



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104603592 B

(45)授权公告日 2018.01.26

(21)申请号 201380030307.X

(22)申请日 2013.06.06

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104603592 A

(43)申请公布日 2015.05.06

(30)优先权数据
12171002.4 2012.06.06 EP
61/656,051 2012.06.06 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2014.12.08

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/EP2013/061701 2013.06.06

(87)PCT国际申请的公布数据
W02013/182643 EN 2013.12.12

(73)专利权人 丹麦技术大学

地址 丹麦灵比

(72)发明人 K·雷克 C·厄斯特高 O·汉森
E·V·汤姆森

(74)专利代理机构 隆天知识产权代理有限公司
72003

代理人 张浴月

(51)Int.Cl.
G01L 11/02(2006.01)
G01L 1/24(2006.01)

审查员 李文娟

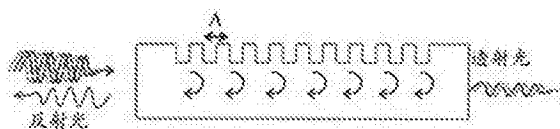
权利要求书2页 说明书15页 附图13页

(54)发明名称

MEMS光学传感器

(57)摘要

本发明涉及一种利用波导的有效折射率调制和对反射光的波长移位的检测的全光学传感器,以及一种容纳所述光学传感器的力感测系统。本发明的一个实施方案涉及一种传感器系统,所述传感器系统包括:至少一个多模光源;一个或多个光学传感器,其包括容纳分布式布拉格反射器的多模传感器光学波导;至少一个发射光学波导,其用于将来自所述至少一个光源的光引导到所述一个或多个多模传感器光学波导;检测器,其用于测量在所述一个或多个多模传感器光学波导中从所述布拉格反射器反射的光;以及数据处理器,其适于分析所述反射光的至少一个高阶模的布拉格波长的变化。



1. 一种光学传感器,包括传感器芯片,所述传感器芯片包括:
 - 空芯波导,包括至少一个分布式布拉格反射器,
 - 一个或两个或多个实芯波导,邻近所述空芯波导布置,并被配置为耦合元件以将光耦合入和/或耦合出所述空芯波导的空芯,以及
 - 至少一个偏转元件,被配置为在受到力作用时改变所述空芯波导的几何结构和/或尺寸。
2. 如权利要求1所述的光学传感器,其中所述实芯波导具有平板状或带状或肋状几何结构。
3. 如权利要求1所述的光学传感器,其中所述至少一个偏转元件被配置为在受到力作用时改变所述空芯波导的几何结构和/或尺寸,其中所述力产生于压力、位移、应变、温度、加速度、速度、旋转、扭矩、液体流动和/或温度。
4. 如权利要求1所述的光学传感器,其中所述空芯波导和实芯波导由两个粘结衬底制成。
5. 如权利要求4所述的光学传感器,其中所述衬底从硅衬底,二氧化硅衬底和熔融二氧化硅衬底的组中选出。
6. 如权利要求4所述的光学传感器,其中所述实芯波导由所述衬底中的一个上的至少三个水平层垂直地界定。
7. 如权利要求4所述的光学传感器,其中所述实芯波导由垂直凹部水平地界定。
8. 如前述权利要求中任一项所述的光学传感器,其中所述偏转元件构成所述空芯波导的空芯的一侧。
9. 如权利要求8所述的光学传感器,其中所述偏转元件为梁、平板、膜或悬臂。
10. 如权利要求8所述的光学传感器,其中所述至少一个偏转元件包括至少一个检验质量块。
11. 如权利要求8所述的光学传感器,其中所述至少一个分布式布拉格反射器为光栅。
12. 如权利要求8所述的光学传感器,其中所述至少一个分布式布拉格反射器与所述偏转元件相对布置。
13. 如权利要求8所述的光学传感器,其中所述波导为反谐振反射式光学 (ARROW) 波导。
14. 如权利要求8所述的光学传感器,其中所述实芯波导从折射率引导实芯波导,ARROW波导,光子晶体波导和光子带隙波导的组中选出。
15. 如权利要求8所述的光学传感器,其中所述空芯波导仅具有平面几何结构、带状几何结构、肋状几何结构和平板状几何结构中的一个。
16. 如权利要求8所述的光学传感器,其中所述空芯波导被配置为引导单模光的基模和/或多模光的一个或多个高阶模。
17. 如权利要求8所述的光学传感器,其中所述分布式布拉格反射器的最大高度小于空芯波导的空芯的最大高度的25%。
18. 如权利要求8所述的光学传感器,其中所述空芯波导的最大宽度比所述空芯波导的最大高度大至少10倍。
19. 一种传感器系统,包括:
 - 至少一个光源,

-一个或多个根据先前权利要求中任意项所述的光学传感器，
-至少一个发射光学波导，其用于将来自所述至少一个光源的光引导到一个或多个光学传感器，

-检测器，其用于测量在所述一个或多个光学传感器中从布拉格反射器反射的光，以及
-数据处理器，其被配置为分析反射光的布拉格波长的变化。

20. 如权利要求19所述的传感器系统，其中所述至少一个光源为宽带光源。

21. 如权利要求19所述的传感器系统，其中所述一个或多个光学传感器的空芯波导被配置为引导来自所述光源的光的至少一个高阶模，并且其中所述数据处理器被配置为分析反射光的所述至少一个高阶模的布拉格波长的变化。

22. 如权利要求19-21中任一项所述的传感器系统，其中所述数据处理器适用于对反射信号进行频率调制，和/或，其中所述传感器系统包括呈串联、并联或串联和并联配置的多个复用的所述光学传感器，和/或，其中所述一个或者多个光学传感器适用于感测力、压力、位移、应变、温度、加速度、速度、旋转、扭矩、液体流动或温度的变化。

23. 一种用于改进传感器系统的灵敏度的方法，所述传感器系统包括至少一个光学传感器，所述光学传感器具有适用于引导多模光源的至少一个高阶模的波导，所述方法包括以下步骤：将多模光导入所述传感器系统的光学传感器，并分析来自所述传感器系统的多个反射信号，以检测反射光的至少一个高阶模的布拉格波长的变化。

MEMS光学传感器

[0001] 本发明涉及利用波导的有效折射率调制和对反射光的波长移位的检测的全光学传感器,以及容纳所述光学传感器的力感测系统。

[0002] 发明背景

[0003] 传感器是借助于将物理量转换成传感器特定输出信号的一个或多个检测机构来检测属于传感器环境的特定物理量的装置。通常使用的传感器的众所周知实例包括温度计、速度计、麦克风、电压表、雷达和地震仪。一般传感器概念的子集是机械传感器,所述机械传感器检测经典力学的性质(例如,加速度、压力和应变),并且应当与用于例如生物学、医学和化学感测的传感器区分。因为MEMS允许小规模传感器和廉价批量生产,所以使用微机电系统(MEMS)技术制造绝大多数现代机械传感器。随着MEMS技术的发展和微光学感测技术的出现,扩展的术语微光机电系统(MOEMS)已被广泛接受。相比先前技术,MOEMS允许更通用的传感器设计和在更难以接近环境中量的检测。

[0004] 全光学传感器具有使其在较宽应用范围引起人们关注的许多优点,如允许远程感测的光纤中的低传输损耗。然而,与当今可利用的大量电传感器和光电传感器相比,全光学传感器目前代表小众市场,因为当涉及灵敏度、动态范围或价格时,大多数全光学传感器一般无法与其电对应物竞争。

[0005] 当今基于主全光学频率调制(FM)的传感器是光纤布拉格光栅(FBG)传感器,其中布拉格光栅的变形用于调制信号。虽然FBG已成功用于许多应用,但是它们具有一些缺点,包括大物理大小、低灵敏度、对材料选择的严格限制和部件结构化以及批量生产缺陷。发明人先前已提出使用MEMS技术制造的用于音频麦克风的新颖高度灵敏全光压力传感器。感测机制是基于改变合并有布拉格光栅的空芯反谐振反射式光学波导(ARROW)的有效折射率。通过改变有效折射率而不是光栅周期来获得高度改进的灵敏度。灵敏度可比FBG和可与之相比的MEMS技术中的灵敏度高几个数量级。

[0006] 发明概述

[0007] 为了获得用于音频麦克风的压力传感器的所需灵敏度,发明人开发出高精密的波导设计。然而,即使在使用MEMS技术的情况下,这些波导设计被证明是难以在实践中实现并且不可能始终获得低耦合损耗。为实现全光学传感器的可能性,其它波导设计可能因此是必要的。然而,发明人已发现极大地改进全光学传感器的灵敏度的新方式。目前,优选的是,仅光的基模在波导中传播并且因此仅分析来自基模的反射。在科学界中,高阶模被认为是不合需要的,因为其更难以控制。

[0008] 但是本发明人已经认识到,感测应用实际上需要高阶模。一般来说,高阶模比低阶模具有更高的空间变化。在合并有布拉格光栅的多模波导中,由于每个模的反射和模之间的耦合,将从光栅反射一些不同的峰。因为单个模态在其空间分布上不同,所以所述模态与光栅的重叠将大体不同。当波导尺寸改变时,从单个模的布拉格波长的变化看出针对不同模的模-光栅重叠中的差异,即,对波导尺寸的波长灵敏度来模依赖性的。已认识到高阶模优选用于感测应用,发明人进一步发现,仅利用简单波导设计就可获得高灵敏度。本发明的第一方面因此涉及用于力感测系统的光学传感器,所述光学传感器包括:容纳用于限制光

的非实芯的波导,至少一个分布式布拉格反射器,以及至少一个偏转元件,所述偏转元件适于在受到力,例如受到由于加速度、压力、位移、应变等等的力的作用时,改变波导的几何结构和/或尺寸。因为感测可以基于高阶模传播和反射,例如,使用来自多模光源的光,所以波导可以具有简单的平面或带状几何结构,从而很大程度上将这种光学传感器与已知的更复杂设计区分开来。

[0009] 在大多数情况下,核芯的几何结构和/或尺寸的变化是波导的几何结构和/或尺寸变化的结果。例如,偏转元件形成波导的一部分,并且当所述偏转元件移动时,波导的几何结构和/或尺寸改变。因此,波导或核芯的几何结构和/或尺寸的变化在本文中可以互换地使用。本文所提及的波导包括一个或多个核芯,通常包括一个核芯。光在波导中的限制通常提供在核芯中,因此光在波导中的传播隐含地意味着光在核芯中传播。因此,光在波导和核芯中的传播在本文中可交换地使用。此外,如本文所隐含的,所述至少一种分布式布拉格反射器中的至少一个优选地至少部分位于波导的非实芯中。

[0010] 另一实施方案涉及这种光学传感器在力感测系统中的用途。又一实施方案涉及包括以上提及的光学传感器的力感测系统。

[0011] 本发明的另一实施方案通过公开一种传感器系统来利用基于高阶模的感测的新可能性,所述传感器系统包括:至少一个光源;一个或多个光学传感器,其包括容纳分布式布拉格反射器的传感器光学波导,所述传感器光学波导适于引导来自所述至少一个光源的所述光的至少一个高阶模;至少一个发射光学波导,其用于将来自所述至少一个光源的光引导到所述一个或多个传感器光学波导;检测器,其用于测量在所述一个或多个传感器光学波导中从所述布拉格反射器反射的光;以及,数据处理器,其适于分析反射光的所述至少一个高阶模的布拉格波长的变化。

[0012] 对应地,本发明还涉及传感器系统,所述传感器系统包括至少一个光源;一个或多个光学传感器,其包括容纳分布式布拉格反射器的多模传感器光学波导;至少一个发射光学波导,其用于将来自所述至少一个光源的光引导到所述一个或多个传感器光学波导;检测器,其用于测量在所述一个或多个多模传感器光学波导中从所述布拉格反射器反射的光;以及,数据处理器,其适于分析反射光的至少一个高阶模的布拉格波长的变化。

[0013] 在已知基于高阶模的感测是有助于更好的灵敏度的方式的情况下,本发明发现也可以用于改进目前已知的能够引导至少一个高阶模的光学传感器。本发明的另一实施方案因此涉及一种用于改进传感器系统的灵敏度的方法,所述传感器系统包括适合于引导光的至少一个高阶模的至少一个传感器光学波导,所述方法包括以下步骤:分析来自所述光学传感器系统的多个反射信号,以用于检测反射光的所述至少一个高阶模的布拉格波长的变化。对应地,一个实施方案涉及一种用于改进传感器系统的灵敏度的方法,所述传感器系统包括其中传播多模光的至少一个多模传感器光学波导,所述方法包括以下步骤:分析来自所述光学传感器系统的多个反射信号,以用于检测反射多模光的所述至少一个高阶模的布拉格波长的变化。

[0014] 发明人先前已提供了对基于空芯波导的光学传感器的详细研究。这些出版物包括

[0015] Kasper Reck的博士论文:“MEMS Optical Sensor Systems”(2011)

[0016] Christian Østergaard的硕士论文:“MEMS Optical Strain Sensors Based on Hollow Core Waveguides with Integrated Bragg Gratings”(2011)。

[0017] Mette Funding la Cour和Søren Vang Fischer的硕士论文:“Design and Fabrication of Hollow Core MEMS Optical Microphone”(2011)

[0018] 在这些出版物中,可找到有关光学传感器波导的背景理论的细节、设计细节和制造细节,所述出版物因此以全文引用方式并入。

[0019] 本发明的一个实施方案是基于归因于波导几何结构变化的有效折射率调制的概念的传感器。几何结构的这种变化通常归因于作用于传感器的力。这种力可以例如,由压力(例如,来自麦克风音频的压力)、力、位移、应变、温度、加速度、旋转、扭矩、液体流动等等提供。因此,当谈及力感测系统时,其包括用于感测以上提及来源的任何力的系统。

[0020] 虽然两种传感器(例如,加速度计传感器和应变传感器)可能基于相同的基本感测原理(例如,压敏电阻或电容性感测),但通常将此类传感器考虑为不同传感器类型。这主要归因于不同传感器类型的实际实现方式中的差异(例如,使用或不使用检验质量块)。因此,本发明包括并适于基于这种归因于波导几何结构变化的有效折射率调制的概念的所有传感器,并且从而不受几何结构变化的原因限制,并且因此包括任何传感器类型,所述传感器类型的某一可测量的量可涉及波导核芯几何结构和有效折射率调制中的变化。

[0021] 当考虑到波导核芯中的几何结构变化时,术语几何结构变化包括几何结构的形状(例如,从圆形变成矩形)和缩放(例如,将矩形几何结构的大小增加到例如其初始大小的两倍)的变化。

[0022] 可使用MEMS技术制造本发明的波导和光学传感器。当处理光传播时,使用的最简单的材料是硅。然而,也可在金属、聚合物、陶瓷或其任何组合(也包括硅)中至少部分地制造本发明的波导和光学传感器。

[0023] 附图简述

[0024] 本发明现将参考附图来进一步详细描述,附图中

[0025] 图1a示出光纤布拉格光栅(FBG)的原理,

[0026] 图1b是根据本发明的具有平板状波导的光学传感器波导的透视图,

[0027] 图1c示出中空波导中的布拉格光栅的原理,

[0028] 图1d示出布拉格波长由于图1b中的波导核芯的尺寸变化的移位,

[0029] 图2示出在合并有布拉格光栅的波导中传播的基模和高阶模的空间限制的实例,

[0030] 图3a示出具有光栅和呈悬臂形式的偏转元件的简单平板波导的透视图,

[0031] 图3b示出来自图3a的波导的横截面图,

[0032] 图4示出多模光学传感器波导的反射光谱的实例,

[0033] 图5示出力与布拉格波长位移之间的关系,

[0034] 图6和图7示出光学传感器波导的示例性设计原理,

[0035] 图8示出不同的示例性光栅设计,

[0036] 图9a和图9b分别示出正常和倒置的光栅设计,

[0037] 图10示出将光纤连接到波导的不同实例,

[0038] 图11a示出波纹状偏转元件的实例,

[0039] 图11b示出具备使得能够检测加速度的检验质量块的偏转元件的实例,

[0040] 图12示出使用铰链悬置偏转元件的实例,

[0041] 图13示出具有光的圆形限制和一个或多个布拉格光栅的波导的横截面示例性图

解,

[0042] 图14示出沿用于例如双轴加速度计的两条轴线的移动检测的实例,

[0043] 图15示出沿两条轴线的移动检测的另一个实例,

[0044] 图16a和图16b示出多个光学传感器的复用,

[0045] 图17a和图17b示出借助于波导的弯曲底部表面获得的切趾光栅,以及

[0046] 图18是波导芯片的透视图,其中借助于折射率引导实芯波导提供与核芯的耦合。

[0047] 发明详述

[0048] 一般来说,全光学传感器的感测方法可被分成幅度调制(AM)和频率调制(FM)感测。频率调制指代如下事实:将反射光的波长变化用于确定所测量的物理量,而不是确定如幅度调制中的反射光的幅度。虽然基于AM的传感器归因于信号的通/断特性而可实现极高的灵敏度,但是信号固有地非常容易受到传输损耗和噪声的影响,并且所述传感器不容易整合较大传感器阵列中,因为每个传感器需要它自己的传输线。另一方面,基于FM的传感器不具有与基于AM的传感器几乎相同的灵敏度,然而,所述基于FM的传感器相对于噪声更加稳固,并且容易整合到大的分布式传感器系统中,因为多个传感器可共享一条传输线。

[0049] 在大多数光学波导中,光被限制在核芯中,所述核芯具有比称作包层的周围介质高的折射率。这种限制光的方法表示全内反射。如果核芯具有比包层低的折射率,例如空芯波导的情况,那么所述波导称作“漏(leaky)”波导。

[0050] 如上所述,本发明的第一方面涉及用于力感测系统的光学传感器,所述光学传感器包括:容纳用于限制光的非实芯的波导,至少一个分布式布拉格反射器,和至少一个偏转元件,所述偏转元件适于在受到力的作用时改变波导的几何结构和/或尺寸。作为简单设计的实例,波导可以具有单独平面几何结构或单独带状几何结构。根据本发明的光学传感器的其它实施方案可以具备肋或多肋几何结构波导。自然地,所述波导适合于和/或适于引导光的至少一个高阶模。因此,波导可以是多模波导,其中光的基模与多个高阶模一起被引导。来自光学传感器的反射光谱因此将含有多个峰,每个峰通常表示一种模。可以从一个或多个反射峰或整个反射信号(即,光谱指纹)的波长移位推断出传感器信号。

[0051] 如先前所述,不仅可通过改变光栅的周期来获得反射布拉格波长中的波长移位,而且可通过改变有效折射率来获得所述波长移位。这可例如通过改变波导本身的尺寸来完成。本发明的光学传感器优选地基于感测有效折射率的变化,而不是感测布拉格周期的变化,所述布拉格周期的变化在常规FBG传感器中用于调制布拉格波长。有效折射率是通过调制波导尺寸和/或几何结构来调制。考虑两个区域,一个区域仅具有核芯材料并且一个区域具有核芯和光栅材料。在仅具有核芯材料的区域中,有效折射率是简单地通过改变波导尺寸来调制。光的低空间限制(等效于大核芯)将增加有效折射率,而高空间限制(等效于小核芯)将减小有效折射率。在具有核芯和光栅材料的区域中,两种影响都会起作用;如前所述,由于较高或较低空间限制,核芯部分中的折射率将改变,但是整个区域的有效折射率还将取决于波导模在区域的光栅部分中的一部分有多大以及波导模在核芯部分中的一部分有多大。如果整个波导模均处于核芯部分中,那么情况等效于不存在光栅材料的第一种情况。但是,如果模与光栅的不断增大的部分重叠,那么整个区域的有效折射率将会趋向于光栅部分的有效折射率。可沿一个或多个轴线进行有效折射率调制。

[0052] 显然,波导尺寸的变化受波导材料的顺从性限制。使用空芯波导来获得最高可能

的顺从性。因此,在本发明的一个实施方案中,非实芯(non-solid core)是中空的。本领域已知一些空芯波导设计,所述空芯波导设计包括光子晶体、分布式布拉格光栅和反谐振反射式光学波导(ARROW)。

[0053] 因为核芯的顺从性比核芯由液体或固体填充的顺从性高得多,所以空芯波导易于扩张/压缩。高顺从性意味着对物理变形力具有高灵敏度。当涉及制造和操作时,实芯比典型的空芯简单,因为实芯可利用用于限制光的全内反射。这对于空芯波导通常是不可能的,因为气体(例如,空气)的折射率相对较低。液体核芯波导可具有比固体核芯波导高或低的顺从性,并且可利用用于限制光的全内反射。如果物质(例如,颗粒或DNA)将要沿核芯输送,那么液体核芯波导是有利的。用于在波导中以不同于全内反射的方式限制光的方法的实例包括光子晶体、ARROWS、槽波导、金属波导、分布式布拉格反射器波导和等离子体波导。

[0054] 波导可以是例如平板波导、带状波导(如矩形波导、圆形或半圆形波导)或肋或多肋波导。非实芯的横截面可以是矩形、多边形或圆形、半圆形、椭圆形、半椭圆形或其组合。类似地,核芯的限制可以是大致上矩形、多边形或圆形、半圆形、椭圆形、半椭圆形或其组合。

[0055] 平板波导易于实现,但是将仅在一个方向上限制光,因此传播和耦合损耗(尤其对于发射信号来说)可能较大。带状波导和肋波导在两个方向上限制光并且将允许较低耦合损耗,因为光可被引导到特定入/出耦合点。这对于复用能力将会是必要的,其中耦合损耗应当最小化。因为肋波导可被视为是平板波导和矩形波导的组合,所以当从波导的平板/矩形部分到波导的矩形/平板部分挤压模时,可实现高有效折射率调制。这是由于两种情况之间的限制(1维或2维)的较大差异而产生的。因此,相比在简单的平板波导几何结构中,在例如肋波导几何结构中可获得更大的有效折射率调制。

[0056] 在本发明的一个实施方案中,波导的最大宽度是波导的最大高度的至少10倍,或波导的最大高度的至少20倍,或至少30倍,或至少40倍,或至少50倍,或至少60倍,或至少70倍,或至少80倍,或至少90倍,或至少100倍,或至少500倍,或至少1000倍,或至少1500倍,或至少2000倍,或至少2500倍,或至少3000倍,或至少5000倍,或至少10000倍。

[0057] 在本发明的一个实施方案中,波导是反谐振反射式光学波导(ARROW)。

[0058] 波导可由两个粘结衬底制造,所述衬底如硅或派热克斯玻璃(pyrex)或二氧化硅或熔融二氧化硅衬底。此外,波导可形成为硅衬底中的凹部,所述硅衬底如硅或派热克斯玻璃或二氧化硅或熔融二氧化硅衬底。衬底可以通过例如熔接来粘结,所述熔接如激光熔接、胶合、熔融粘结、阳极粘结或共晶粘结。

[0059] 偏转元件

[0060] 光学传感器的感测能力依赖于一个或多个偏转元件,所述偏转元件适于在受到力作用时改变波导的几何结构和/或尺寸。例如,波导尺寸可例如通过使用偏转梁、膜、平板或其它偏转机械元件来调制,所述偏转机械元件引起波导核芯的几何结构的变化并改变围绕核芯的材料分布。波导尺寸调制也可通过压缩/扩张核芯来直接诱导。偏转元件可以是悬臂、梁、膜或平板或类似可偏转构造。偏转元件的形状可以是圆形、椭圆形、多边形或组合。在本发明的一个实施方案中,偏转元件形成非实芯的一侧和/或波导的一侧。

[0061] 形成为具有均匀厚度的薄板的偏转元件通常将以板中心具有最大偏转的方式来偏转。因此,在本发明的另一实施方案中,偏转元件的厚度不是恒定的。例如,偏转元件的厚

度跨偏转元件的长度和/或宽度而变化。例如,所述偏转元件可以包括一个或多个波纹部,例如以便在光栅位置处获得更均匀的偏转。

[0062] 当偏转元件偏转时,核芯材料(例如,空气)的刚度可增加总有效刚度,并且因此增加使偏转元件偏转所需的力。为减小这种增加的总有效刚度,排气孔或后腔室可引入波导的偏转元件或其它部分中,从而允许波导核芯材料(例如,空气)在偏转元件偏转期间逸出波导核芯。

[0063] 在另一实施方案中,借助于一个或多个梁来悬置偏转元件,所述梁如跨核芯和/或波导或沿核芯和/或波导延伸的一个或多个梁。在另一实施方案中,偏转元件形成铰链元件。

[0064] 为了防止光学传感器由于偏转元件的大偏转的机械断裂,偏转限制器可被整合到本发明的光学传感器中。这可以是位于偏转元件(例如呈膜形式)下方的实芯结构,所述实芯结构防止膜偏转大于物理接触的某一距离。为了避免偏转元件与偏转限制器之间的粘结并且从而避免例如滞后,接触面积应当较小。这可通过例如使用支柱(可能具有尖末端)作为偏转限制器而实现。还可选择限制器的表面材料以减小与偏转元件的材料的粘结。

[0065] 光学传感器和偏转元件可以被适配来使得光学传感器对在偏转元件的顶部上受到的力敏感,从而导致偏转元件的偏转,进而改变波导的尺寸和/或几何结构。然而,光学传感器和偏转元件也可加以被适配来使得光学传感器对在偏转元件的侧面受到的力敏感。这可以导致偏转元件的偏转和/或偏转元件的位移,从而改变波导的尺寸和/或几何结构。

[0066] 分布式布拉格反射器的设计

[0067] 在本发明的一个实施方案中,至少一个分布式布拉格反射器是光栅。布拉格反射器(光栅)的高度影响光学传感器的灵敏度。这与部分地归因于模/光栅重叠的变化的有效折射率调制有关。如果光栅高度等于或大于核芯高度,那么当核芯尺寸被调制时,核芯中的模/光栅重叠将不存在变化(模总是与光栅完全重叠)。因此,归因于模重叠的变化的有效折射率调制是可忽略的。如果光栅高度小于整个核芯高度,那么归因于核芯尺寸调制的有效折射率调制不再是可忽略的。

[0068] 给定的光栅高度将以不同方式影响不同波导模。这归因于波导模的不同空间分布。因此,在本发明的一个实施方案中,分布式布拉格反射器的最大高度小于波导的最大高度的50%,或小于波导的最大高度的40%,或小于30%,或小于25%,或小于20%,或小于15%,或小于10%,或小于5%。

[0069] 如果波导中的空间限制增加(例如,归因于较小波导尺寸),那么仅核芯区域的有效折射率将减小。然而,在具有核芯材料和光栅材料的区域中(其中模/光栅重叠是相关的),如果光栅的折射率大于核芯的折射率,那么有效折射率可能增加。当归因于模与高折射率光栅之间的较大重叠,核芯区域中的有效折射率的降低小于有效折射率的增加时,这种情况将会发生。因此,在确定最佳光栅高度时,应当考虑用于感测的实际模。因为非常高的光栅将引起反射峰带宽增加,并且同时限制偏转元件的运动,所以典型的光栅高度在整个波导高度的0至25%范围内。

[0070] 在本发明的一个实施方案中,至少一个分布式布拉格反射器形成为波导表面上的多个结构。这些结构可以是突起或凹部或两者的组合。分布式布拉格反射器沿着光栅的形状、高度和周期可能不是恒定的。改变单个光栅元件的高度和形状以及周期可用于产生特

定反射光谱。对于低折射率调制来说,众所周知的是,反射光谱通过傅里叶变换(和逆傅里叶变换)与光栅折射率的空间分布有关。因此,在本发明的一个实施方案中,周期性地改变所述结构的高度和/或宽度。此外,可以周期性地改变所述结构之间的距离。此外,所述结构可以是笔直或弯曲的,如正弦弯曲的或弯曲为弧形或弯曲为抛物线形。一个设计可使用切趾(apodized)布拉格反射器,以便例如抑制旁瓣。另一个可能性是使用啁啾布拉格反射器。

[0071] 在本发明的一个实施方案中,光学传感器包括两个或更多个分布式布拉格反射器。这些分布式布拉格反射器可以是相同或不同的。包括两个不同布拉格反射器的光学传感器可以用于感测不同“事件”,因为来自每个布拉格反射器的反射通常将是可区分的。

[0072] 存在将布拉格反射器放置在波导中的众多可能性。例如,分布式布拉格反射器可位于偏转元件上。另一个可能性是,分布式布拉格反射器位于波导的与偏转元件相对表面上。

[0073] 耦合

[0074] 在本发明的一个实施方案中,光学传感器还包括耦合元件,所述耦合元件用于将光耦合入和/或耦合出波导。耦合的优化对于使耦合损耗最小化是重要的。可通过改进光纤模与波导模之间的模重叠来减小将光耦合入波导中的功率损耗。然而,在多模波导的情况下,外部光源与波导之间的耦合可能更加重要。例如,可通过调整呈光纤形式的光输入与波导之间的角度和光纤对波导的定位来增加高阶模布拉格反射峰的幅度。这就是一个优点,因为它使得更容易测量用于高阶模的信号。在零角度(即,光纤平行于波导)处,基模通常将具有最高幅度。当角度从零变化时,二阶模的幅度将增加,而一阶模的幅度将减小。在甚至更大角度处,较高阶模的幅度将增加并且是以较低阶模的幅度为代价的。类似地,光纤相对于波导的定位将改变单个峰的幅度以及峰的数目。如果光纤与波导中心对齐,那么基模通常将具有最大幅度。在离轴位置处,较高阶模幅度将增加。因此,在本发明的一个实施方案中,耦合元件被适配来使得光被同轴地/相对于核芯对称地耦合入波导中。在另一实施方案中,耦合元件被适配来使得光离轴地/相对于核芯不对称地耦合入波导中。此外,耦合元件可被适配来使得光以相对于核芯的非零角度耦合入波导中。

[0075] 通常,在布拉格光栅位置处调制波导的尺寸。因此,直接与这种区域的引入耦合将会引起耦合损耗的变化。因此,可在实际感测位置的前方定位具有不变尺寸的引入波导区段。另外,波导与光纤之间的锥形区段或类似耦合结构可用于增加模重叠并减小耦合损耗。可以通过使一个或多个实芯结构作为光学传感器的一部分(例如,作为波导芯片的一部分)来提供耦合结构。例如,空芯波导可以整合在芯片中并且一个或多个实芯结构在空芯波导中和/或外提供光学连接。这种实芯结构可以是锥形的,以使得一个末端处的尺寸适于光纤并且另一末端处的尺寸适于空芯。此外,实芯结构中的光学传输可以是折射率引导的或借助于光子晶体引导的,等等。

[0076] 图17a、图17b和图18示出实例。在图17a和图17b中,在空(空气)芯波导的每一侧处提供实芯波导。呈膜形式的偏转元件附接到实芯结构。图18中的波导传感器芯片包括:空芯波导,所述空芯波导具有呈膜形式的圆形偏转元件;以及,在空芯中处于膜下方的布拉格光栅。经由在空芯的每一侧上呈两个折射率引导波导形式的两个实芯结构将光耦合入并耦合出空芯波导。因此,实芯波导适于用作耦合元件,所述耦合元件用于将光耦合入和/或耦合出非实芯波导的非实芯。折射率引导波导在每一端处成漏斗形,以朝向耦合到例如光纤的

输出端逐渐变细而且朝向空芯逐渐变细。光被通过如下方式限制在这些实芯折射率引导波导中：在垂直方向上使由包层包围的芯片中具有导光水平层，所述导光层具有比包层高的折射率，并且在水平方向上使芯片中具有四个凹陷/孔，如图18中可见，其中凹陷/孔中空气的较低折射率提供光在实芯折射率引导波导的核芯中的限制。这些凹陷/孔的形状形成实芯折射率引导波导区段的锥形区段。图18中所示出的传感器芯片可在芯片的每一侧处提供与光纤的低损耗耦合，因为可在传感器芯片的末端处将光纤的实芯耦合到实芯结构。

[0077] 光学传感器可适于传播具有约1550nm电信光谱（例如，从1500nm到1620nm）的波长的光，从而使得可能使用标准低损耗和低成本电信光学部件。在另一实施方案中，为了利用低成本询问监视器系统，光学传感器可被适配成用于传播具有大致850nm波长的光。

[0078] 传感器系统

[0079] 如上所述，本发明的另一实施方案涉及一种传感器系统，所述传感器系统包括：至少一个光源；一个或多个光学传感器，其包括容纳分布式布拉格反射器的传感器光学波导，所述传感器光学波导适于引导来自所述至少一个光源（例如，多模光学波导）的光的至少一个高阶模；至少一个发射光学波导，其用于将来自所述至少一个光源的光引导到所述一个或多个传感器光学波导；检测器，其用于测量在所述一个或多个传感器光学波导中从所述布拉格反射器反射的光；以及，数据处理器，其适于分析反射光的所述至少一个高阶模的布拉格波长的变化。

[0080] 在本发明的一个实施方案中，传感器系统还包括一个或多个耦合元件，所述耦合元件用于将来自所述至少一个发射光学波导的光耦合入所述一个或多个传感器光学波导中。数据处理器可以适于反射信号的频率调制。光源可以是宽带光源和/或多模光源。此外，当数据处理器适于分析反射光的所述至少一个高阶模的布拉格波长的变化时，隐含的是，光源（如多模光源）优选地适于发射包括多个模，如发射包括第一模（即，基模）、第二模、第三模、第四模、第五模等等的光。在漏模光学波导中，损耗随着模数目而增加。

[0081] 根据本发明的传感器系统可以包括多个复用光学传感器。这些光学传感器可以串联、并联或串联/并联配置复用。每个传感器之间的连接可通过光纤或芯片上波导进行。因此，可在具有波导互连的单个芯片上实现具有例如不同布拉格光栅设计和/或偏转元件设计和可能不同类型（温度、力、加速度）的一些传感器元件。例如，如在波分复用中，每个光学传感器中的分布式布拉格反射器可适于反射特定和唯一波长的光。也可使用反射信号的时间复用，从而避免了对来自每个传感器的唯一反射的需要。一个芯片上的一些传感器将允许芯片具有如波束形成能力（通过组合一些压力传感器）和温度补偿（通过组合例如压力传感器和温度传感器）的特征。通过组合因给定物理量（例如，力）和温度而以不同方式受影响的传感器，温度补偿可通过例如传感器的反射信号的差分测量来实现。

[0082] 在本发明的一个实施方案中，至少一个发射光学波导是光纤。能够控制光的偏振可为有利的，在本发明的另一实施方案中，至少一个发射光学波导是偏振维持光纤，如Panda型PM光纤。反射信号通常将通过携带光源的相同光纤往回传播。因此，可以提供环形器来将反射光耦合入检测器中。

[0083] 如前所述，所述一个或多个传感器光学波导可以是适合于引导光的多个模（包括基模）的多模波导。因此，数据处理器可以适于分析反射光的多个模（包括基模）的布拉格波长的变化。

[0084] 光谱仪可以用来分析来自传感器系统的反射信号,以使得可通过光谱来分辨反射信号。然而,更具成本效益的解决方案可以应用比率分析,例如通过两个或更多个滤波器(例如,带边缘滤波器、陷波滤波器、带通滤波器等等)、将反射信号发送通过这些滤波器并且分析来自滤波器的输出之间的比率。当调制传感器光学波导的折射率时,如果滤波器适合用于光源的波长和传感器光学波导的布拉格波长,那么将因此调制这个滤波器输出比率。一个或多个简单的光电二极管可以用作检测器,并用来监测这个滤波器输出比率,从而避免使用可能昂贵的光谱仪。

[0085] 图式详述

[0086] 图1a示出FBG的原理,所述FBG具有通过光纤的核芯从左到右传播的宽带光。通过周期性地改变波导核芯(在这个情况下是光纤核芯)的折射率来制作具有恒定周期 Λ 的呈光栅形式的分布式布拉格反射器。在图1c中,示出空芯波导中的原理。折射率的变化充当对特定波长具有选择性的反射镜。在折射率的每一次移位时,将会发生向前传播的波的反射。因此,对于特定波长来说,在每一次反射与下一反射同相时,反射将在构成性地相加,从而在反射光谱中,在根据以下的布拉格波长 λ_B 处提供峰

$$[0087] \quad \lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda$$

[0088] 其中, n_{eff} 是平均折射率并且 Λ 是光栅周期。如果拉伸图1a中的光纤并改变布拉格光栅的周期 Λ ,那么布拉格波长将会改变。这个简式也表明:可通过改变波导的有效折射率 n_{eff} 来改变布拉格波长,如图1c和图1d中示出。图1d示出当反射光改变时,信号会如何改变(虚线到实线)。也可看出反射波长的变化。

[0089] 图1b是根据本发明的光学传感器波导的示例性实施方案的透视图。这个带状波导被形成衬底中的凹部并合并有分布式布拉格反射器。通过上覆在凹部的顶部上的另一衬底来形成偏转元件,从而形成波导的一侧。当偏转元件的顶部受到力作用时,其将偏转并且从而改变波导的尺寸,并且从而改变波导的有效折射率,因为有效折射率 n_{eff} 由以下确定

$$[0090] \quad n_{\text{eff}} = n_c \sqrt{1 - \left(\frac{m\lambda_B}{2n_c d_c} \right)^2}$$

[0091] 其中 n_c 是核芯折射率,而 d_c 是核芯高度,并且 m 是模数目。

[0092] 图2示出光学传感器多模波导的基本原理。图解示出了核芯的横截面,其中光从左边传播。也示出基模和高阶模的空间限制。底部处的突起是布拉格光栅。在仅具有核芯材料的区域(如A所示出)与具有核芯材料和光栅材料的区域(如B所示出)之间的波导移位中存在不同区域。区域A与区域B之间的模的空间限制的变化改变波导的有效折射率。模-光栅重叠的变化改变几何平均折射率,所述几何平均折射率随模阶数改变。

[0093] 图3a示出形成在两个板之间的简单平板波导,其中光栅位于一个板上,而另一平板是偏转元件。两个板可机械连接或不按虚线所示来连接。当两个板被连接时,偏转元件形成悬臂。

[0094] 图3b示出在形成于周围包层之间的波导的核芯中传播的光。

[0095] 图4示出来自多模光学传感器波导的反射光谱的实例。可容易识别来自至少两种模的峰(基模(1.)和高阶模(2.))。在波导中传播的每个模通常将在反射光谱中提供峰。然而,由于不同模之间的混合,其它峰可以出现在反射光谱中。本发明的光学传感器中的数据

处理器优选地适于分析来自每个模的峰的变化。如前所述,高阶模对于波导折射率的变化更敏感。通过适配数据处理器来包括对高阶模的分析,传感器系统的灵敏度可由此得以改进。

[0096] 图5示出根据本发明的光学传感器受到的力与反射光谱中峰的布拉格波长的所得变化之间的关系。已插入线性拟合,尽管布拉格波长中的变化一般不是线性的。

[0097] 例如,就波导和核芯的几何结构以及光栅偏转元件的设计、类型、位置和数目而言,存在许多方式来设计光学传感器波导。以下将提出许多设计。

[0098] 图6a示出适于核芯的双轴向变形的光学传感器波导的透视图。当力如箭头所示从右边入射时,大致上六边形的波导将几乎类似于手风琴一样来改变几何结构。

[0099] 图6b中的横截面图示出了具有指向光栅的类活塞结构的偏转元件。

[0100] 图6c中所示出的光学传感器波导具备呈膜形式的两个相对偏转元件,每个偏转元件具备布拉格光栅。光栅可以是不同的,从而提供不同的反射光谱,由此可确定哪个膜正在偏转。膜可具有不同质量并且从而具有不同谐振/灵敏度。

[0101] 图7a是具有围绕光栅的核芯区域的不对称波导的横截面图。波导由两个衬底形成,所述衬底适于在受到力作用时相对于彼此滑动。这种滑动移动将改变波导的几何结构,并且尤其改变核芯的尺寸,并且从而改变光的空间限制,即,当两个衬底相对于彼此滑动时,光栅位置处的有效折射率改变。

[0102] 图7b中示出不对称波导的另一横截面图。这种类型的设计可以引起对应光学传感器波导的增加灵敏度。

[0103] 就波长光谱、灵敏度等等而言,可以许多方式设计光栅以适应特定的需要。图8a和图8b中以侧视图分别示出具有变化高度和间隔的光栅。图8c(笔直光栅)和图8d(弯曲光栅)中以透视图示出具有不同曲率的光栅。

[0104] 光栅可以实现为“正常”光栅,所述光栅形成为从如图9a中所示出的表面的突起,或形成为如图9b中所示出的表面中的凹部。

[0105] 通过使光栅具有变化高度的光栅突起来提供图8a中所示出的切趾光栅。然而,也可通过在非平面表面上布置分布式布拉格反射器来获得切趾。图17a和图17b中示出实例。在图17a中,波导空芯的底部表面是凸面,即,向外弯曲。布拉格光栅的突起具有相等高度,但是当分布在弯曲底部上时,得到具有沿波导核芯的长度(即,在光传播的方向上)变化的高度的布拉格光栅,由此折射率沿波导核芯的长度变化。图17b中示出类似解决方案,其中波导核芯的底部表面是凹面,即,向内弯曲。此外,波导的折射率沿波导核芯的长度变化。当分布式布拉格反射器在光传播的方向上位于非平面表面上时,可以提供这种效果。

[0106] 通常,光纤必须连接在波导的一端或两端处。图10a示出笔直引入部/引出部,然而图10b中示出具有锥形区段以改进光纤与波导之间的耦合效率的波导。

[0107] 为了确保偏转元件更均匀的偏转,所述偏转元件可以具备如图11a中所示出的波纹部。

[0108] 偏转元件可以具备如图11b中所示出的局部检验质量块,所述局部检验质量块对传感器的加速度更敏感。因此,本发明的另一实施方案涉及光学加速度计,所述光学加速度计包括:容纳用于限制光的非实芯的波导,至少一个分布式布拉格反射器,以及至少一个偏转元件,所述偏转元件适于在受到力作用时改变波导的几何形状和/或尺寸,其中所述至少

一个偏转元件包括至少一个检验质量块。

[0109] 例如,取决于传感器应用,存在悬置偏转元件的不同方式。在图12中,膜/板被抬高在含有光栅和波导的底部衬底上方。仅通过平行于波导延伸的两个梁局部地支撑膜/板。这种类型的光学传感器对于膜在水平和垂直两个方向上的移动/偏转是敏感的。

[0110] 可以提供圆形波导以减小传输损耗。在图13a中示出利用两个相对光栅的偏振独立性圆形限制。图13b也具有圆形限制,但是仅利用一个光栅,传播是偏振依赖性的。

[0111] 图14示出传感器对何处受到力作用敏感的原理。提供了共享同一偏转元件的两个波导。每个波导具备不同布拉格光栅,由此可在反射光谱中区分不同波导。如果在偏转元件的顶部受到力作用,以使得每个波导中的偏转是相同的,那么可同样使所反射的布拉格峰位移,如图14b中的反射光谱所示。然而,如果偏转是不对称的,那么将看到如图14c和图14d中所示出的反射光谱。从而,例如,可在二维中通过比较多个反射信号来检测移动/加速度。

[0112] 图15提供将会对在两个方向上的移动检测敏感的其它波导设计的图解。

[0113] 图16示出多个光学传感器可以如何沿相同传输线进行(频率)复用。

[0114] 发明的其它细节

[0115] 本发明现将参考以下各项来进一步详细描述:

[0116] 1.一种用于力感测系统的光学传感器,其包括容纳以下元件的波导:

[0117] -用于限制光的非实芯,

[0118] -至少一个分布式布拉格反射器,以及

[0119] -至少一个偏转元件,其适于在受到力作用时改变所述波导的几何结构和/或尺寸。

[0120] 2.如项目1所述的光学传感器,其中所述波导具有平面几何结构。

[0121] 3.如项目1所述的光学传感器,其中所述波导具有带状几何结构。

[0122] 4.如项目1所述的光学传感器,其中所述波导具有肋几何结构。

[0123] 5.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述非实芯是中空的。

[0124] 6.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述非实芯的横截面是矩形、多边形或圆形或椭圆形或其任何组合。

[0125] 7.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述核芯的所述限制是大致上矩形、多边形或圆形或椭圆形。

[0126] 8.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述波导是多模波导。

[0127] 9.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述偏转元件形成所述非实芯的一侧和/或所述波导的一侧。

[0128] 10.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其包括两个偏转元件。

[0129] 11.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述偏转元件是梁、平板、膜或悬臂。

[0130] 12.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述偏转元件包括一个或多个波纹部。

[0131] 13.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述偏转元件包括排气孔。

[0132] 14.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其还包括一个或多个后腔室。

[0133] 15.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述偏转元件形成铰链式元件。

[0134] 16.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述偏转元件借助于一个或多个梁来悬置,所述梁如跨所述核芯或沿所述核芯延伸的一个或多个梁。

[0135] 17.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述偏转元件的厚度因所述偏转元件的长度和/或宽度而不同。

[0136] 18.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述至少一个偏转元件包括至少一个检验质量块。

[0137] 19.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其还包括用于限制所述偏转元件的偏转的一个或多个偏转限制器,偏转限制器如支柱,所述支柱如具有尖末端的支柱。

[0138] 20.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中在所述偏转元件的顶部上受到所述力作用。

[0139] 21.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中在所述偏转元件的侧边上受到所述力作用。

[0140] 22.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述至少一个分布式布拉格反射器是光栅。

[0141] 23.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其包括两个或更多个分布式布拉格反射器。

[0142] 24.如项目23所述的光学传感器,其中所述分布式布拉格反射器是相同的。

[0143] 25.如项目23所述的光学传感器,其中所述分布式布拉格反射器是不同的。

[0144] 26.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述至少一个分布式布拉格反射器的形状是切趾形。

[0145] 27.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述至少一个分布式布拉格反射器位于非平面表面上,如凹面或凸面上,使得提供所述布拉格反射器的变化高度,即,切趾。

[0146] 28.如前述项目26至27中任一项所述的光学传感器,其中在所述非实芯中,在光传播的方向上提供切趾。

[0147] 29.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述至少一个分布式布拉格反射器的所述形状是啁啾形。

[0148] 30.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述至少一个分布式布拉格反射器形成为所述波导的表面上的多个结构。

[0149] 31.如项目30所述的光学传感器,其中所述结构是突起或凹部或两者的组合。

[0150] 32.如前述项目30至31中任一项所述的光学传感器,其中所述结构的高度和/或宽度周期性地改变。

[0151] 33.如前述项目30至32中任一项所述的光学传感器,其中所述结构之间的距离周期性地改变。

[0152] 34.如前述项目30至33中任一项所述的光学传感器,其中所述结构是笔直或弯曲的,如正弦弯曲或弯曲为弧形或弯曲为抛物线形。

[0153] 35.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述分布式布拉格反射器的最大高度小于所述波导的最大高度的50%,或小于所述波导的所述最大高度的40%,或小于30%,或小于25%,或小于20%,或小于15%,或小于10%,或小于5%。

[0154] 36.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述至少一个分布式布拉格反射器位于所述偏转元件上。

[0155] 37.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述至少一个分布式布拉格反射器位于所述波导的与所述偏转元件相对表面上。

[0156] 38.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述波导的最大宽度是所述波导的所述最大高度的至少10倍,或所述波导的所述最大高度的至少20倍,或至少30倍,或至少40倍,或至少50倍,或至少60倍,或至少70倍,或至少80倍,或至少90倍,或至少100倍。

[0157] 39.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述波导是反谐振反射式光学波导(ARROW)。

[0158] 40.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述波导由两个粘结衬底制成,所述衬底如硅或派热克斯玻璃或二氧化硅或熔融二氧化硅衬底。

[0159] 41.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述波导形成硅衬底中的凹部,所述衬底如硅或派热克斯玻璃或二氧化硅或熔融二氧化硅衬底。

[0160] 42.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述波导适合用于和/或适于引导光的至少一个高阶模,如多模波导。

[0161] 43.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其还包括邻近所述非实芯波导的一个或多个、优选两个实芯波导。

[0162] 44.如项目43所述的光学传感器,其中所述一个或多个实芯波导是折射率引导实芯波导。

[0163] 45.如项目43所述的光学传感器,其中所述一个或多个实芯波导是光子晶体或光子带隙波导。

[0164] 46.如前述项目43至45中任一项所述的光学传感器,其中所述一个或多个实芯波导适于用作耦合元件,所述耦合元件用于将光耦合入和/或耦合出所述非实芯波导的所述非实芯。

[0165] 47.如前述项目43至46中任一项所述的光学传感器,其中所述一个或多个实芯波导的所述实芯的一个末端的尺寸适于所述非实芯波导的所述非实芯的所述尺寸。

[0166] 48.如前述项目43至47中任一项所述的光学传感器,其中所述一个或多个实芯波导的所述实芯的一个末端的所述尺寸适于传输波导的尺寸,如光纤的尺寸。

[0167] 49.如前述项目43至48中任一项所述的光学传感器,其中所述一个或多个实芯波导的所述实芯的一个末端的模场适于所述非实芯波导的模场。

[0168] 50.如前述项目43至49中任一项所述的光学传感器,其中所述一个或多个实芯波导的所述实芯的一个末端的所述模场适于传输波导的模场,如光纤的模场。

[0169] 51.如前述项目43至50中任一项所述的光学传感器,其中所述一个或多个实芯波导在所述波导的一端或两端处逐渐变细。

[0170] 52.如前述项目43至51中任一项所述的光学传感器,其中所述非实芯波导和所述一个或多个实芯波导由两个粘结衬底制成,所述衬底如硅或派热克斯玻璃或二氧化硅或熔融二氧化硅衬底。

[0171] 53.如前述项目52中任一项所述的光学传感器,其中所述一个或多个实芯波导通过所述衬底中的一个上的至少三个水平层来垂直地界定,其中所述中间层具有比上包层和

下包层高的折射率。

[0172] 54.如前述项目52至53中任一项所述的光学传感器,其中所述一个或多个实芯波导通过所述衬底中的至少一个中的垂直凹陷或贯穿所述衬底中的至少一个的孔来水平地界定。

[0173] 55.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其还包括耦合元件,所述耦合元件用于将光耦合入和/或耦合出所述波导。

[0174] 56.如项目55所述的光学传感器,其中所述耦合元件被适配来使得光被同轴地/相对于所述核芯对称地耦合入所述波导中。

[0175] 57.如项目55所述的光学传感器,其中所述耦合元件被适配来使得光被离轴地/相对于所述核芯不对称地耦合入所述波导中。

[0176] 58.如项目55至57中任一项所述的光学传感器,其中所述耦合元件被适配来使得光以相对于所述核芯的非零角度耦合入所述波导中。

[0177] 59.如前述项目中任一项所述的光学传感器,其中所述至少一个偏转元件适于在受到来源于压力、位移、应变、温度、加速度、速度、旋转、扭矩、液体流动和/或温度的力作用时,改变所述波导的所述几何结构和/或尺寸。

[0178] 60.如项目1至59中任一项所述的光学传感器在力感测系统中的用途。

[0179] 61.一种力感测系统,其包括如项目1至59中任一项所述的光学传感器。

[0180] 62.一种传感器系统,其包括:

[0181] -至少一个光源,

[0182] -一个或多个光学传感器,其包括容纳分布式布拉格反射器的传感器光学波导,所述传感器光学波导适于引导来自所述至少一个光源的所述光的至少一个高阶模,

[0183] -至少一个发射光学波导,其用于将来自所述至少一个光源的光引导到所述一个或多个传感器光学波导,

[0184] -检测器,其用于测量在所述一个或多个传感器光学波导中从所述布拉格反射器反射的光,以及

[0185] -数据处理器,其适于分析所述反射光的所述至少一个高阶模的布拉格波长的变化。

[0186] 63.一种传感器系统,其包括:

[0187] -至少一个光源,

[0188] -一个或多个光学传感器,其包括容纳分布式布拉格反射器的多模传感器光学波导,

[0189] -至少一个发射光学波导,其用于将来自所述至少一个光源的光引导到所述一个或多个传感器光学波导,

[0190] -检测器,其用于测量在所述一个或多个多模传感器光学波导中从所述布拉格反射器反射的光,以及

[0191] -数据处理器,其适于分析所述反射光的至少一个高阶模的布拉格波长的变化。

[0192] 64.如项目62至63中任一项所述的传感器系统,其还包括一个或多个耦合元件,所述耦合元件用于将来自所述至少一个发射光学波导的所述光耦合入所述一个或多个传感器光学波导。

[0193] 65.如项目62至64中任一项所述的传感器系统,其中所述数据处理器适于所述反射信号的频率调制。

[0194] 66.如项目62至65中任一项所述的传感器系统,其还包括如环行器的耦合元件,所述耦合元件用于将从所述布拉格反射器反射的光耦合入所述检测器中。

[0195] 67.如项目62至66中任一项所述的传感器系统,其中所述光源是宽带光源。

[0196] 68.如项目62至67中任一项所述的传感器系统,其中所述光源是多模光源,以使得在所述传感器光学波导、所述传输波导中引导的所述光和所述反射光是多模光。

[0197] 69.如项目62至68中任一项所述的传感器系统,其中所述传感器系统包括多个复用光学传感器。

[0198] 70.如项目62至69中任一项所述的传感器系统,其中所述传感器系统包括多个复用光学传感器,并且其中每一个光学传感器中的所述分布式布拉格反射器适于反射特定和唯一波长的光。

[0199] 71.如项目70所述的传感器系统,其中所述多个光学传感器以串联、并联或串联和并联配置复用。

[0200] 72.如项目62至71中任一项所述的传感器系统,其中所述一个或多个光学传感器适合用于感测压力、位移、应变、温度、加速度、速度、旋转、扭矩、液体流动或温度的变化。

[0201] 73.如项目62至72中任一项所述的传感器系统,其中所述至少一个发射光学波导是光纤。

[0202] 74.如项目62至73中任一项所述的传感器系统,其中所述至少一个发射光学波导是偏振维持光纤,如Panda型PM光纤。

[0203] 75.如项目62至74中任一项所述的传感器系统,其中所述一个或多个传感器光学波导还适合用于引导所述光的基模,并且其中所述数据处理器适于分析所述反射光的所述基模的所述布拉格波长的变化。

[0204] 76.如项目62至75中任一项所述的传感器系统,其中一个或多个光学传感器是如项目1至59项中任一项所述的光学传感器中的一个或多个。

[0205] 77.一种用于改进传感器系统的灵敏度的方法,所述传感器系统包括适合用于引导光的至少一个高阶模的至少一个传感器光学波导,所述方法包括以下步骤:分析来自所述光学传感器系统的多个反射信号,以用于检测反射光的所述至少一个高阶模的布拉格波长的变化。



图 1a

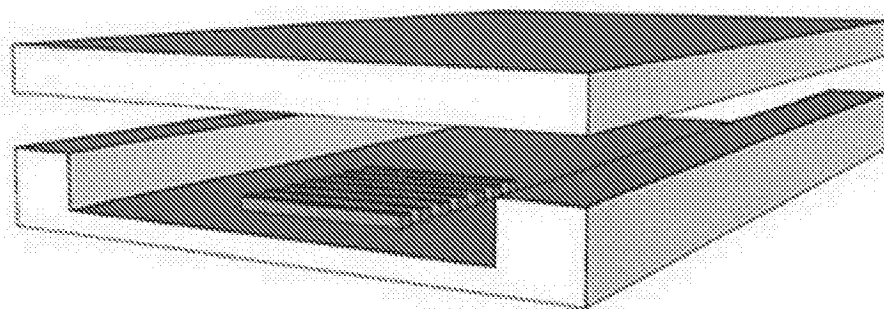


图 1b

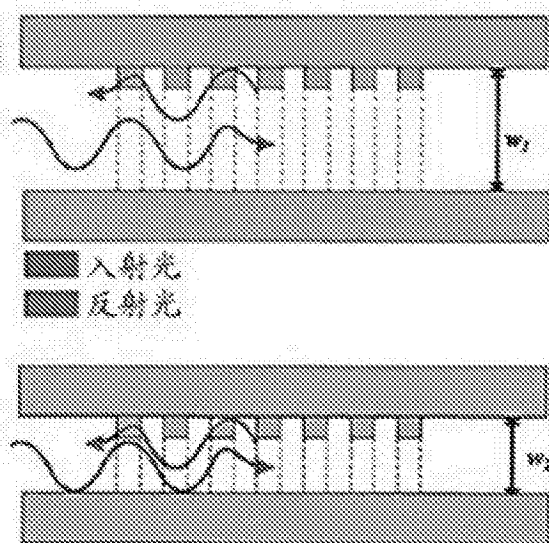


图 1c

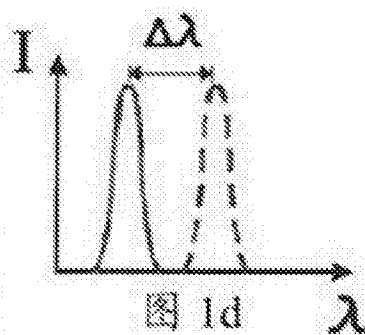


图 1d

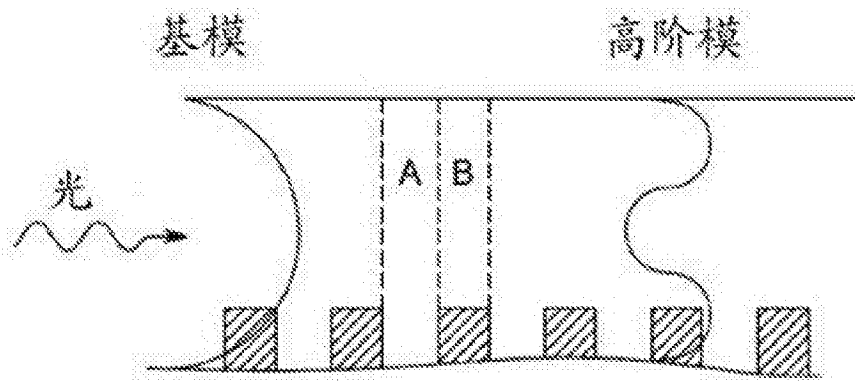


图 2

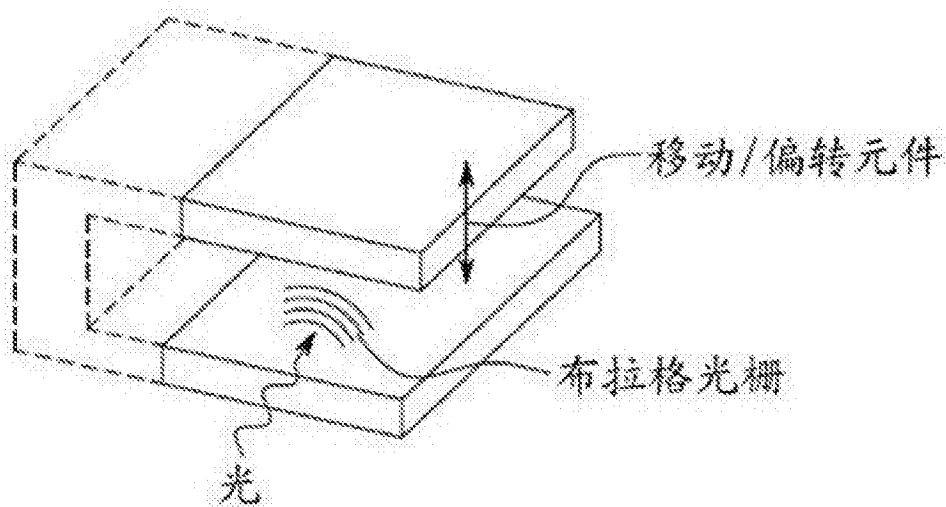


图 3a

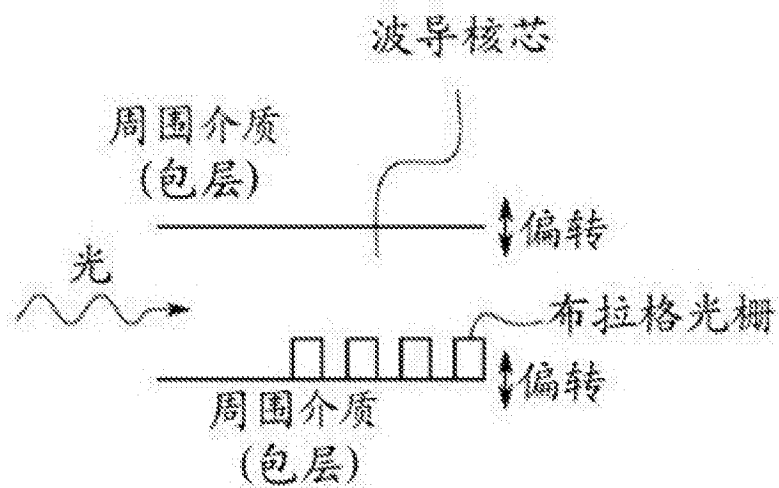


图 3b

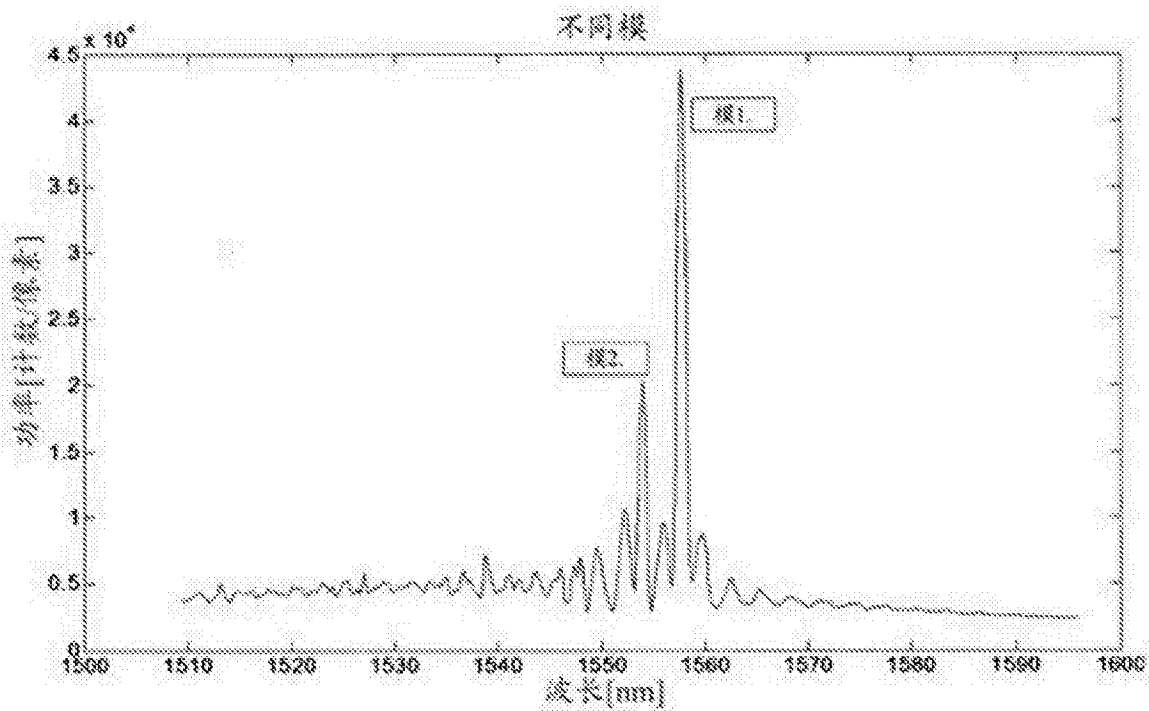


图 4

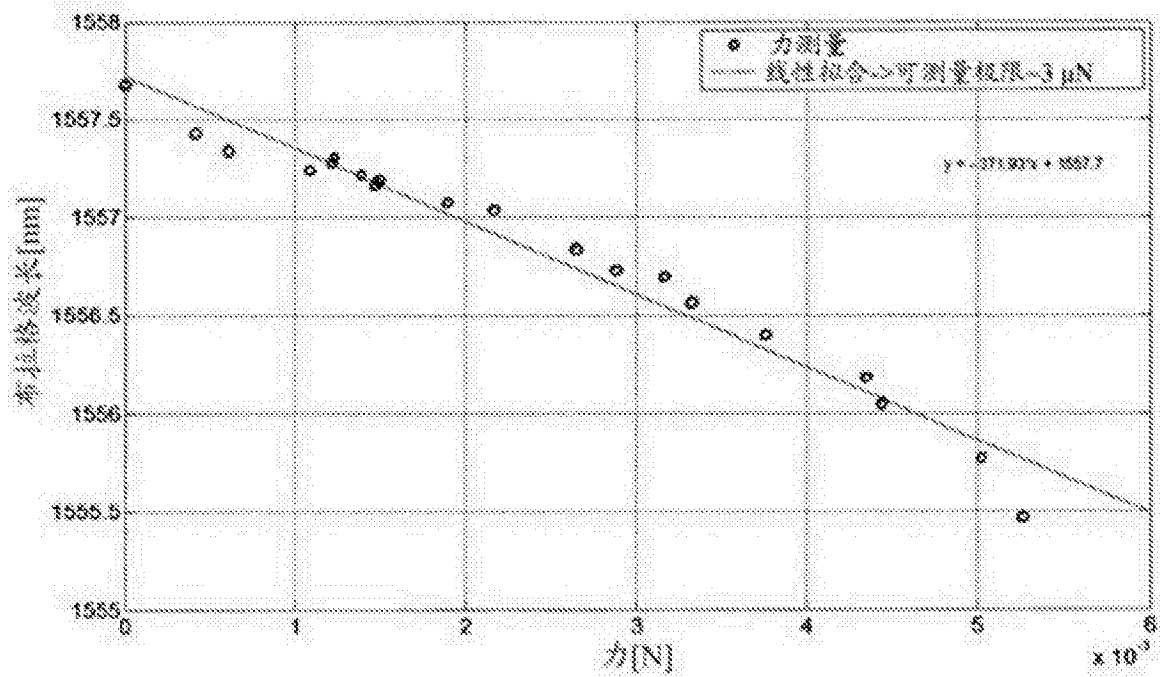
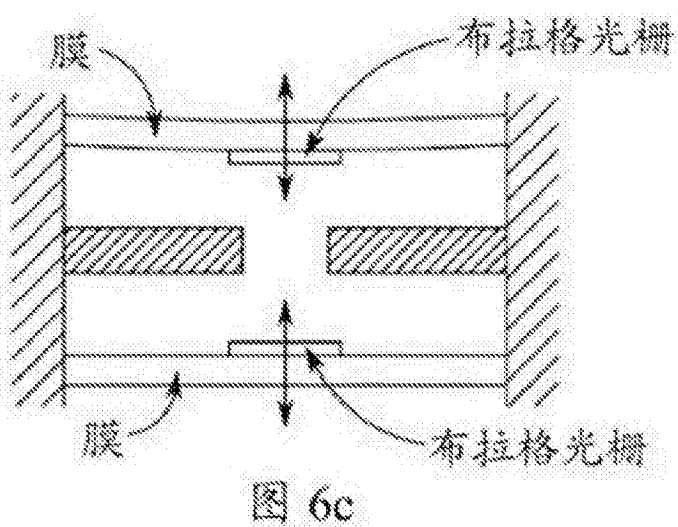
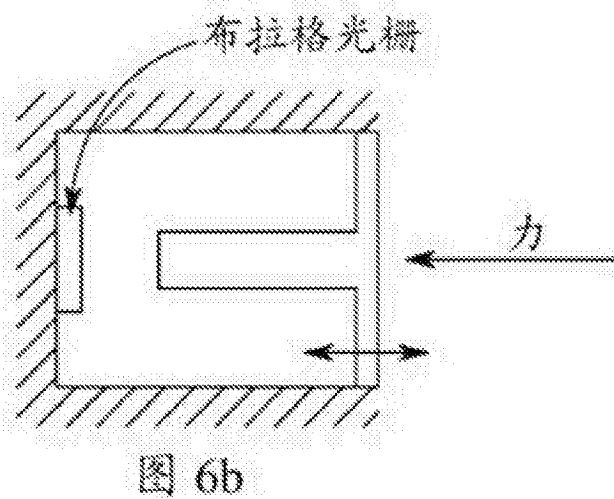
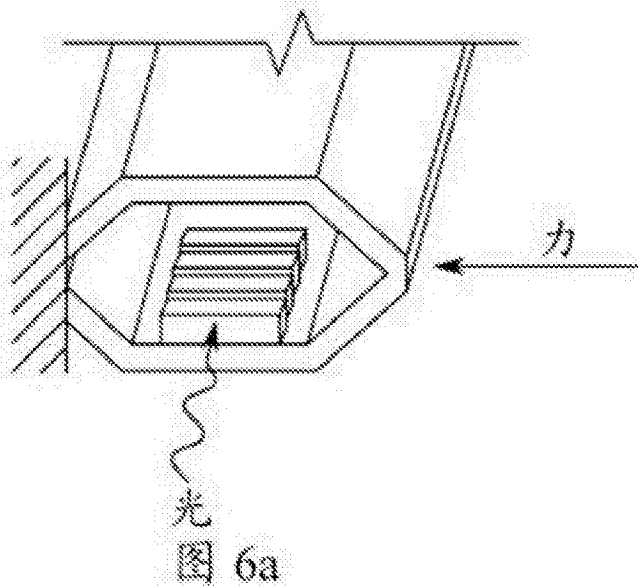


图 5



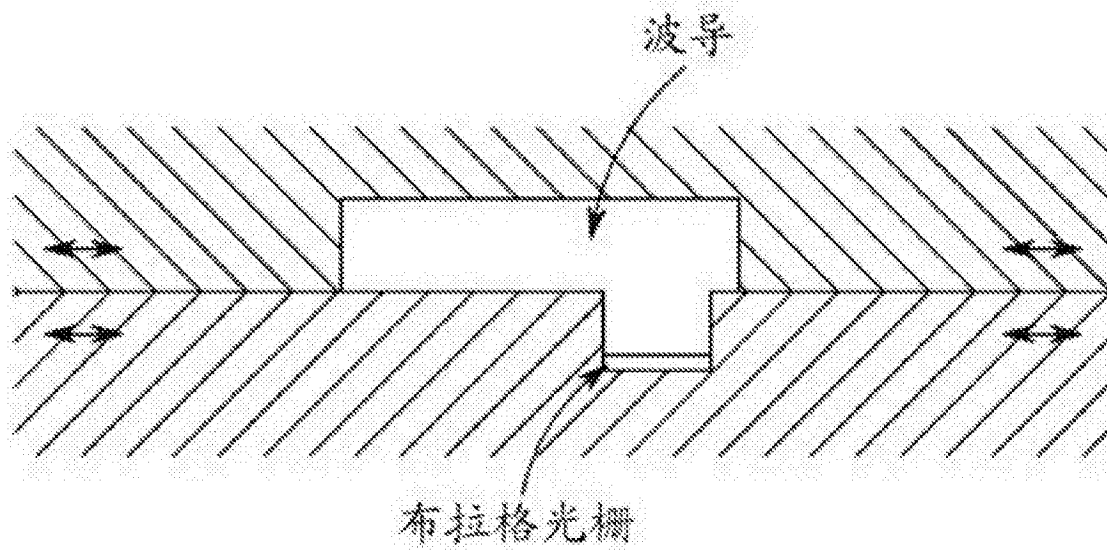


图 7a

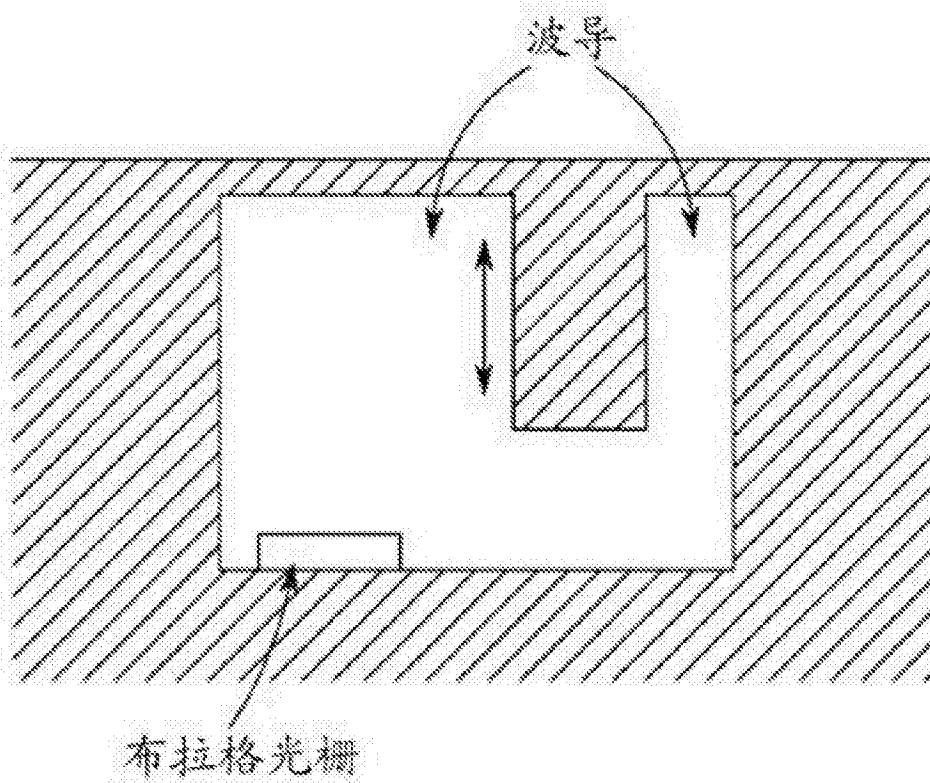


图 7b

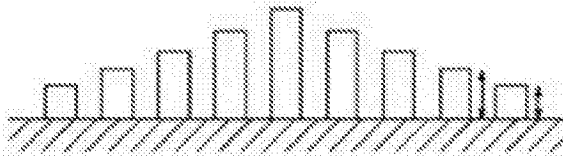


图 8a



图 8b

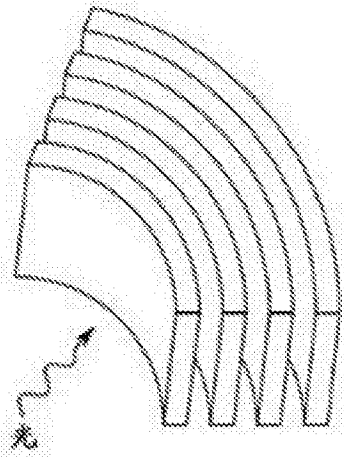


图 8c

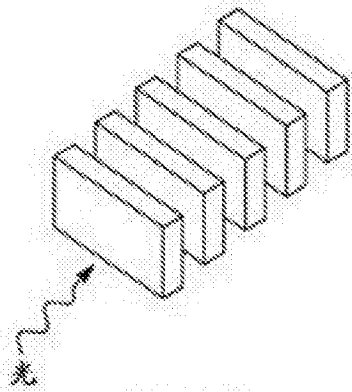


图 8d

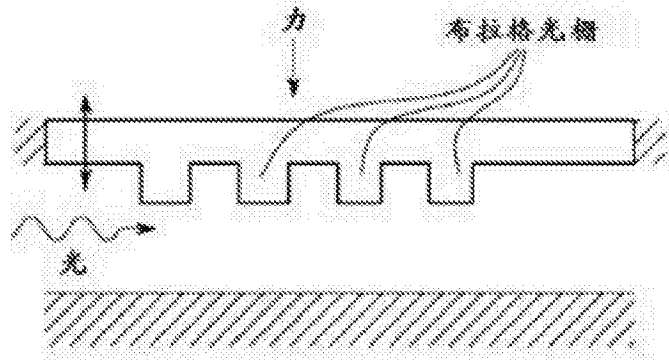


图 9a

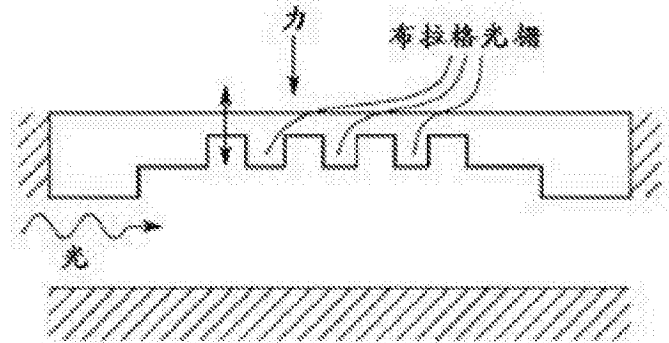


图 9b

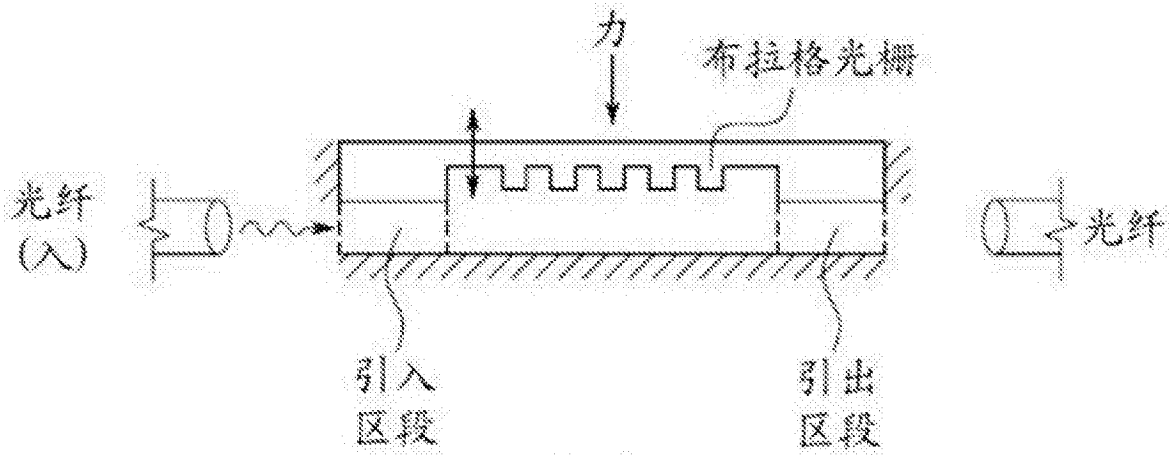


图 10a

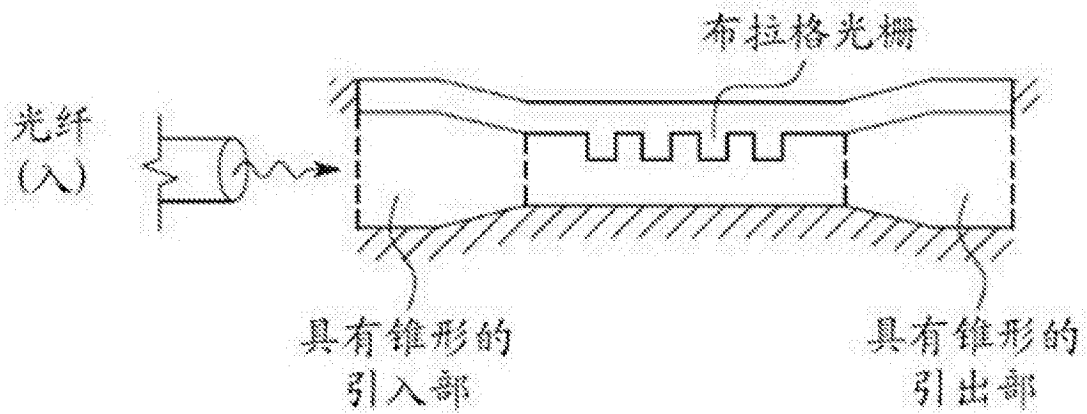


图 10b

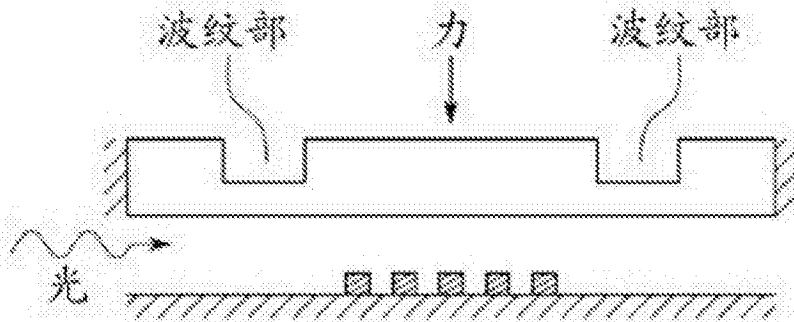


图 11a

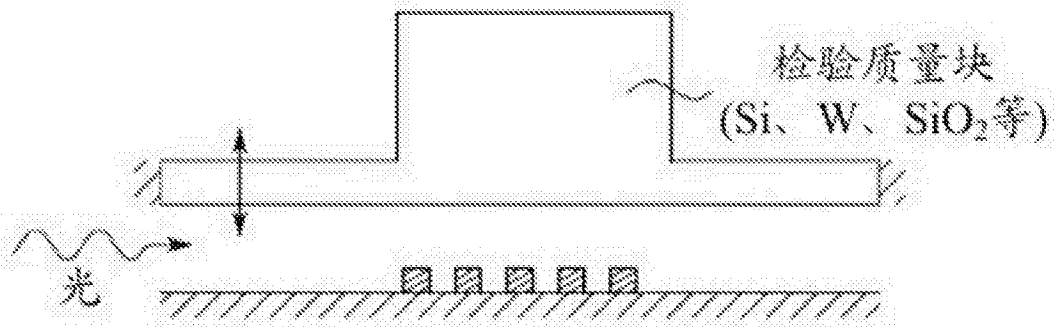


图 11b

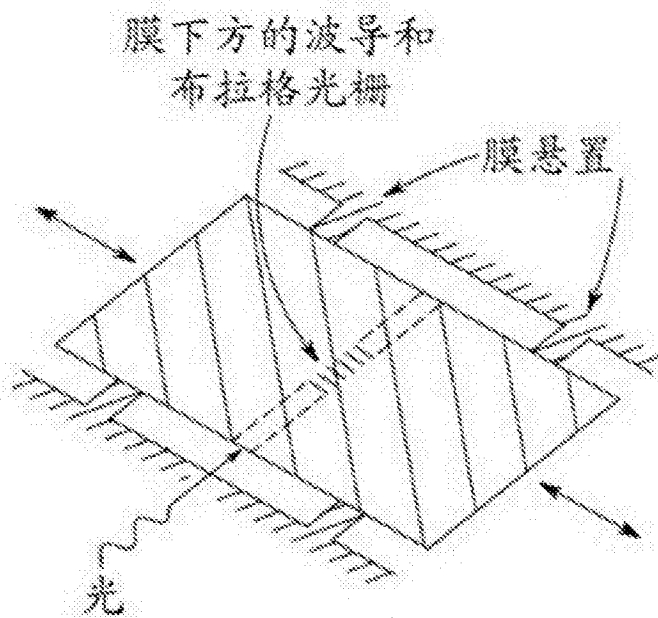


图 12

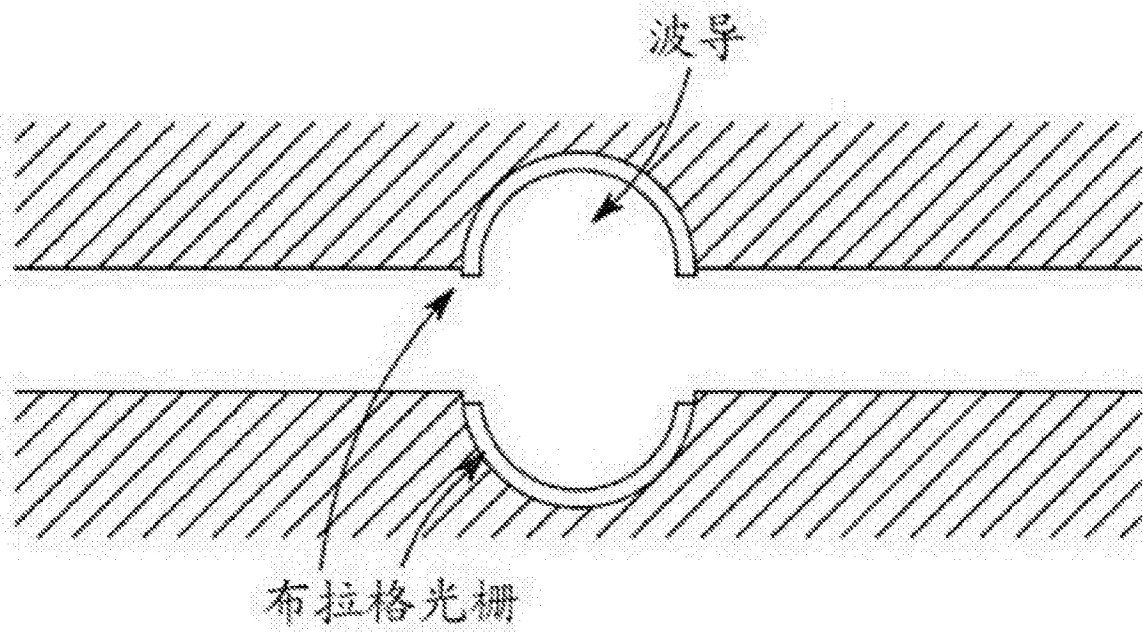


图 13a

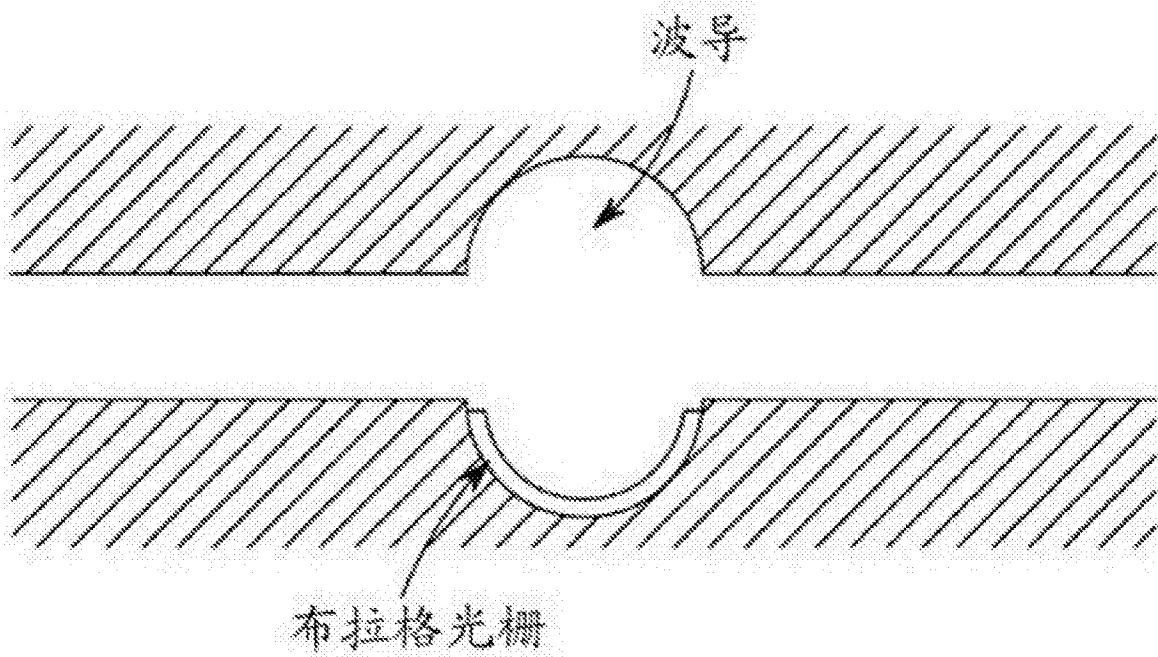


图 13b

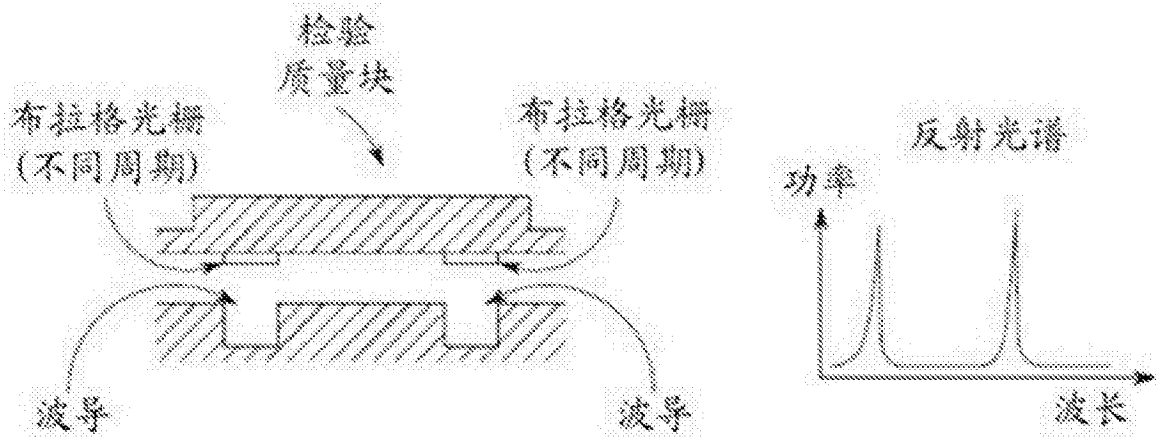


图 14A

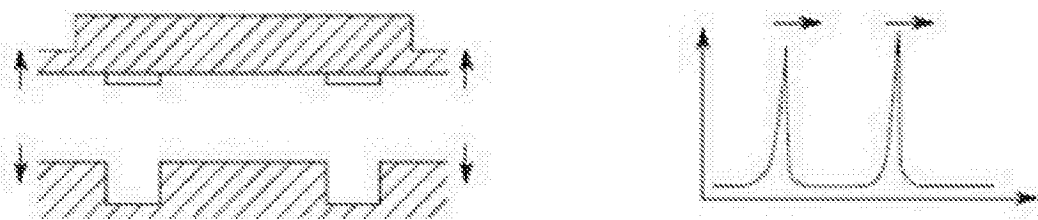


图 14B



图 14C

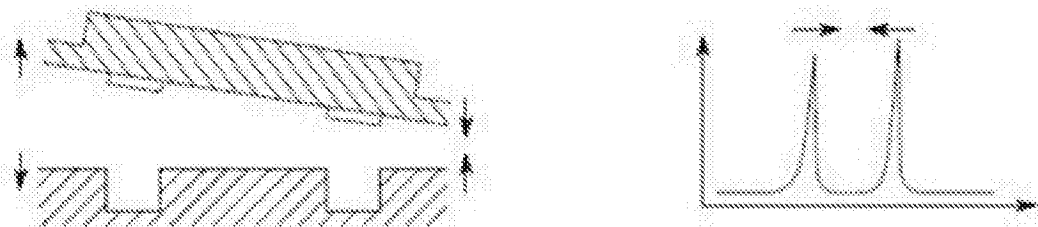


图 14D

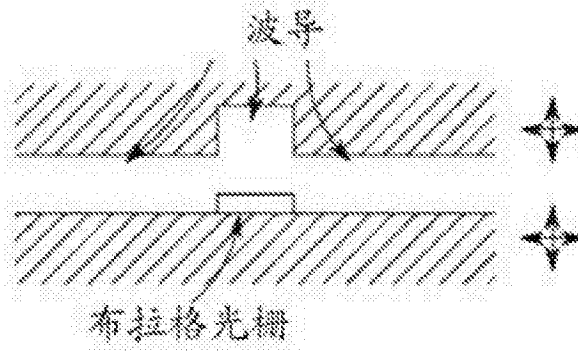


图 15A

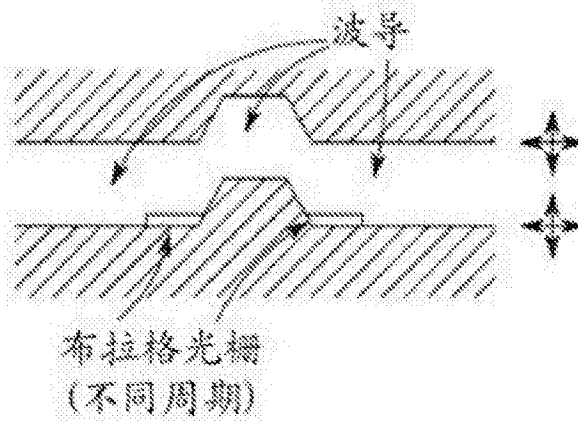


图 15B

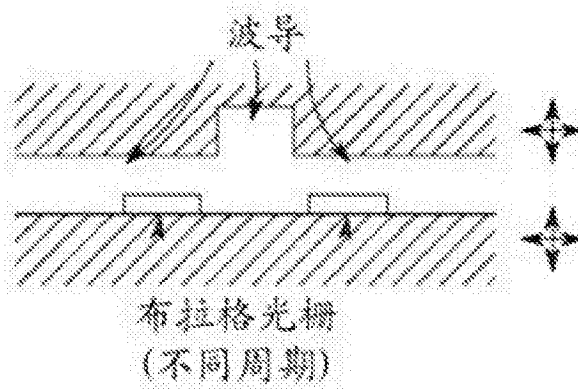


图 15C

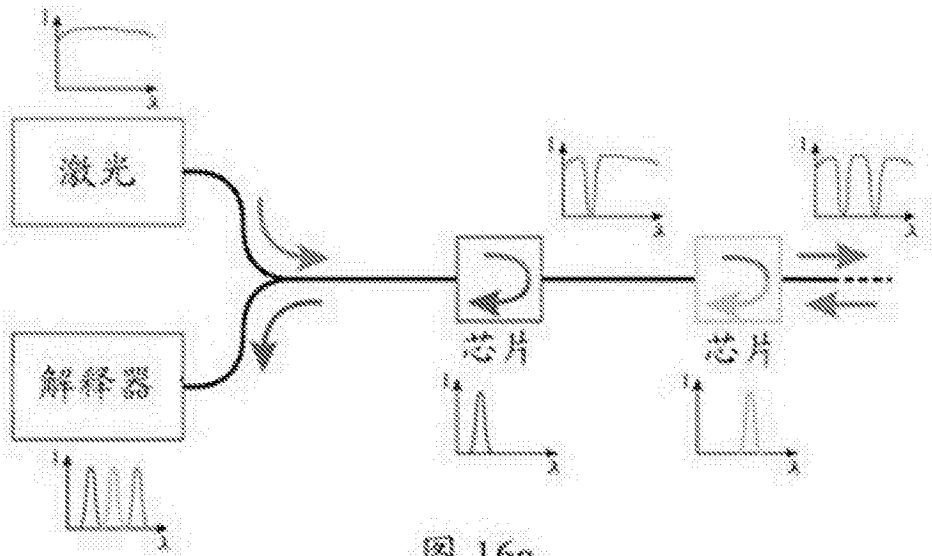


图 16a

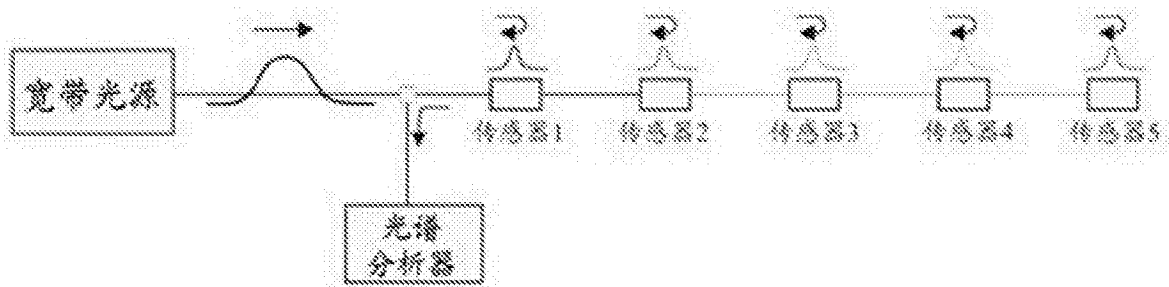


图 16b

