$$

20、如权利要求 19 所述的发明，其中所述第一段包括一个玻璃波导，而且所述第二段包括一个晶体器件。

21、如权利要求 18 所述的发明，其中所述光路包括一个马赫－曾德干涉仪分支，所述第一段在所述分支中包括一个延迟元件，所述第二段在所述分支中包括一个光波导，所述第三段包括所述晶体材料片。

22、一种制品，包括：一个特性为品质因数（FOM）的光路，以及

设置在所述光路中的一片晶体材料，该材料对于光路上传播的辐射的波长是高度透明的，并且具有一热膨胀系数（CTE）和随温度变化的折射率（dn/dT），通过相互调节热膨胀系数和随温度变化的折射率来在一定温度范围内满足所述 FOM 的要求。

23、如权利要求 22 所述的发明，其中所述晶体材料片包括一种晶体材料，其中所述 CTE 和 dn/dT 具有相同的符号。

24、如权利要求 22 所述的发明，其中所述晶体材料片包括一种晶体材料，其中所述 CTE 和 dn/dT 具有相反的符号。

25、如权利要求 24 所述的发明，其中所述晶体材料包括 $LiRQF_6$，其中 R 从 Ca 和 Sr 组中选择一种或两者都包括；Q 从 Ga 和 Al 中选择一种或两者都包括。

26、如权利要求 25 所述的发明，其中所述晶体材料包括 $LiCaAlF_6$。

27、如权利要求 24 所述的发明，其中所述晶体材料包括 $RCO_3$，其中 R 从 Ca 和 Sr 中选择一种或两者都包括。

28、如权利要求 27 所述的发明，其中所述晶体材料包括 $CaCO_3$。

29、如权利要求 24 所述的发明，其中所述晶体材料包括 $RWO_3$，其中 R 从 Ca 和 Sr 组中选择一种或两者都包括。

30、如权利要求 28 所述的发明，其中所述晶体材料包括 $CaWO_3$。

31、如权利要求 24 所述的发明，其中所述晶体材料包括卤化 K、Cs 或两者都包括。

32、如权利要求 24 所述的发明，其中所述晶体材料包括钼酸盐。

33、如权利要求 32 所述的发明，其中所述钼酸盐从 $PbMoO_4$ 和 $CaMoO_4$ 组中进行选择。

34、如权利要求 22 所述的发明，其中所述光路由对温度不敏感的标准具限定，并且所述 FOM 由公式 CTE=-(1/n)(dn/dT)限定，其中 n 为所述标准具的晶体材料的折射率。

35、如权利要求 34 所述的发明，其中 dn/dT 在感兴趣的工作范围内，对温度和波长比较不敏感。

36、如权利要求 34 所述的发明，其中所述材料从 AgCl、$LiCaAlF_6$、$LiIO_3$、$CaCO_3$和 $CaWO_4$组中选择。

37、如权利要求 22 所述的发明，其中所述光路由具有固定间距的望远镜的物平面和像平面限定，而且一透镜设置在物平面与像平面之间，所述 FOM 由公式（n-1）CTE=-dn/dT 限定，其中 n 是所述透镜的晶体材料的折射率，CTE 是所述透镜的晶体材料的热膨胀系数。

38、如权利要求 22 所述的发明，其中所述光路是在其至少一个位置处折叠的光路，所述晶体材料片放置于所述位置。

39、如权利要求 22 所述的发明，其中所述光路包括长度为 $L_1$、$L_2$和 $L_3$的第一、第二和第三段，折射率分别为 $n_1$、$n_2$和 $n_3$。

40、如权利要求 39 所述的发明，其中所述第三段被放置在所述第一和第二段之间，并包括所述晶体材料片，而且所述 FOM 被限定为公式：$FOM_3 = (n_2L_2 / n_3L_3)FOM_2$。

41、如权利要求 40 所述的发明，其中所述第一段包括一个玻璃波导，所述第二段包括一个晶体器件。

42、如权利要求 39 所述的发明，其中所述光路包括一个马赫－曾德干涉仪分支，所述第一段在所述分支中包括一个延迟元件，所述第二段在所述分支中包括一个光波导，所述第三段包括所述晶体材料片。

43、如权利要求 22 所述的发明，其中所述光路被包含于一温度传感器中，并且所述晶体材料包括 PbS。

44、一种工作于一定温度范围内的 WDM 光学发射器，包括：

一个源，用于以多种不同波长中任意一个波长产生一输出信号；

一个温度控制器，用于将所述源的波长调谐到所述波长中的预定一个；

一个反馈环，包括一个用来将所述源的波长稳定在上述预定波长上的鉴频器，所述鉴频器包括一个标准具，其特征为：

所述标准具具有 FOM，而且

所述标准具包括一片晶体材料，该晶体材料对于上述预定波长的辐射是高度透明的，并且具有 CTE 和 dn/dT，通过相互调节 CTE 和 dn/dT，以在所述温度范围内满足所述 FOM 的需要。

45、如权利要求 44 所述的发明，其中所述 FOM 等于 CTE+(1/n)(dn/dT)。

46、如权利要求 45 所述的发明，其中 dn/dT 在感兴趣的工作范围内对温度和波长比较不敏感。

47、如权利要求 46 所述的发明，其中所述的标准具实质上对温度不敏感，而且所述 FOM 实质上为零。

48、如权利要求 47 所述的发明，其中所述晶体材料包括 $LiRQF_6$，其中 R 从 Ca 和 Sr 组中选择一种或两者都包括；Q 从 Ga 和 Al 组中选择一种或两者都包括。

49、如权利要求 48 所述的发明，其中所述材料为 $LiCaAlF_6$。

01.03.14

# 说　明　书

## 利用晶体材料来控制光路的热－光学特性

本发明一般涉及光学装置和系统，更具体地说，涉及控制这类装置和系统内光路的热－光学特性。

通常，光学装置的特性对它的温度变化敏感。例如，半导体激光器的输出波长、输出光功率和电流阈值对温度敏感。与此相似，在半导体或玻璃波导中，光学模式的传播常数也随温度而变化。一般，在光学装置和系统的设计中要考虑这种热致漂移，至少要考虑对于该装置/系统的正常运行非常重要的参数的热致漂移。

例如，考虑目前成幂指数飞速发展的光网络。通过大量扩展可在单光纤上传送的信息量，新型高密度波分复用（DWDM）系统的设计和发展对带宽的充分利用产生深远的影响。因为这类系统是新的，其大部分增长发生在最近几年中，所以有可能产生子系统，以改善或者简化 DWDM 网络的操作。一种提供上述改进和/或简化的方法是在一定工作范围ΔT 内，控制系统元件的热－光学特性。

在 DWDM 系统中，信道波长以最小间隔集合在一起。因此，激光器（用做载波信号源）输出波长的任何重大的漂移都是一个严重的问题。波长漂移的一种原因是激光器的老化。由于老化所导致的波长改变，可以采用热电冷却器/加热器（TEC）通过改变激光器的温度来校正。虽然每个激光器的波长可由用作鉴频器的标准具来控制，但是标准具的光程长度也是对温度敏感的。因此，如果这两个装置处于同一成套装置中，改变激光器的温度可能也会改变标准具的温度。然而，还有其它的现象可以影响到标准具的温度，因而影响到它的光程长度。例如：（1）用来将激光器维持在一预定温度和预定输出波长的温控电路的老化；（2）由于 TEC 一般位于该标准具的基部，在标准具中会产生温度梯度。

从而，在鉴频器技术中需要一种标准具，它在光学系统相应的温度操作范围内对温度不敏感。

在光学系统中，通常还需要能够控制光程的热－光学特性，例如用一个参数补偿或平衡另一个参数，或者增强一个选定的参数。后者可应用在温度传感器中，而前者不仅应用于上述的标准具中，还应用在从望远镜到马赫－曾德干涉仪等光学装置的广阔的波谱领域中。

根据本发明的一个方面，一种在温度范围ΔT 内控制光路的热－光学特性的方法，包括以下步骤：确定光路的品质因数（FOM）；将一片晶体材料放入该光路中，以满足由该 FOM 确定的条件。该晶体材料对于光路中传播的辐射的波长λ具有高度透明性，并且具有一热膨胀系数（CTE）和折射率 n，以通过相互调节 CTE 和 dn/dT 而在该温度范围ΔT 内满足 FOM。在一个实施例中，标准具的 CTE 和 dn/dT 相互补偿，以便实现频率鉴别，该频率鉴别在温度范围ΔT 内实质上对温度不敏感。在光学标准具的一最佳实施例中，该晶体材料包括 $LiCaAlF_6$。

根据本发明的另一方面的制品（例如装置，设备，子组件，子系统，系统）包括：一个光路，波长为λ的辐射在该光路上传播和被处理；一片晶体材料，使由 FOM 确定的条件可以被满足。该晶体材料对于光路中传播的辐射的波长λ高度透明，并且具有一热膨胀系数（CTE）和折射率 n，通过相互调节 CTE 和 dn/dT，可在范围ΔT 内满足 FOM。在一个实施例中，标准具的 CTE 和 dn/dT 相互补偿，以便完成频率鉴别，该频率鉴别在范围ΔT 内实质上对温度不敏感。在该标准具的一最佳实施例中，该晶体材料包括 $LiCaAlF_6$。

参照附图通过下述更详细的描述，能够被很容易地理解本发明，以及它的多种特点和优点。其中：

图 1 是根据本发明的制品的示意性方框图，该制品包括一个可以被用作频率鉴别器的标准具；

图 2 是标准具作为温度函数的梳状频率特性曲线的示意图；

图 3 是根据本发明另一实施例的光学组件装配示意图，包括一个

耦合到一个光栅的半导体激光器;

图 4 是根据本发明另一实施例的马赫-曾德干涉仪的示意图;

图 5 是根据本发明又一实施例的光学组件装配的示意图，包括一个折叠的光路;

图 6 是根据本发明又一实施例的望远镜的示意图;

图 7 是 $LiCaAlF_6$ 标准具作为温度函数的传输特性曲线;

图 8 是现有技术中，熔融硅标准具作为温度函数的传输特性曲线;以及

图 9 是根据本发明的一个实施例的光发送器的方框图。

为了清晰和简化，图 1-6 和图 9 没有按比例绘制。

参照图 1，制品 10（例如装置、设备、组件装配、子系统、系统，等等）包括一个由辐射源 12 确定的光路 11，一个应用装置 14 和一种将它们相互耦合的传输媒质 18。根据本发明的一个方面，定义了光路的品质因数（FOM），将一片晶体材料 16 放置在光路中，使该 FOM 得到满足。更具体地，该晶体材料对于光路 11 上传播的波长λ高度透明，并且它有热膨胀系数（CET）和折射率 n，通过相互调节 CET 和 dn/dT，可在范围ΔT 内满足 FOM。

通常，源 12 可能包括有源器件（例如半导体激光器）或无源器件（例如能传播光辐射信号的光波导或可以反射或散射光辐射的晶体材料片），或者有源与无源器件的组合。同样的，应用装置 14 可能包括光电探测器，光接收器，光波导，光频隔离器，光耦合器或多路复用器，终端装置，或它们的组合。另一方面，传输媒质 19 可能包括，如空气路径，光纤，或集成光波导（例如硅光具座或半导体技术中的平面型波导）。

图 9 所示为含有这类元件的一种典型的光发送器 90。可调谐源 92 通过光纤 91 耦合到应用装置 94。激光器输出的一部分被耦合器 93 分流，来为鉴频器 96 提供输入。正如本技术中所众所周知的，后者包括一个标准具，来作为主要的滤波元件。鉴频器的输出被提供给一微处理器 98，产生一个误差信号来控制源 92 的波长（例如，通过温度和/

或它的驱动电流）。因而，该耦合器，鉴频器和微处理器组成一个反馈回路，控制源波长。此类发射器，在由 D.A.Ackerman 于 1999 年 6 月 6 日申请的序列号为 NO.09/330,389 的，共同悬而未决的专利申请中，有更详细的描述。该申请被转让给了本申请的受让人，在此引入作为参考。

光学标准具实施例

参照图 1，制品 10 具有频率鉴别功能；也就是源 12 一般包括一个半导体激光器，应用装置 14 一般包括一个作为光接收器一部分的光探测器，传输媒质是空气，以及提供给标准具的一片晶体材料 16。正如本领域中众所周知的，标准具包括必须呈平行的输入和输出面 16.1 和 16.2，组成长度为 L 的谐振腔。这些表面一般被镀膜，来部分透过、部分反射来自源 12 的辐射。当该辐射通过输入表面 16.1 耦合进该标准具时，形成驻波结构，如双箭头 19 所示。并且，该标准具的传输特性表现为图 2 所示的众所周知的梳状函数特性。因此，只有在一定的波长处，通过该标准具的辐射有最大透射值，这些波长间隔为 c/2nL，其中 c 是光在真空中的速度，n 是晶体材料体 16 的组折射率，L 在这里是沿辐射传播方向测量的两个表面的间隔。当波长处于两个最大值之间时，通过标准具的辐射量急剧减少。

因此，光学标准具在与标准具传输特性的那些最大值不一致、或基本不一致的波长处完成滤波，这可以用来稳定源 12 的波长。然而，标准具可能会因为温度的变化，而导致传输特性的漂移，如图 2 所示。在此，当标准具的温度从 $T_1$ 增加到 $T_2$ 时，标记为 $T_1$ 的曲线向更长波长处漂移（标记为 $T_2$ 的曲线）。与此相似，温度的降低将导致曲线向更短波长漂移。这种温度的改变可能有多种原因。例如，标准具所处系统的环境温度可能由于自然原因（例如天气）而改变，或作为波长调谐协议（例如在 WDWM 系统中）的一部分，激光器（通常与标准具处于同一成套装置中）的温度可能被有意地改变，可以导致标准具温度的变化，或者温度控制电路在缓慢的老化或突然变化时可能会效果不好。在任何情况下，标准具传输特性的温致漂移都是我们所不期

望的，因为显著的偏移可能会导致系统性能降到系统技术规范以外的水平。

根据本发明的一个实施例，标准具中由于热膨胀产生的光程长度的变化被热致折射率变化 dn/dT 平衡，或基本平衡，即该标准具对温度不敏感。我们用光程长度 $L_0$ 的公式来表达这种平衡，为：

（1） $L_0 = nL$

其中，此处的光程只是标准具自身限定的光路段（不是图 1 所示整个光路 11）。然后，我们对公式（1）关于温度求导；得出：

（2） $dL_0 / dT = n(dL / dT) + L(dn / dT)$

（3） $nL[(1/L)(dL/dT) + (1/n)(dn/dT)]$

但是，通过定义，

（4） $CTE = (1/L)(dL/dT)$

得到：

（5） $dL_0 / dT = nL[CTE + (1/n)(dn/dT)]$

最后，我们定义 FOM 为光程长度关于温度的相对变化，为：

（6） $FOM = (1/L_0)(dL_0/dT)$

将公式（1）和（5）代入公式（6），我们得到：

（7） $FOM = CTE + (1/n)(dn/dT)$

单位为 ppm/K（即每开氏温度百万份之一）。对于对温度不敏感的标准具晶体材料，FOM=0，这样公式（7）就简化为：

（8） $CTE = -(1/n)(dn/dT)$

因而，在理想条件下，晶体材料的 CTE 与(1/n)(dn/dT)应该具有相同的辐值，符号相反。然而，取决于系统条件，非完全相等也是可以接受的。另外，在标准具一给定工作波长范围Δλ内，该材料应该具有高度透明性，并且 dn/dT 应该对温度和波长比较不敏感；即 d/dT(dn/dT)和 d/dλ(dn/dT)在感兴趣的工作波长范围内必须为常数。

考虑工作波长处于 1-2μm 范围内的实例系统，它包括工作在 InP/InGaAsP 半导体激光器所产生的 1300nm 和 1550nm 波长的系统。在这种情况下，希望标准具晶体材料具有超过 90%的透明度。在这种

标准具的一个实施例中，FOM 应该远远小于熔融硅（也写作 a-$SiO_2$）的 FOM，熔融硅是现有技术中典型的标准具材料。我们测量了熔融硅，它的 FOM 大约为 6.25ppm/K。因此，最好应该选择 FOM 小于大约±2 ppm/K 的晶体材料 。

对于这类材料的大部分应用，理想条件下该材料应该具有各向同性的特性（例如非晶态或立方对称的晶态结构）。然而，如果不能满足这种理想情况，那么下一个最佳条件是材料在单轴晶系中结晶（如正方晶系和六角晶系）来减少从源 12 入射到标准具的辐射的双折射效应。通常，对寻常光线 FOM 值相当低的单轴晶体，被取向为主轴与传播方向一致，在这种情况下，不考虑偏振态。然而，双轴晶体和对非常光 FOM 值相当低的单轴晶体，被取向为最佳 FOM 的方向沿传播方向，如果源的偏振态预先可知的话（例如对于半导体激光器，可能被设计为 TE 偏振），则副轴沿偏振方向来减少双折射效应。适宜的晶体材料包括 $LiCaAlF_6$ 和 $CaWO_4$，将在以下题为晶体材料的部分进行讨论。然而，如果源的偏振态预先不可知（例如对于标准光纤），那么晶体最好对偏振没有依赖性。然而对于某些应用，在源产生偏振辐射的条件下，这个限制可以放松。

另一实施例

下面，我们考虑包括两种或多种不同材料的光路的情况，通过材料的选定，使得光路具有一个预先确定的热－光学特性，它包括光路对温度不敏感这种特殊情形。例如，假定光路包括 3 种不同的材料 M1，M2 和 M3，分别具有有效折射率 ni 和长度 Li（i=1,2,3）。对该装置的一个特殊的要求是这三种材料光程长度的热致变化等于腔长为 L1，材料为 M1 时的热致变化。通过上述分析计算 FOM，可见材料 M3 的特性可由下式表示：

（9） $$FOM_3 = -(n_2 L_2 / n_3 L_3) FOM_2$$

其中，$FOM_2$ 为：

（10） $$FOM_2 = (n_2 L_2)^{-1} d / dT(n_2 L_2)$$

图 3 所示为这种装置的图解，它描绘了包括一半导体激光器 52（相

应于材料 M1）的光学子系统 50，该半导体激光器通过一补偿晶体层 54（相应于材料 M3）耦合到玻璃光栅 56（相应于材料 M2），该补偿晶体层处于半导体激光器与玻璃光栅之间。与之相似的一种子系统，包括设置在硅波导（例如硅光具座技术中使用的集成波导）与石榴石基质（例如用于光频隔离器的法拉第旋转器）之间的补偿层，在此没有给出该子系统的附图。

图 4 给出了本装置的另一个图解，它描绘了马赫－曾德干涉仪 40，在它的一个臂或分枝中包括一个波导 42（相应于材料 M1），一个延迟元件 44（相应于材料 M2）和一个设置在其中的补偿层 46（相应于材料 M3）。

与前面介绍的所有元件都串联在一起的实施例不同，本发明的另一个实施例包括一个折叠光路，如图 5 所示。在这里，光路的一部分包括一个光波导 22，将适宜的晶体材料设置在波导 22 一端 22.1 的一个热－光学补偿层 26，和一个设置在该补偿层 26 之上的反射层 28。来自于图中没有给出的源的入射光束 21，被耦合进波导 22 的另一端 22.2，沿着该波导传播并穿过补偿层 26，被反射层 28 反射回层 26，并进入波导 22。光束从端 22.2 射出。用光束 21 上的双箭头表示这种双向传播特性。使用与以上相似的分析，能够计算出该折叠光路的 FOM，并选择材料层 26 使光路具有所需的热－光学特性。

系统或子系统中的光路可能包括构成自由空间路径的部分，在该光路中设置一个补偿材料，可使整个光路对温度不敏感或具有其它所需的热－光学特性。作为一种特殊的情况，考虑图 6 所示的望远镜，温度不敏感光路从空间中固定的一个点，通过一个光学元件，扩展到空间中另一个固定点。在这里，透镜 36 被放置在物平面 32 和像平面 34 之间，物平面与像平面有固定的间距。然而，透镜 36 包括根据本发明的一种晶体材料。更特别地，假定使用本领域所公知的技术，整个光路的热致变化被设定为零或接近为零，那么

$$L_{a1}+L_{a2}+L_1=L=\text{常数} \qquad (11)$$

进一步假设 $n_a=1$ 和 $dn_a/dT=0$，则可以将透镜晶体材料的 FOM 定

义为下式:

（12） $(n_1-1)CTE_1=-dn_1/dT$

其中 $n_1$ 和 $CTE_1$ 是透镜晶体材料的折射率和 CTE。

晶体材料

下表给出了可应用于本发明不同实施例的晶体材料种类，材料种类取决于特定的应用；例如取决于工作波长，元件采用的偏振状态，所需的补偿度。例如，表中所列的所有材料，除 PbS 和 $ZnGeP_2$ 以外，均适用于工作波长大约在 1.2~1.7μm 范围内的通信系统，但是对于标准具应用而言，最好是那些 FOM 大约为±2ppm/K 范围内的材料；也就是，最好是 AgCl、$LiCaAlF_6$、$LiIO_3$、$CaCO_3$ 和 $CaWO_4$。考虑到其它需要考虑的情况，比如处理、稳定性和水溶性，可知那些 FOM 值略大的材料将优于 FOM 值略小的材料。例如，$LiCaAlF_6$ 的 FOM（绝对值）不是最小的，然而它是目前最好的材料，因为它稳定、不受水蒸气的影响、对光不敏感和容易加工。$LiCaAlF_6$ 的 FOM 为-2.3（计算值）和-1.55（测量值）。该组中所有其它材料具有较小的 FOM（绝对值）。

下表中 FOM 从已有文献中的数据计算而来。是在室温条件下可见光波长处所测量的数据。然而，我们希望在一般的工作范围（例如-40°C 到+85°C）内的其它温度时，FOM 值没有明显的漂移。这种预示部分上是建立在承认带隙能大于 1.5eVdn/dT 的材料在接近紫外线波长处趋向于对温度和波长更加敏感的基础上，相反的，在近红外区敏感性降低。

为了进行对比，表中包括现有技术中的标准具材料（$a\text{-}SiO_2$ 或熔融硅）。

| 材料 | 取向 | n | dn/dT (ppm/K) | CTE (ppm/K) | 计算出来的 FOM (ppm/K) |
|---|---|---|---|---|---|
| AgCl | 各向同性 | 2.002 | -61 | 31 | 0.5 |
| NaBr | 各向同性 | 1.615 | -30 | 42 | 23.4 |
| KBr | 各向同性 | 1.537 | -39 | 39 | 13.6 |
| CsBr | 各向同性 | 1.669 | -87 | 47 | -5.1 |
| NaCl | 各向同性 | 1.555 | -34 | 41 | 19.1 |
| KCl | 各向同性 | 1.475 | -36 | 36 | 11.6 |
| CsCl | 各向同性 | 1.620 | -77 | 45 | -2.5 |
| $LiCaAlF_6$ | 寻常 | 1.386 | -4.6 | 1.0 | -2.3 |
| $LiSrAlF_6$ | 寻常 | 1.401 | -4.0 | -9.0 | -11.9 |
| $LiNbO_3$ | 寻常 | 2.214 | 4.4 | 14.8 | 16.8 |
| $LiIO_3$ | 寻常 | 1.852 | -94 | 50 | -0.8 |
| $CaCO_3$ | 非寻常 | 1.480 | 10.5 | -5.8 | 1.3 |
| $PbMoO_4$ | 寻常 | 2.140 | -75 | 20 | -15.0 |
| $CaMoO_4$ | 寻常 | 1.945 | -9.6 | 12 | 17.1 |
| $CaWO_4$ | 寻常 | 1.898 | -10.2 | 6 | 0.6 |
| PbS | 各向同性 | 4.100 | -2100 | 19 | -463 |
| $ZnGeP_2$ | 寻常 | 3.167 | 151 | 15.9 | 63.6 |
| 石英 $SiO_2$ | 寻常 | 1.542 | -5.5 | 7.1 | +3.5 |
| a-$SiO_2$ | 各向同性 | 1.460 | 10.0 | 0.5 | 7.3 |

从这个表中，我们得到以下结果:

（1） 卤化物固溶体: FOM 值在 KBr 和 CsBr 之间、KCl 和 CsCl 之间从正变到负。因此，我们希望对于固溶体 $K_{1-x}Cs_xCl$ 或 $K_{1-x}Cs_xBr$（$0 \le x \le 1$），如标准具应用中所需，FOM 应该可调谐到零，或者对于-5 到 14 之间的任何其它 FOM 值，可能被其它应用所需要。与前面相似

的说明适合于表中所列其它卤族的组合物；即 AgCl，NaBr 和 NaCl。

（2） 钼酸盐固溶物：如同上述的卤化物，在 $CaMoO_4$ 和 $PbMoO_4$ 之间，FOM 从正变到负，因而允许 $Ca_xPb_{1-x}MoO_4$（$0 \le x \le 1$）固溶物被处理成标准具应用中所需的零值 FOM，或其它应用所需的-15 到+17 间任何其它 FOM 值。然而，这些单斜晶结构（非单轴）晶体材料只能应用于对偏振的控制不重要的应用中。

（3） $RCO_3$：在这种碳酸盐材料中，R 可从 Ca 和 Sr 中选择一种元素或这两者都包括。碳酸钙 $CaCO_3$ 在非常方向时具有一个小的 FOM 值 1.3，其中小的负 CTE 值-5.8 几乎平衡小的正 dn/dT 值+10.5。Sr 可以置换一部分 Ca 来将该碳酸盐的 CTE 和 dn/dT 设计成所需的数值。

（4） $LiRQF_6$：在这些纯化合物材料中，参数 R 可从 Ca、Sr 中选择一种元素或两者都包括，Q 可从 Al 和 Ga 中选择一种元素或两者都包括。最好该材料包含 $LiCaAlF_6$，一种结晶成六角结构的绝缘氟化物。在 $LiCaAlF_6$ 中，小的正 CTE 值 1.0 几乎被小的负 dn/dT 值-4.6 平衡，导致 FOM（计算值为-2.3，测量值为-1.55）明显的小于寻常方向（沿四角和六角系统中结晶主轴）的非晶态（熔融）$SiO_2$（计算值为 7.3，测量值为 6.25）的 FOM 值。因而 $LiCaAlF_6$ 是用于 1.2-1.7μm 波长范围内通讯系统中标准具最好的材料。图 7 给出了 $LiCaAlF_6$ 温度不敏感标准具应用的功效，它给出了 1548-1550nm 范围内不同波长和 25-55°C 范围内不同温度处辐射通过标准具的透射强度。该族曲线表明，随着温度的增加传输曲线向短波长处偏移，偏移量为-0.072nm/30°C（-0.3GHz/K）。相反，熔融硅标准具显示出更大的偏移量（0.29nm/30°C=1.2 GHz/K），并且如图 8 所示，该偏移朝向长波长方向。与之相比，在这种材料中用 Sr 代替 Ca 得到 Li Sr $AlF_6$，它具有的更大的负 FOM 值-11.9。

（5） $LiRR'QQ'F_6$：在稍微改变 $LiCaAlF_6$ 成分的基础上（例如用少量的 R'=Sr 替换 R=Ca 和/或 Q'=Ga 替换 Q=Al）形成固溶体，我们希望能够将偏移量减少到零，这是温度不敏感性标准具所需的特性。

因此，向材料中加入的 Sr 和/或 Ga 将使材料的 FOM 对于标准具应用最佳，和/或被设计对其它的应用最佳。

（6） $LiIO_3$：在这种材料中，有一个相当大的负 dn/dT 值（-94）几乎平衡掉产生 FOM 值为-0.8 的一相当大的正 CTE 值（50）。

（7） 晶态 $SiO_2$：这种材料也被称为石英 $SiO_2$，但不是熔融的，非结晶型，通过计算 FOM 为 3.5，而测量值为 8.8。

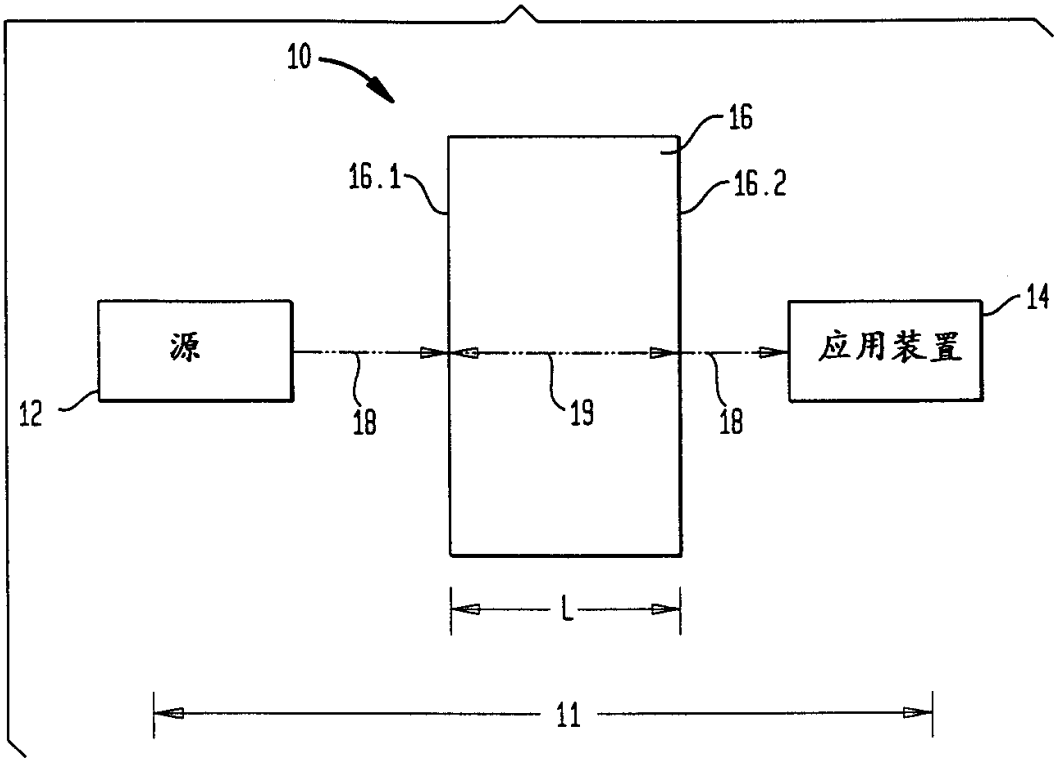
（8） 硫化铅：因为大的负 dn/dT 值-2100，PbS 具有大的负 FOM 值-493。因此，这种材料预计可以用于温度传感应用。

（9） $ZnGeP_2$：因为大的正 dn/dT 值（151）和正 CTE（15.9），这种材料有大的正 FOM 值（63.6）。因此，预计这种材料也可以用于温度传感应用中。

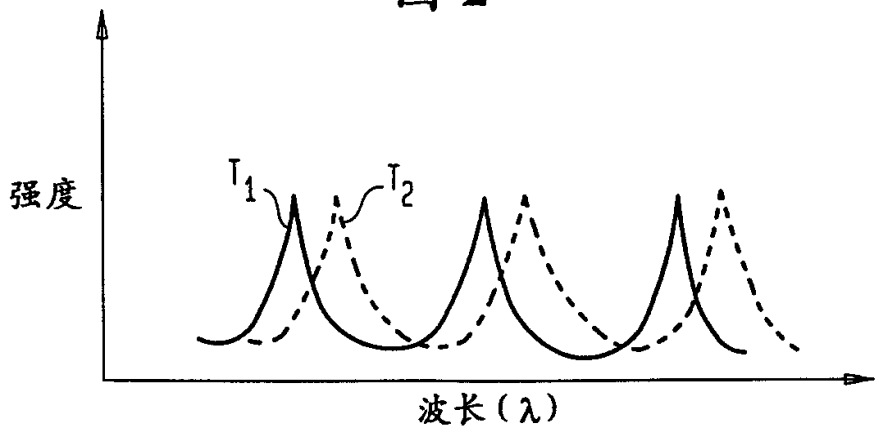
可以理解，上述装置仅仅是能够体现本发明原则的多种特定实施方式的说明。根据这些原则，本领域技术人员在不背离本发明精神的条件下，可以设计出大量的多种多样的装置。特别是，折射率可以包括均匀的简单折射率 n，单层物和多层和/或非均匀晶体材料片（例如多层波导）的更加复杂的有效折射率 $n_{eff}$。

# 说 明 书 附 图

## 图 1




## 图 2




## 图 3

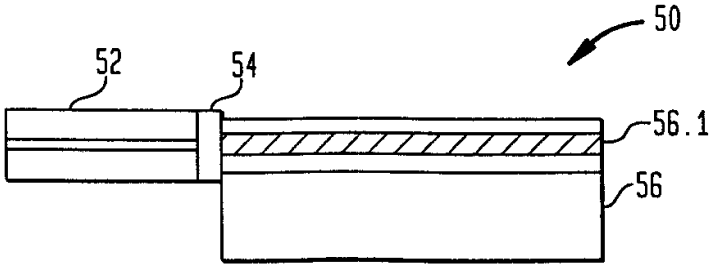


图 4

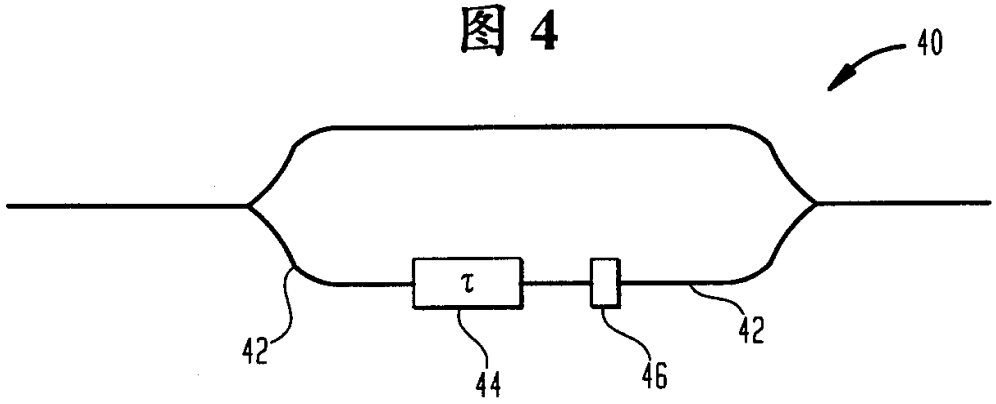



图 5

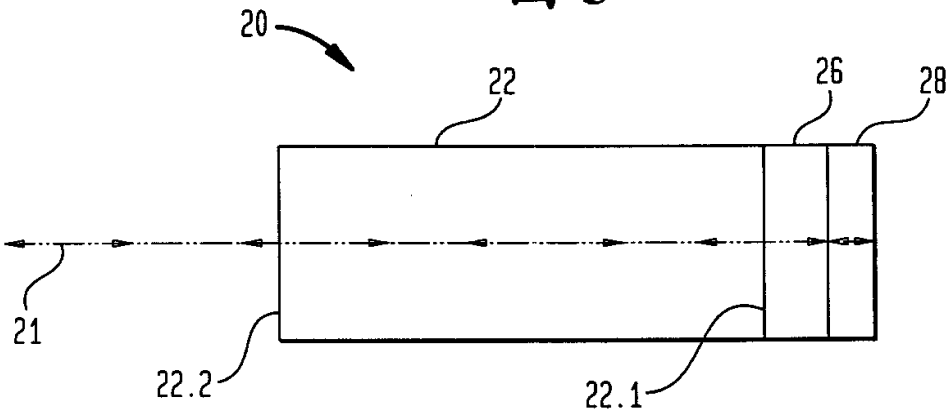



图 6

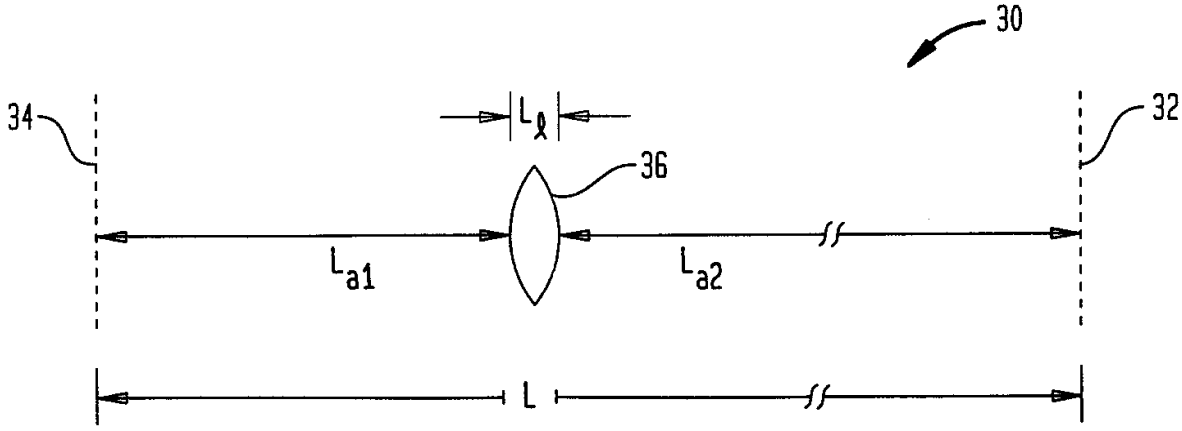


图 7

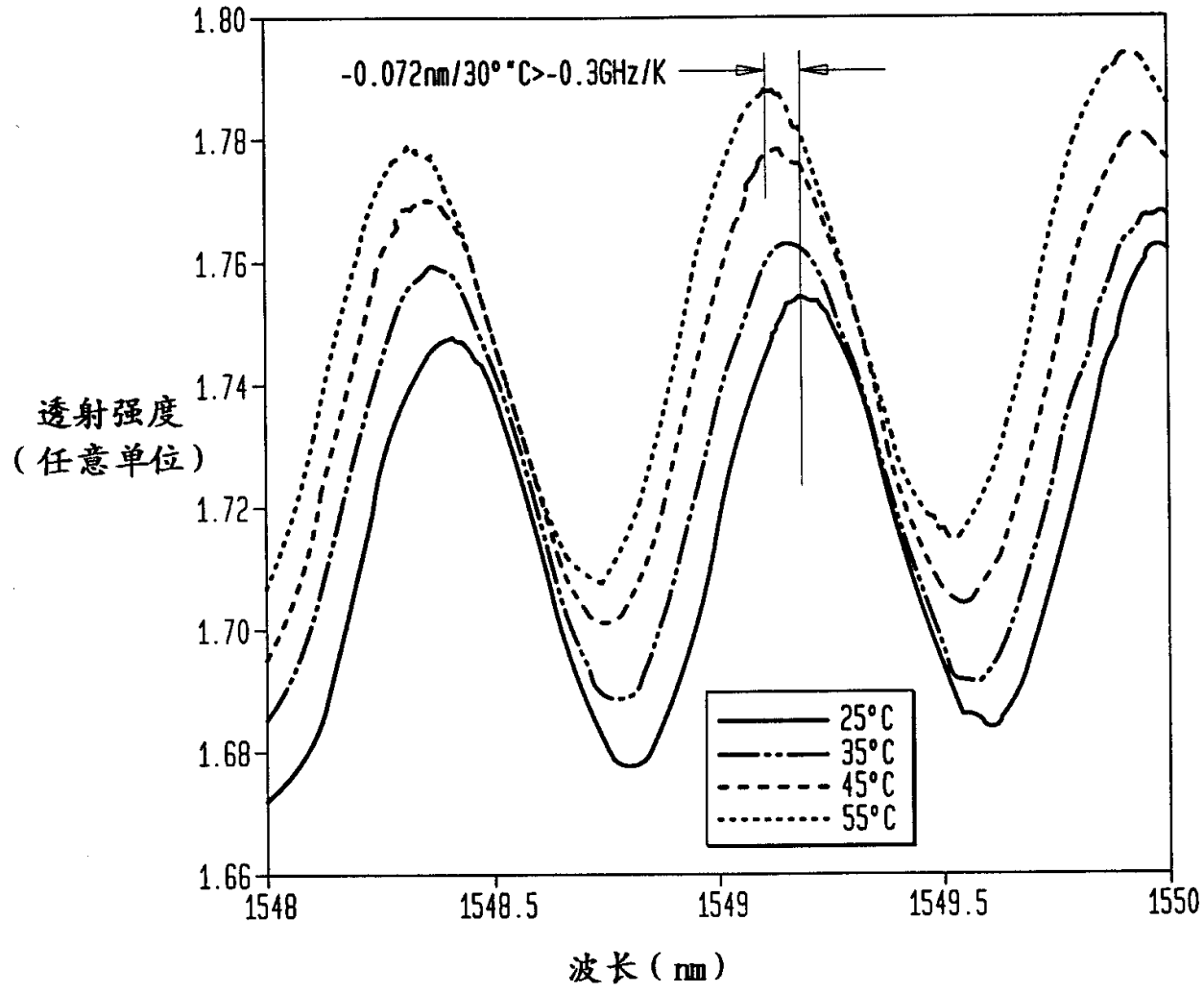

-0.072nm/30°C>-0.3GHz/K
1.80
1.78
1.76
1.74
1.72
1.70
1.68
1.66
透射强度
（任意单位）
1548
1548.5
1549
1549.5
1550
波长（nm）
25°C
35°C
45°C
55°C

图 8

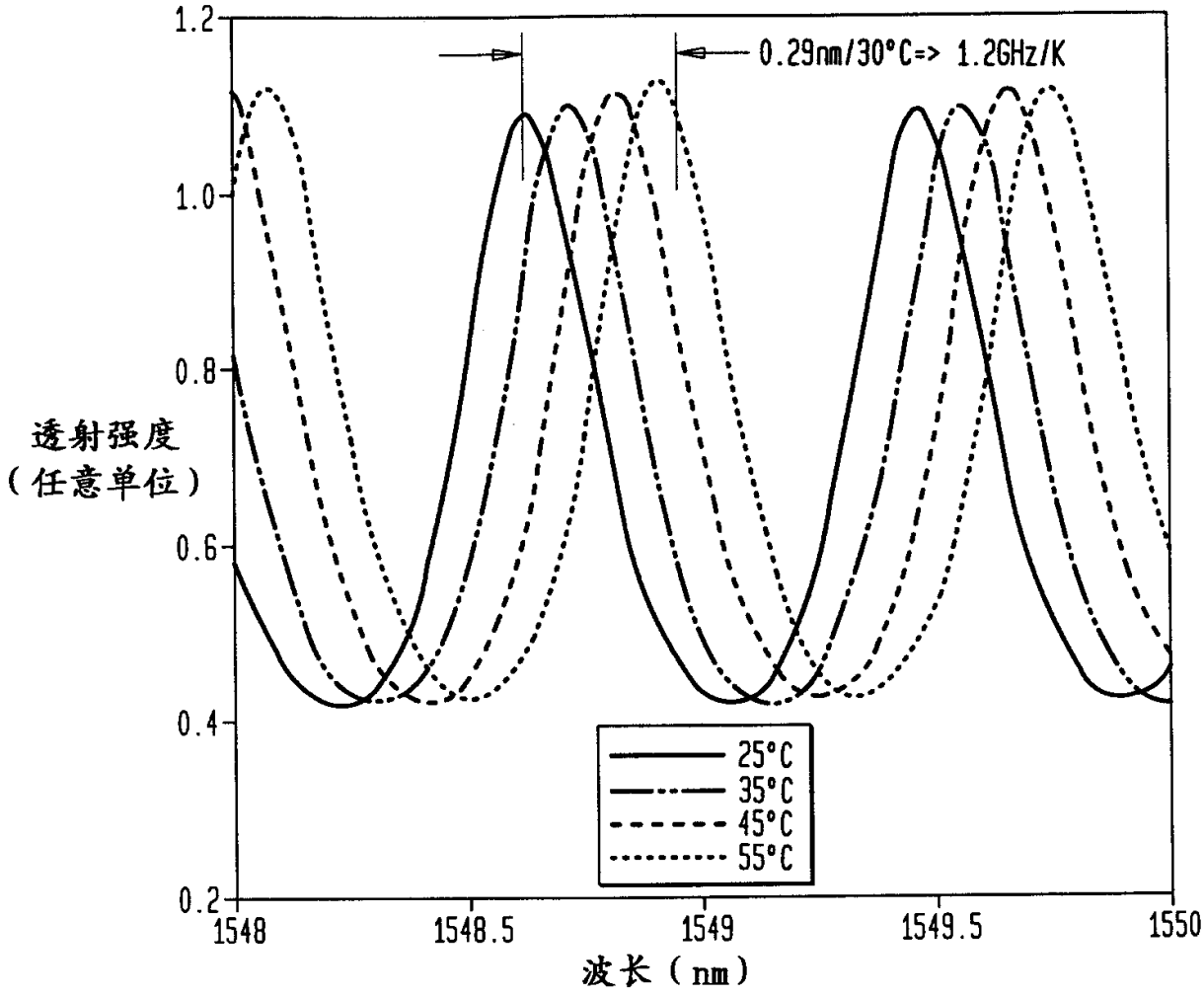
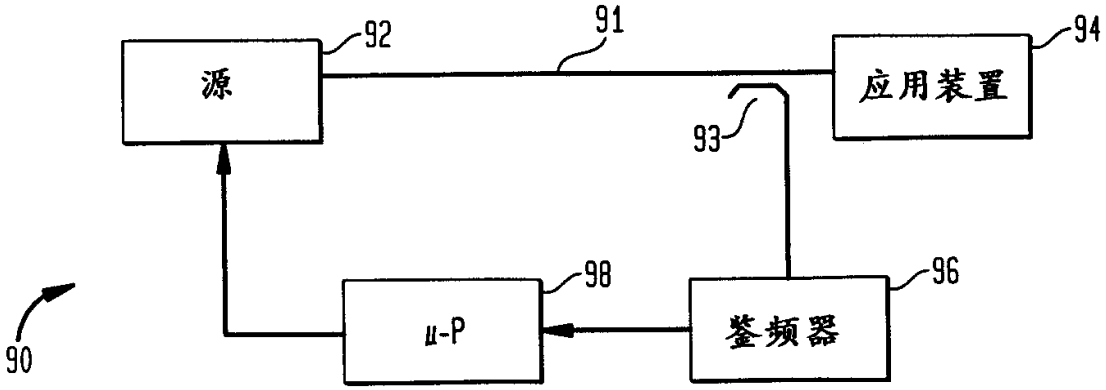

0.29nm/30°C=> 1.2GHz/K
透射强度
（任意单位）
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
1548
1548.5
1549
1549.5
1550
波长（nm）
25°C
35°C
45°C
55°C

图 9


源
92
91
应用装置
94
93
98
μ-P
96
鉴频器
90