



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114503003 B

(45) 授权公告日 2024. 01. 26

(21) 申请号 202080068098.8

G01D 5/26 (2006.01)

(22) 申请日 2020.09.24

H01S 5/14 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 114503003 A

(56) 对比文件

US 2004258109 A1, 2004.12.23

CN 101202415 A, 2008.06.18

CN 104185932 A, 2014.12.03

CN 105281199 A, 2016.01.27

CN 105900298 A, 2016.08.24

CN 106058641 A, 2016.10.26

CN 106068586 A, 2016.11.02

CN 107078459 A, 2017.08.18

CN 1592992 A, 2005.03.09

CN 1765037 A, 2006.04.26

CN 1950738 A, 2007.04.18

CN 203377480 U, 2014.01.01

JP 2007157819 A, 2007.06.21

KR 20070028463 A, 2007.03.12

US 2004131102 A1, 2004.07.08

US 2013261010 A1, 2013.10.03

US 2017299822 A1, 2017.10.19

US 5485481 A, 1996.01.16

US 7355720 B1, 2008.04.08

JP 2011247894 A, 2011.12.08

US 2011292405 A1, 2011.12.01

(43) 申请公布日 2022.05.13

(30) 优先权数据

19200195.6 2019.09.27 EP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2022.03.28

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/EP2020/076737 2020.09.24

(87) PCT国际申请的公布数据

W02021/058653 EN 2021.04.01

(73) 专利权人 AMS国际有限公司

地址 瑞士尤纳

(72) 发明人 卡塔林·拉扎尔

戈兰·斯托扬诺维奇

科林·斯蒂尔

(74) 专利代理机构 北京柏杉松知识产权代理事

务所(普通合伙) 11413

专利代理师 程强 刘继富

(51) Int. Cl.

G02B 6/293 (2006.01)

审查员 李慧娟

权利要求书3页 说明书12页 附图5页

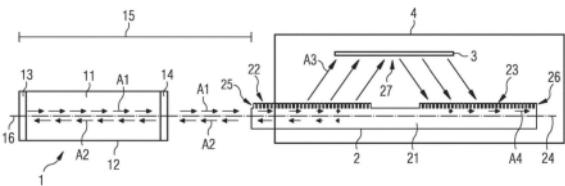
(54) 发明名称

光学器件、光子检测器、以及制造光学器件的方法

(57) 摘要

一种用于光学传感器的光学器件,包括:半导体激光器(1)的增益元件(11)、波长选择反馈元件(2)、以及传感元件(3)。波长选择反馈元件(2)的至少一部分和传感元件(3)被设置在公共传感器封装件(4)中。增益元件(11)被设置成产生和放大光学信号。增益元件(11)和波长选择反馈元件(2)形成半导体激光器(1)的外腔(15)的

至少一部分,从而提供反馈机制以根据光学信号维持激光振荡。波长选择反馈元件(2)被设置成耦合输出光学信号的一部分,并将光学信号的所述部分朝向传感元件(3)引导,以探测传感元件(3)的物理特性。



CN 114503003 B

1. 一种用于光学传感器的光学器件,其包括半导体激光器(1)的增益元件(11)、波长选择反馈元件(2)以及传感元件(3),其中:

-所述波长选择反馈元件(2)的至少一部分以及所述传感元件(3)被设置在公共传感器封装件(4)中,

-所述波长选择反馈元件(2)包括具有光栅周期 Λ 的至少一个衍射输入光栅(22),

-所述传感元件(3)可操作以将物理测量值转换为光学路径变化,所述光学路径变化通过经由参考路径的干涉来感测,

-所述增益元件(11)被设置成产生和放大光学信号,

-所述增益元件(11)和所述波长选择反馈元件(2)形成所述半导体激光器(1)的外腔(15)的至少一部分,从而提供反馈机制以根据光学信号维持激光振荡,并且

-所述波长选择反馈元件(2)被设置成耦合输出光学信号的一部分,并将光学信号的所述部分朝向所述传感元件(3)引导,以探测所述传感元件(3)的物理特性。

2. 根据权利要求1所述的光学器件,其中,所述增益元件(11)和所述外腔(15)被设置在所述公共传感器封装件(4)中。

3. 根据权利要求1或2所述的光学器件,其中,所述外腔(15)被设置成使得光学信号具有与光栅周期 Λ 相适应的波长。

4. 根据权利要求1或2所述的光学器件,其中,所述增益元件(11)包括边缘发射半导体激光器的激活增益区或表面发射半导体激光器的激活增益区。

5. 根据权利要求3所述的光学器件,其包括:

-至少一个另外的输出光栅(23),以及

-衬底主体(21),其中,所述至少一个衍射输入光栅(22)和所述至少一个另外的输出光栅(23)被设置在所述衬底主体(21)中或所述衬底主体上,并且与所述衬底主体(21)的主表面相邻。

6. 根据权利要求5所述的光学器件,其中,

-所述衬底主体(21)的主表面限定了光轴(24),所述光轴平行于所述主表面沿着所述衬底主体(21)的纵向方向延伸,并且

-所述至少一个另外的输出光栅(23)位于所述至少一个衍射输入光栅(22)的下游,其中所述至少一个衍射输入光栅(22)的输入侧(25)面向增益元件(11),输出侧(26)与所述至少一个另外的输出光栅(23)相关联。

7. 根据权利要求6所述的光学器件,其中,

-所述半导体激光器(1)包括激光腔(12),所述激光腔(12)具有沿着其纵向方向延伸的激光轴(16),

-所述激光轴(16)相对于所述衬底主体(21)的光轴(24)同轴,或者

-所述激光轴(16)相对于所述衬底主体(21)的光轴(24)倾斜。

8. 根据权利要求3所述的光学器件,其中,所述外腔(15)包括半导体激光器(1)的后反射镜(13)和作为前反射镜的所述至少一个衍射输入光栅(22)。

9. 根据权利要求1或2所述的光学器件,其中,

-所述外腔(15)包括半导体激光器(1)的后反射镜(13)和作为前反射镜的半透明反射

镜，

-所述至少一个衍射输入光栅(22)被设置在后反射镜(13)和半透明反射镜两者的下游。

10. 根据权利要求6所述的光学器件,其中,

-所述至少一个衍射输入光栅至少包括具有第一光栅周期的第一部分(28)和具有第二光栅周期的第二部分(29),

-所述第一部分(28)包括输入侧(25),

-所述第二部分(29)沿光轴(24)位于所述第一部分(28)的下游,并且

-所述第一部分(28)被设置用于将光学信号反射回到半导体激光器(1)中,所述第二部分被设置成将光学信号朝向传感元件(3)引导。

11. 一种光子检测器,其包括:

-根据权利要求1或2所述的至少一个光学器件,并且还包括:

-集成传感器芯片,其包括光学传感器、光学前端、电前端和/或处理单元中的至少一个;其中:

-所述至少一个光学器件和所述集成传感器芯片被设置在公共传感器封装件(4)中。

12. 根据权利要求11所述的光子检测器,其包括参考路径和传感路径,所述参考路径和传感路径被设置用于参考光束和传感光束的干涉。

13. 根据权利要求11或12所述的光子检测器,其中,所述光子检测器包括以下中的一个或多个:

-集成光学干涉仪,

-差分自由空间光学干涉仪,

-光学声学传感器,

-光学音频麦克风,

-光学音频扬声器控制设备,

-非接触式3D表面映射和传感设备,

-非接触式光子环境传感设备,和/或

-压力传感器。

14. 一种制造用于光学传感器的光学器件的方法,其包括以下步骤:

-将波长选择反馈元件的至少一部分和传感元件设置在公共传感器封装件中,其中,所述波长选择反馈元件(2)包括具有光栅周期 Λ 的至少一个衍射输入光栅(22),并且其中,所述传感元件(3)可操作以将物理测量值转换为光学路径变化,所述光学路径变化通过经由参考路径的干涉来感测,

-将增益元件相对于至少一个波长选择反馈元件和传感元件设置,使得增益元件可操作以产生和放大光学信号,

-使用增益元件和波长选择反馈元件形成半导体激光器的光学腔的至少一部分,从而提供反馈机制以根据光学信号维持激光振荡,以及

-将波长选择反馈元件设置成耦合输出光学信号的一部分,并将光学信号的所述部分朝向传感元件引导,以探测传感元件的物理特性。

15. 根据权利要求14所述的方法,其中,所述增益元件(11)和外腔(15)被设置在公共传

感器封装件(4)中。

16.一种用于光学传感器的光学器件,其包括半导体激光器(1)的增益元件(11)、波长选择反馈元件(2)以及传感元件(3),其中:

- 所述波长选择反馈元件(2)的至少一部分和传感元件(3)被设置在公共传感器封装件(4)中,
- 所述波长选择反馈元件(2)包括具有光栅周期 Λ 的至少一个衍射输入光栅(22),
- 所述传感元件(3)可操作以将压力或温度转换为光学路径变化,所述光学路径变化通过经由参考路径的干涉来感测,
- 所述增益元件(11)被设置成产生和放大光学信号,
- 所述增益元件(11)和所述波长选择反馈元件(2)形成所述半导体激光器(1)的外腔(15)的至少一部分,从而提供反馈机制以根据光学信号维持激光振荡,并且
- 所述波长选择反馈元件(2)被设置成耦合输出光学信号的一部分,并将光学信号的所述部分朝向所述传感元件(3)引导,以探测所述传感元件(3)的物理特性。

17.一种制造用于光学传感器的光学器件的方法,其包括以下步骤:

- 将波长选择反馈元件的至少一部分和传感元件设置在公共传感器封装件中,其中,所述波长选择反馈元件(2)包括具有光栅周期 Λ 的至少一个衍射输入光栅(22),其中,传感元件(3)可操作以将压力或温度转换为光学路径变化,其中,所述路径变化是能够通过经由参考路径的干涉来感测的,
- 将增益元件相对于至少一个波长选择反馈元件和传感元件设置成使得增益元件可操作以产生和放大光学信号,
- 使用增益元件和波长选择反馈元件形成半导体激光器的光学腔的至少一部分,从而提供反馈机制以根据光学信号维持激光振荡,以及
- 将波长选择反馈元件设置成耦合输出光学信号的一部分,并将光学信号的所述部分朝向传感元件引导,以探测传感元件的物理特性。

光学器件、光子检测器、以及制造光学器件的方法

[0001] 以下涉及光学传感器的领域,包括光学器件、光子检测器和制造光学器件的方法。

[0002] 光学传感器通常配备有集成在同一传感器封装件中的其自身的光源。示例包括飞行时间传感器、光谱传感器和接近传感器等。诸如垂直腔面发射激光器VCSEL或法布里-珀罗(Fabry-Perot)边缘发射半导体激光器之类的半导体激光器是可能的光源,因为它们能够与光学传感器的其他部件一起在晶圆级制造,然后可以集成到同一传感器封装件中,从而提供高度集成和专用的传感器解决方案。

[0003] 尤其是当外腔用诸如布拉格光栅之类的衍射光栅或类似物来补充时,外腔能够用于改善半导体激光器的性能。外腔还可以提高模式稳定性,从而提高激光器的相位稳定性,并降低激光光谱线宽和噪声。作为外腔一部分的衍射光栅提高了频率稳定性和调谐范围。借助于外部光栅,多模激光二极管可以变成单模的。示例包括DFB和DBR半导体激光器,尽管具有长腔,但它们通常是单模的。作为副作用,外腔可以提高激光转换效率。当半导体激光器与干涉仪一起使用时,上面提到的一些特性,如单模操作、模式和频率稳定性、低线宽和噪声,可能被证明是必不可少的。

[0004] 外腔能够用诸如布拉格光栅之类的衍射光栅来补充。衍射光栅可以具有多个衍射级,由其光栅方程确定。例如,如果一个衍射级被设置成将来自激光过程的入射波引导回激光腔中,则光栅可以充当用于半导体激光器的波长选择反馈元件。例如,光栅基本上可以取代激光器的前反射镜或后反射镜。例如,衍射光栅的另一个衍射级能够被引导到激光腔外并对准激光目标。存在放置衍射光栅以形成激光器的外腔的多种设置,诸如Littrow(图5a)、Littman Metcalf(图5b)或传输配置(图5c)。

[0005] 许多集成光学传感器系统基于干涉仪的原理工作。这种光学传感器可以由半导体激光器和传感元件组成。传感元件将物理测量值(例如压力、温度等)转换为光学路径变化,例如该光学路径变化通过与参考路径的干涉来感测。光学传感器可以具有诸如布拉格光栅之类的一个或多个衍射元件。这些光栅可以在传感器的输入、输出或核心内部用作耦合器。衍射光栅是波长选择的,并且激光波长与光栅周期之间的失配可能会降低系统性能。

[0006] 然而,为了使干涉仪具有良好的灵敏度,激光源应该是单模的,它支持稳定的波长、较小的噪声和线宽。法布里-珀罗边缘发射半导体激光器在纵向上是多模的。通常需要采取特殊措施来获得单模单波长光源。通常这种激光器被分布式反馈激光器(DFB)或分布式布拉格反射激光器(DBR)所取代。VCSEL半导体激光器可以被设计为在纵向上是单模的,但在横向上能够是多模的。半导体激光器通常与温度有关,即其激光波长随温度升高而增加。

[0007] 激光器和传感元件之间的波长匹配通常由激光二极管和传感元件各自良好的波长精度来支持。通常使用DFB或DBR激光器来代替法布里-珀罗激光器。这些激光二极管分别在其激光腔的末端集成了布拉格光栅,因此主要以单模工作。然而,在制造过程中,一些激光二极管可能在纵向上是双模的,例如在DFB激光器的情况下。因此,它们在制造过程中被分类,这进一步提高了它们的价格。借助于由一个或更多个衍射光栅构成的外腔,从激光二极管获得更精确、更稳定的波长。然而,这是一个庞大的解决方案,更适合实验室环境,而不

是大规模制造。为确保温度稳定性,激光二极管模块通常使用珀尔贴电池(Peltier cell)或类似装置进行热补偿。以上所有解决方案都很昂贵或体积庞大。

[0008] 考虑一种由半导体激光器和光学传感器件组成的光学传感器系统,该光学传感器件包括一个或更多个衍射光学器件,诸如衍射光栅、布拉格光栅或类似物。为了具有最佳性能,这种器件可能需要在激光波长与衍射元件之间进行良好匹配。半导体激光器可以示出波长的扩展(器件到器件),可以是多模的,即同时具有多个发射波长或随温度改变其波长。如果在包括光栅的光学传感器系统中使用半导体激光器作为光源,并且如果光栅周期和波长之间的关系非常关键(这在许多实际应用中通常是如此),则上述任何影响都可能导致激光波长与光栅周期不匹配,从而影响系统(激光+光学传感器)的性能。例如,假设激光束通过布拉格光栅从波导中朝向特定方向耦合输出。如果激光波长改变,或者如果光栅周期改变,或者如果两者以不同的速率均发生改变,则衍射光束改变其方向。这可能会影响系统性能。

[0009] 本发明的目的是提供具有改进的激光特性的光学器件、制造光学器件的方法和光子检测器。

[0010] 这些目的通过独立权利要求的主题来实现。进一步的改进方案和实施例在从属权利要求中描述。

[0011] 应当理解,除非描述为替代方案,所描述的关于任何一个实施例的任何特征可以单独使用,或者与在本文中描述的其他特征组合使用,并且也可以与任何其他实施例的一个或更多个特征、或者任何其他实施例的任何组合组合使用。此外,在不脱离如所附权利要求所限定的光学器件、制造光学器件的方法和光子检测器的范围的情况下,也可以采用以下未描述的等效物和修改。

[0012] 以下涉及光学传感器的领域中的一种改进的概念。改进的概念提出了改善集成光学传感器的激光特性的方法。例如,用于光学传感器的光学器件包括半导体激光器的增益元件、波长选择反馈元件和传感元件。提出将波长选择反馈元件(例如衍射光栅)与传感元件制成一体。这样,波长选择反馈元件能够是半导体激光器的外腔的一部分。

[0013] 在至少一个实施例中,用于光学传感器的光学器件包括半导体激光器的增益元件、波长选择反馈元件和传感元件。波长选择反馈元件的至少一部分和传感元件设置在公共传感器封装件中。增益元件和波长选择反馈元件形成半导体激光器的外腔的至少一部分。

[0014] 增益元件被设置成产生和放大光学信号。例如,增益元件包括来自半导体材料的激活激光介质(也称为增益介质或激光介质),该半导体材料能够被视为半导体激光器内的光学增益的源。增益元件和波长选择元件提供反馈机制,以根据光学信号维持激光振荡。增益由增益元件中的受激发射产生,例如激活激光介质由泵浦源激发。光学信号由激光振荡产生,并构成给定波长的电磁辐射。光学信号的波长可以在红外(IR)光谱、可见光(Vis)光谱、或紫外线(UV)光谱中。波长选择反馈元件被设置成耦合输出光学信号的一部分。光学信号的所述部分被朝向传感元件引导以探测传感元件的物理特性。光学信号的所述部分能够被视为用于探测传感元件的激光。

[0015] 光学器件使得半导体激光器自身能够调谐到用于传感元件(或目标)(例如,用于传感器光栅周期)的最佳波长,甚至进行实时调谐。这使得激光器能够在波长上跟踪目标,

并将光学器件保持在最佳工作点。相比之下,当前系统在开始操作时需要精确调整激光波长,然后尽可能保持光学器件的环境条件稳定,因为光栅和传感元件可能会发生不同的变化(例如,随温度变化)。代替独立于目标调节激光波长,半导体激光器可以将自身调节至目标(即传感元件)定义的波长。这是可行的,因为外腔至少部分地与激光目标形成公共主体,而不是像普通外腔激光器那样附接到激光器。改进的概念得到了应用类型的支持,例如传感器与激光器的集成。光学器件的所有部件都没有固定的参考波长。相反,目标在很大程度上可以自由改变其特性,从而成为“主”激光波长。激光器能够被视为“从激光器”,因为它跟踪“主激光器”施加的频率。激光器对波长选择反馈元件的跟踪持续进行,例如实时进行。例如,这减少了将激光器和传感器元件保持在恒定环境条件下以确保波长稳定性和避免热膨胀的限制。

[0016] 在至少一个实施例中,增益元件和外腔设置在公共传感器封装件中。这样,至少波长选择反馈元件、传感元件、增益元件和外腔都设置在公共传感器封装件中。一方面,这允许光学器件的紧凑设计。光学器件可以用附加部件来补充,以便在公共传感器封装件中创建光子检测器。另一方面,将所述部件全部设置在同一传感器封装件中进一步改善了激光器特性。在某种意义上,至少一个波长选择反馈元件、传感元件、增益元件和外腔通过公共传感器封装件进行机械、光学和热耦合。由于耦合,光学器件的所述部件都类似地受到环境条件的影响。半导体激光器波长跟踪波长选择反馈元件的周期,从而抵消例如热膨胀对光路稳定性的影响。一般来说,增益元件或激光器能够在公共传感器封装件之外,前提是波长选择反馈元件是公共传感器封装件的一部分。

[0017] 公共传感器封装件被设置为使光学器件的部件对准。例如,公共传感器封装件包括对光学器件进行限界的诸如模具结构之类的框架主体。例如,框架主体可以具有侧壁和/或覆盖部分,至少波长选择反馈元件和传感元件附接到该侧壁和/或覆盖部分。

[0018] 公共传感器封装件的另一个示例是诸如硅之类的单件半导体,在其中至少嵌入有波长选择反馈元件和传感元件两者,例如通过半导体器件制造工艺(如光刻、蚀刻、注入、扩散、氧化等)。例如,波长选择元件能够是蚀刻在光学波导中的(布拉格)光栅,该光学波导例如由半导体的表面的电介质(例如二氧化硅、氮化硅)制成,而传感元件能够是同一光栅和蚀刻在同一件半导体上的MEMS膜的组合。两个元件共用的公共半导体衬底确保两个元件具有相同的热/机械膨胀。

[0019] 在至少一个实施例中,波长选择反馈元件包括具有光栅周期 Λ 的至少一个衍射输入光栅。外腔被设置成使得光学信号具有与光栅周期相适应的波长。

[0020] 至少一个衍射输入光栅支持光学信号的跟踪,该光学信号作为激光经由输入光栅朝向传感元件被引导。术语“与光栅周期相适应的”表示当半导体激光器和/或传感元件和/或输入光栅由于环境条件的变化(诸如温度、应变等)而受到扰动时,半导体适应光学信号以拟合输入光栅的光栅周期。反过来,可以根据描述光学器件的光栅方程(例如布拉格方程)来定义对光栅周期的“拟合”。

[0021] 因此,尽管半导体激光器、输入光栅和传感元件可能容易受到不同的环境条件(诸如机械应变或温度)的影响,但由于公共传感器封装件和波长选择反馈的耦合,它们将相互跟踪。因此,在外部条件变化的情况下,光学器件保持甚至改善其预期的激光特性。例如,作为激光耦合输出的光学信号或其一部分被锁定在由输入光栅确定的波长上。这也降低了制

造时所需的精度,即允许激光波长和传感器光栅存在一些“失配”。当组合在一起时,由激光波长 λ 表示的光学信号将对准输入光栅周期 Λ 。这使得在光栅周期和激光器中有更大的裕度,因为半导体激光器最终会自我调整,并至少在一定程度上消除失配。与制造商或客户必须提供热稳定和机械稳定器件的方法相比,光学器件更便宜,并且更容易小型化或集成到光子检测器中。

[0022] 在至少一个实施例中,增益元件包括边缘发射半导体激光器的激活增益区。可替代地,增益元件包括表面发射半导体激光器的激活增益区。这些类型的半导体激光器采用半导体二极管结作为激活增益区(或激活激光介质)。

[0023] 在至少一个实施例中,增益元件包括在其中设置有激活激光介质的激光腔。例如,激光腔包括后反射镜和半透明前反射镜。应该注意的是,激光腔不同于由增益元件和波长选择反馈元件形成的外腔。然而,激光过程在很大程度上由外腔确定,而不是激光腔。例如,可以由输入光栅限定为前反射镜的半透明前反射镜不影响外腔的激光过程。

[0024] 术语“外腔”能够理解为相对于激光腔的外部。对于半导体激光器,在本文件中,“激光腔”指的是受限于半导体的体积的光学腔,通常由涂覆在其表面的反射镜限定。与此相反,“外腔”是指具有反射镜(或反射器)中的至少一个的位于半导体体积外部的光学腔。激光腔能够保持完整,即半导体激光器能够按照原样施加到通用传感器封装件中。或者,能够将半导体激光器改变成使得例如移除半透明前反射镜或利用抗反射涂层替换半透明前反射镜。

[0025] 在至少一个实施例中,光学器件还包括至少一个另外的输出光栅和衬底主体。至少一个输入光栅和至少一个另外的输出光栅被设置在衬底主体中或衬底主体上,例如与衬底主体的主表面相邻。衬底主体可以具有诸如硅或其他材料(如 SiO_2 、 Si_3N_4 等)之类的半导体,其对于目标波长或在目标波长范围内是透明的。例如,硅在一定程度上在红外IR中是透明的。此外,当使用以IR发射的VCSEL激光器时,IR可能是目标波长或范围。在其他应用中,衬底主体可以在诸如Vis或UV之类的其他光谱范围内是透明的。这样,衬底主体可以用作光学信号或激光的光学波导。

[0026] 衬底主体可以包括在衬底主体的表面(例如光栅下方)扩散/注入或沉积的光学波导。以其有效折射率 n_{eff} 为特征的这种光学波导可以在光栅之间(例如分别在输入光栅与第一光栅之间、在第二光栅与输出光栅之间)限制和传输光。光学波导是可选的,但可以帮助降低损耗,并增加激光束与光栅之间的相互作用。

[0027] 输入光栅和输出光栅两者都可以设置在衬底主体中。这样,它们的光栅周期是恒定且良好限定的比率。如果光栅中的任何一个以一定系数膨胀(例如,由于温度变化),则其他光栅应以相同的系数膨胀。

[0028] 在至少一个实施例中,衬底主体的主表面限定了光轴,所述光轴平行于主表面沿着衬底主体的纵向方向延伸。至少一个输出光栅位于至少一个输入光栅的下游。输入光栅的输入侧面向增益元件,输出侧与输出光栅相关联。光学波导能够用光轴来表征,反过来,光学波导能够被视为光轴的具体化。

[0029] 在至少一个实施例中,半导体激光器包括激光腔,该激光腔具有沿着激光腔的纵向方向延伸的激光轴。激光轴相对于衬底主体的光轴同轴。该实施例能够被视为具有掠入射的Littrow类型设置。输入光栅充当半导体激光器的外腔的前反射镜。光栅周期 Λ 和有效

折射率的变化迫使激光波长 λ 相应变化,使得关系 $\sin\theta_d=0$ 成立。术语 θ_d 表示衍射角。来自激光器的提取光束可以保持垂直于输入光栅,与光栅周期 Λ 和有效折射率变化无关。

[0030] 可替代地,激光轴相对于衬底主体的光轴倾斜。这允许实现不同类型的设置,诸如Littrow或Littman-Metcalf配置,其中输入光栅能够被视为外腔的一部分。在Littman-Metcalf设置的情况下,外腔能够由充当外腔的前反射镜的至少一个以上的反射镜来补充。这种设置也迫使激光波长 λ 跟踪光栅周期 Λ 和有效折射率的变化。

[0031] 在至少一个实施例中,外腔包括半导体激光器的后反射镜和作为前反射镜的至少一个输入光栅。

[0032] 在至少一个实施例中,外腔包括半导体激光器的后反射镜和作为前反射镜的半透明反射镜。此外,输入光栅被设置在后反射镜和半透明反射镜的下游。外腔能够基于Littman-Metcalf配置实现。例如,激光轴能够相对于衬底主体的光轴同轴。输入光栅能够位于准直透镜的下游,该准直透镜与激光轴同轴。输入光栅的一级能够被设置成反射光学信号,输入光栅的另一级能够被设置成传输光学信号。输入光栅可以相对于激光轴倾斜,以便配置反射和透射的两个级。例如,相对于激光轴的倾斜角度可能为45度。

[0033] 在至少一个实施例中,输入光栅至少包括具有第一光栅周期的第一部分和具有第二光栅周期的第二部分。第一部分包括输入侧。第二部分沿光轴位于第一部分的下流。第一部分被设置用于将光学信号反射回到半导体激光器中。第二部分被设置成将光学信号朝向传感元件引导。

[0034] 由于设计限制,可能无法实现具有两个或更多个衍射级的输入光栅,其中至少一个衍射级用于传感元件,另一个衍射级用于外腔。然而,将输入光栅分成若干部分,可以在设计光学器件时提供更大的自由度。例如,输入光栅可以分别具有具有不同周期的部分。一个部分设置用于反射回到半导体激光器中的第一周期,具有第二光栅周期的第二部分被设置成将激光朝向传感元件引导。通常,两个部分共享相同的衬底,以便在相互关联的变化参数(诸如温度或机械应力)的情况下具有可能的形变。

[0035] 在至少一个实施例中,光子检测器包括根据上述概念的光学器件中的至少一个。此外,光子检测器包括集成传感器芯片,该集成传感器芯片包括光学传感器、光学前端、电前端和/或处理单元中的至少一个。至少一个光学器件和集成传感器芯片设置在公共传感器封装件中。

[0036] 光子检测器能够被实现为单个器件集成的光学解决方案。除了光学器件之外,还可以在相同的公共传感器封装件中实现另外的部件,包括用于接收传感器信号的模拟或数字光学前端、用于控制光子检测器的操作的模拟电子前端、诸如Cortex处理器之类的处理单元、同步解调器、集成激光驱动器和/或光学滤波器。

[0037] 在至少一个实施例中,光子检测器包括参考路径和传感路径,该参考路径和传感路径被设置用于参考光束和传感光束的干涉。例如,传感路径涉及外腔、输入光栅和输出光栅以及传感元件。参考路径不穿过传感元件。来自传感路径的输出信号(即在传感元件处偏转后)可随后与来自参考路径的输出信号叠加。由于干涉,能够产生最终输出,该最终输出然后构成光子器件的输出。该输出的处理或预处理可能已经在芯片上执行,例如通过处理单元执行。

[0038] 在至少一个实施例中,光子检测器包括集成光学干涉仪、差分自由空间光学干涉

仪、光学声学传感器、光学音频麦克风、光学音频扬声器控制设备、光学音频显示表面麦克风或扬声器、非接触式3D表面映射和传感设备、非接触式光子环境传感设备和/或压力传感器中的至少一个。

[0039] 在至少一个实施例中,制造用于光学传感器的光学器件的方法包括以下步骤。首先,将波长选择反馈元件的至少一部分和传感元件设置在公共传感器封装件中。将增益元件相对于至少一个波长选择反馈元件和传感元件设置,使得增益元件可操作以产生和放大光学信号。使用增益元件和波长选择反馈元件形成半导体激光器的光学腔的至少一部分。因此,提供了一种反馈机制,以根据光学信号的波长维持激光振荡。最后,将波长选择反馈元件被设置成耦合输出光学信号的一部分,并将所述光学信号的所述部分朝向传感元件引导,以便探测传感元件的物理特性。

[0040] 在至少一个实施例中,将增益元件和外腔设置在公共传感器封装件中。

[0041] 制造光学器件的方法的另外的实施方式容易地从上述光学器件和光子检测器的各种实施方式和实施例得出,反之亦然。

[0042] 在下文中,参照附图进一步详细地描述以上提出的概念,其中提出了示例实施例。在下文呈现的实施例和附图中,相似或相同的元件可以分别提供有相同的附图标记。然而,附图中所示的元件及其彼此之间的尺寸关系不应被视为真实的比例关系,而是可能放大单个元件(诸如层、部件和区域),以便能够更好地说明或更好地理解。

[0043] 图1示出了光学器件的示例实施例,

[0044] 图2示出了示例输入光栅的衍射模式,

[0045] 图3示出了光学器件的另一个示例实施例,

[0046] 图4示出了另一个示例输入光栅的衍射模式,以及

[0047] 图5A至图5C示出了现有技术的空腔配置。

[0048] 图1示出了示例光学器件。光学器件包括半导体激光器1的增益元件11、波长选择反馈元件2、以及传感元件3。波长选择反馈元件2和传感元件3设置在公共传感器封装件4中。增益元件11也能够设置在公共传感器封装件4(未示出)中,或者可以是如图所示的公共传感器封装件4外侧的外部部件。公共传感器封装件4被设置成容纳和对准光学器件的部件。例如,公共传感器封装件4包括框架主体,至少波长选择反馈元件2和传感元件3附接到该框架主体。例如,能够模制框架主体。另一个示例是将元件2和3构建到公共硅衬底中,该衬底因此代表公共传感器封装件。此外,公共传感器封装件4可以包括光子检测器的另外的部件,例如光学传感器、控制和数据处理单元,它们将光学器件补充为例如全光子检测器。

[0049] 通常,光学器件能够用于各种光学传感器或光子检测器中。通过这种方式,光学器件可应用于例如集成光学干涉仪、差分自由空间光学干涉仪、光学声学传感器、光学音频麦克风、光学音频扬声器控制器、光学音频显示表面麦克风和扬声器、非接触式3D表面映射和传感、非接触式光子环境传感、压力传感器和外腔激光器。由半导体激光器的增益元件、波长选择反馈元件(诸如布拉格光栅)和传感元件组成的任何传感器可以与本文所述的光学器件一起使用。传感元件3能够被视为将物理测量值(例如压力、温度等)转换为光学路径变化的任何元件,该光学路径变化然后可以通过例如与参考路径的干涉来感测。

[0050] 半导体激光器1的增益元件11包括激活增益区(或激活激光介质),例如半导体二极管结。此外,增益元件11包括在其中设置有激活激光介质的激光腔12。本实施例中的激光

腔12包括后反射镜13和半透明前反射镜14。这种构造可通过诸如边缘发射半导体激光器、表面发射半导体激光器(例如垂直腔表面发射激光器或VCSEL)之类的半导体激光器来实现。

[0051] 波长选择反馈元件2包括衬底主体21。衬底主体21可以包括例如半导体,诸如硅或者对于目标波长透明或者在目标波长范围内透明的另一材料。例如,硅在一定程度上在红外线(IR)中是透明的。此外,当使用以IR发射的VCSEL激光器时,IR可能是目标波长或范围。对衬底、目标波长和激光发射的类似考虑也适用于其他应用。用于传感应用的红外半导体激光器波长为780至850nm(AlGaAs)或900至980nm(InGaAs)。

[0052] 在衬底主体21中设置有诸如布拉格光栅之类的第一衍射光栅22。在本实施例中,衬底主体21包括光学波导,布拉格光栅是在(例如衬底21或波导的)折射率发生周期性变化的光学波导中制作的衍射光栅。这种周期性的变化会导致在其中心波长周围的带宽内的大反射,这满足了用于光栅反射的布拉格条件。如果满足布拉格条件,光栅的波数与入射波和反射波的波数之差相匹配。反过来,其他波长只受布拉格光栅的微弱影响或不受其影响。类似地,当入射的角度改变时,反射几乎或完全消失。例如,这些特性允许将布拉格光栅用作光学滤波器。此外,承载第一衍射光栅的衬底主体21能够用作光子波导或包括光子波导,并且由于光栅而允许选择分别耦合输出或耦合输入波导的波长。

[0053] 同一衬底主体21可以具有第二衍射光栅23。第二衍射光栅23也能够是布拉格光栅,并且可以与第一衍射光栅22间隔开。例如,衬底主体21具有限定光轴24的主表面。光轴24沿着衬底主体21的纵向方向延伸。考虑到光轴24,第二衍射光栅23位于第一衍射光栅22下游,其中,第一衍射光栅22的输入侧25面向增益元件11,输出侧26与第二衍射光栅23相关联。增益元件11和具有两个布拉格光栅22、23的衬底主体21相对于公共光轴24同轴设置。

[0054] 第一衍射光栅22,或者简称为输入光栅,被设计为具有至少两个衍射级,以分别促进传感器和激光操作。衍射的至少一级朝向增益元件11或激光腔12引导。光栅22的第二衍射级首先朝向传感元件3引导(参见箭头A3)。然后,在传感元件3上反射并通过第二光栅23耦合输入到输出波导中之后,该光束到达输出26。通常,例如,输出侧26面向光学传感器或者是光子检测器的一部分。因此,输入光栅22具有允许所述两个衍射级的周期 Λ ,以便将光传输到光学传感器或光子检测器中,并将光向后反射到增益元件11或激光腔12。这样,输入光栅22,例如布拉格光栅,也成为用于半导体激光器1的外反射镜。反过来,半导体激光器1变为外腔激光器。

[0055] 第二光栅23在功能上可以不是波长选择反馈的一部分。第二光栅23可操作用于将从传感元件3入射的光束耦合输入到输出(波导)中。物理上,例如,第二光栅23能够与第一(输入)光栅22间隔开或者相邻。

[0056] 外腔15包括增益元件11或激光腔12,以及输入光栅22。激光腔12包括后反射镜13,该后反射镜也有效地构成外腔15的后反射镜。然而,由输入光栅22限定为前反射镜的半透明前反射镜14不影响外腔15的激光过程。事实上,例如,前反射镜14能够被移除或用抗反射涂层替换。

[0057] 传感元件3在公共传感器封装件4中例如沿着光轴24与输入光栅22和输出光栅23相对地并位于它们之间地(例如相对于光轴24)设置。在输入光栅22、传感元件3与输出光栅23之间建立光学路径27。传感元件3能够是将物理测量值(例如压力、温度等)转换为光学路

径27的变化的任何元件,该光学路径的变化然后可以通过例如与参考路径的干涉来感测。在该示例中,传感元件3由设置在公共传感器封装件4中的MEMS膜实现。

[0058] 输入光栅22能够被视为外腔15的前反射镜和探测传感元件的传感器部件两者。半导体激光器1构成外腔激光器,该外腔激光器在波长 λ 上与其目标相关、由传感元件3以及两个光栅22和23一起组成的光学器件,并且在光学器件和/或光学传感器的操作期间如将在以下所讨论地跟踪最佳波长。

[0059] 输入信号激励增益元件11的激活激光介质。在外腔15中产生光信号或激光并诱导光信号或激光的受激发射。例如,图1中的箭头A1表示作为激光输入波朝向输入光栅22传输的光。反过来,光在作为外腔15的前反射镜的输入光栅22处被反射。更详细地说,输入光栅22的一个衍射级用于将光向后衍射到外部激光腔15中。反射级光由附图中的箭头A2表示。在输入光栅22处反射后,光向后穿过前反射镜14,直到后反射镜13。因此,建立了光学信号的激光处理和光学放大。这样能够维持激光振荡。由于反射波,输入光栅22成为半导体激光器1的外部波长选择反射镜。

[0060] 光学信号的一部分不会反射回到外腔15中,而是通过输入光栅22被衍射(参见箭头A3)。这部分光学信号提供激光输出(或激光),并朝向传感元件3衍射。输入光栅22的另一衍射级用于提取激光并将其引导至传感元件3以用于传感目的。该衍射级与箭头A3所示的相同光束有关。激光在传感元件处反射,并最终朝向输出光栅23偏转。偏转由传感元件3改变。例如,传感元件(诸如上文讨论的MEMS膜)的移动改变了光学路径27的长度。根据光学路径长度,偏转的激光以特征入射角撞击输出光栅23,并可以根据其光栅方程通过输出光栅23耦合输入到衬底主体21或输出波导中(参见箭头A4)。

[0061] 图2示出了示例输入光栅的衍射模式。波长选择性的输入光栅22迫使半导体激光器1在由输入光栅反射的波长上发出激光。由于增益元件11的增益介质的带宽相对较大(通常为几nm),半导体激光器1能够移位其激光频率。图1中的传感器输入侧25在图2中详细说明,图2示出了周期为 Λ 的输入光栅22,其设置在衬底主体21中(最终包括沿其光轴24的波导)。衬底(或波导)的特征在于有效折射率 n_{eff} 。此外,图2示出了入射波 k_i 和两个衍射波:一个与波导解耦(表示为提取波或衍射波 k_d 或激光),另一个朝向激光腔12返回(表示为反射波 k_r),并提供反馈。箭头A1至A3与图1相对应。

[0062] 图1所示的实施例能够被视为在掠入射的极端情况下的Littrow类型设置,即 $\sin \theta_i = 1$ (θ_i 是入射光束 k_i 与垂直于光栅表面的 a 之间的角度,如图4所示)。激光腔12具有激光轴16,在该设置中,该激光轴与衬底主体21的光轴24同轴。

[0063] 为了使输入光栅22充当反射器,并将来自激光输入波(参见箭头A1)的能量耦合到经由衬底主体21朝向外部激光腔15向后穿过同一波导的波(反射波,参见箭头A2)中,光栅周期 Λ 和波长必须通过布拉格条件来关联,该布拉格条件在这种情况下为:

$$[0064] \quad \lambda = \frac{2n_{\text{eff}}\Lambda}{m}$$

[0065] 其中, $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$,表示衍射级, λ 表示激光波长。有效折射率 n_{eff} 通过导模 $\beta_{\text{eff}} = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda}$ 的传播常数来定义,其中 n_{eff} 例如具有介于导芯折射率与包层折射率之间的值。上面的等式说明,半导体激光器1被迫在满足布拉格条件的波长上发出激光,其中 m 选择

成使得激光波长 λ 落在(激光器)增益带宽内。

[0066] 为了使输入光栅22(例如,实现为布拉格光栅)将来自激光器的入射波 k_i 的能量耦合到提取波 k_d 中,在衍射角 θ_d 下,如图2所示,光栅周期 Λ 和波长 λ 附加地通过以下等式关联:

$$[0067] \quad \sin \theta_d = n_{\text{eff}} - \frac{q\lambda}{\Lambda}$$

[0068] 其中, $q = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 表示衍射级。如果布拉格条件和后一个等式都成立,并且如果将 m 和 q 选择成使得 $m/q = 2$,那么

$$[0069] \quad \sin \theta_d = 0。$$

[0070] 这种关系是恒定的,或与光栅周期 Λ 和有效折射率 n_{eff} 的任何变化无关。换句话说,如果输入光栅充当半导体激光器1的外腔15的前反射镜,则其迫使激光波长 λ 跟踪光栅周期 Λ 和有效折射率 n_{eff} 的任何变化,使得 $\sin \theta_d = 0$ 成立。由提取波 k_d 表示的提取光束与输入光栅22保持垂直($\theta_d = 0$),而与波长 λ 、光栅周期 Λ 和有效折射率 n_{eff} 的变化无关。

[0071] 相反,如果布拉格条件不成立,即输入光栅22不会是半导体激光器1的外腔15的一部分,则取决于一侧的激光波长 λ 变化,以及另一侧的光栅周期 Λ 和有效折射率 n_{eff} 变化,衍射角 θ_d 将偏离零。因此,提取的光束将偏离其初始方向(垂直于输入光栅)。这是因为一侧的激光波长 λ 和另一侧的光栅/波导参数将以不相关的方式变化。

[0072] 在其他实施例中,可能无法实现具有两个或更多个衍射级的输入光栅,即如上所述的至少一个用于传感元件,另一个用于外腔。然而,输入光栅22能够被分成若干部分。例如,输入光栅可以分别包括具有不同光栅周期的部分。一个部分设置有用于反射回到半导体激光器中的第一周期,并且第二部分具有被设置为将激光朝向传感元件引导的第二光栅周期。通常,两个部分共享同一衬底21,以便在相互关联的变化参数(诸如温度或机械应力)的情况下具有可能的变形。输入光栅的至少一部分设置在公共传感器封装件4中。

[0073] 图3示出了光学器件的另一个示例实施例。光学器件包括半导体激光器1的增益元件11、波长选择反馈元件2、以及传感元件3。波长选择反馈元件2的一部分和传感元件3设置在公共传感器封装件4中。整个输入光栅22也能够设置在公共传感器封装件4(未示出)中。增益元件11也能够设置在公共传感器封装件4(未示出)中,或者能够是如图所示的公共传感器封装件4外侧的外部部件。

[0074] 光学器件的各种部件与关于图1和图2的实施例讨论的各个部件相似。因此,下面的讨论将集中在差异上。如果没有另外说明,上述关于图1和图2讨论的部件的特性同样适用于图3和图4的实施例。

[0075] 在本实施例中,增益元件11或激光腔12能够与图1相同,即包括后反射镜13和半透明前反射镜14。然而,增益元件11或激光腔12相对于衬底主体21的光轴24倾斜。也就是说,与半导体激光器1的增益元件11和激光腔12共用的激光轴16不是同轴的,而是相对于衬底主体21的衬底轴24倾斜。衬底主体21具有两个布拉格光栅22、23。波长选择反馈元件2包括输入光栅22。输入光栅22和输出光栅23沿公共衬底主体的光轴24设置在公共衬底主体21中。输出光栅23位于输入光栅22下游,其中输入侧25面向增益元件11,输出侧26与输出光栅23相关联。输入光栅22包括两个部分28和29。输入光栅的第一部分28包括输入侧25,输入光栅的第二部分29沿光轴24位于第一部分下游。

[0076] 第一部分28被设置成将来自激光器的入射波 k_i (箭头A1) 的能量部分耦合输入到通过波导/衬底传播到第二部分29的导波中, 并且部分耦合输入到向后反射到增益元件11的波 k_r (箭头A2) 中。因此, 输入光栅22还限定了半导体激光器1的外腔15。输入光栅的第一部分28可以 (但不是必须) 在空间上与第二部分29和/或输出光栅23分离, 并且还可以具有与第二部分和/或输出光栅不同的光栅周期。然而, 所有光栅 (输入光栅和输出光栅的部分) 被设置在公共衬底主体21中, 使得它们的光栅周期处于恒定且明确定义的比率中。如果光栅中的任何一个以一定系数膨胀 (例如, 由于温度变化), 则其他光栅应以相同的系数膨胀。

[0077] 图4示出了图3所示实施例示例中输入光栅22的波及其相应衍射级。图4的附图示出了输入光栅22的两个部分 (28和29) 以及它们各自的周期和光束角度。输入光栅的第一部分28 (在附图的左侧) 能够被视为半导体激光器1的外部激光腔, 通过衍射级将由 k_r (箭头A2) 表示的波返回或反射到激光腔12中, 即朝向后反射镜。来自激光器的入射波 k_i 以相对于光栅表面的法线的第一入射角 θ_i 撞击第一部分28。波 k_r (作为衍射级) 向后反射到激光腔中, 因此相对于光栅表面的法线处于相同的角度 θ_i 。激光波长 λ 因此由光栅的部分28上的布拉格条件来定义, 其表示为

$$[0078] \quad \lambda = \frac{2 \Lambda_i \sin \theta_i}{m}$$

[0079] 其中, $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$, 表示衍射级, Λ_i 表示第一部分28的光栅周期, λ 表示激光波长。请注意, 该等式不依赖于 n_{eff} 。光撞击光栅, 并从光栅的“空气”侧衍射返回到激光器中, 因此其作用类似于经典的开放空间衍射光栅。如果光通过光学波导, 则等式将有所不同, 且有 n_{eff} 贡献。

[0080] 输入光栅的同一部分28确保在输入波 k_i 与有效折射率 n_{eff} 的导波模式 kg 之间的耦合 (参见箭头A4)。因此

$$[0081] \quad \sin \theta_i = n_{\text{eff}} - \frac{q\lambda}{\Lambda_i}$$

[0082] 其中, $q = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 表示衍射级。

[0083] 输入光栅的第二部分29 (图4右侧) 以相对于法线的第二衍射角 θ_d 朝向传感元件将导波模式 kg 耦合输出到波 k_d (箭头A3) 中。因此

$$[0084] \quad \sin \theta_d = n_{\text{eff}} - \frac{p\lambda}{\Lambda_d}$$

[0085] 其中, $p = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 表示衍射级。这些等式将衍射角或耦合角 θ_d 和 θ_i 表示为其他参数的函数, 例如激光波长 λ 或光栅周期 Λ_i 、 Λ_d , 它们随温度变化最大。衍射角或耦合角 θ_i 和 θ_d 表示:

[0086] • θ_i : 在输入光栅22的第一光栅部分28的表面的法线与从激光器入射的入射光波A1之间形成的“入射”角。它与在同一垂线与输入光栅的第一部分28向后反射 (实际上是衍射) 到增益元件11的光波A2之间的角度相同。

[0087] • θ_d : 是在垂直于输入光栅22的第二部分29的表面与通过该部分29向传感元件3提取 (或衍射) 的光波A3之间形成的“衍射”角。

[0088] 在没有输入光栅与激光器的外腔相同的约束的情况下, 激光波长 λ 变化 (例如随温

度变化)将与光栅膨胀无关。因此,提取角 θ_d 将随温度变化,传感器内的光路方向将波动,从而影响传感器性能。然而,在本实施例,各种参数通过布拉格条件互连,并且输入光栅用作半导体激光器的外腔。这约束了激光波长 λ 以适应输入光栅28处的布拉格条件。通过结合布拉格条件和用于(解)耦合角 θ_d 和 θ_i 的等式,得到注入(耦合)角和提取(解耦)角的以下等式

$$[0089] \quad \sin \theta_i = \frac{n_{\text{eff}}}{1 + 2 \frac{q}{m}}$$

[0090] 以及

$$[0091] \quad \sin \theta_d = n_{\text{eff}} \left(1 - \frac{2p}{m + 2q} \right) \frac{\Lambda_i}{\Lambda_d}$$

[0092] 最后两个等式表明,注入角和提取角是恒定的,与激光波长 λ 和光栅周期无关,因为注入(Λ_i ,光栅28)和提取(Λ_d ,光栅29)时的光栅周期变化是相关的(Λ_i/Λ_d =常数),并且激光波长 λ 受到约束,以匹配输入光栅28处的布拉格条件,对应于注入角度 θ_i 。因此,传感器内的光路方向保持不变,与波长和光栅周期变化无关(例如,随着温度或应力波动)。然而,通过有效指数 n_{eff} ,它仍然与温度有关。与常规法布里-珀罗或VCSEL激光器设置中的激光波长的温度变化相比,这种温度依赖性通常对耦合角的影响较小。已经发现,所提出的光学器件在不同温度和/或机械应力下表现出更好的稳定性。在输入光栅22上具有两个光栅部分28和29支持更广泛的应用,例如,其中 $p \neq q$ 以及入射角和衍射角不相等。

[0093] 附图标记说明

- [0094] 1 半导体激光器
- [0095] 2 波长选择反馈元件
- [0096] 3 传感元件
- [0097] 4 传感器封装件
- [0098] 11 增益元件
- [0099] 12 激光腔
- [0100] 13 后反射镜
- [0101] 14 前反射镜
- [0102] 15 外腔
- [0103] 16 激光轴
- [0104] 21 衬底主体
- [0105] 22 第一衍射(输入)光栅
- [0106] 23 第二衍射(输入)光栅
- [0107] 24 光轴
- [0108] 25 输入侧
- [0109] 26 输出侧
- [0110] 27 光学路径
- [0111] 28 输入光栅的第一部分
- [0112] 29 输入光栅的第二部分

- [0113] A1 表示入射波的箭头
- [0114] A2 表示反射波的箭头
- [0115] A3 表示衍射波的箭头
- [0116] A4 表示导波的箭头

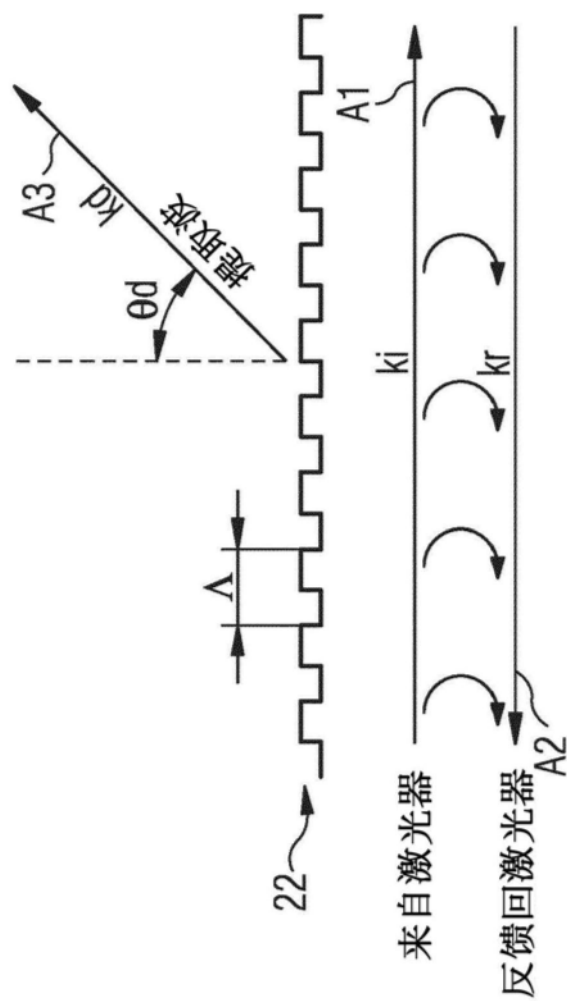


图2

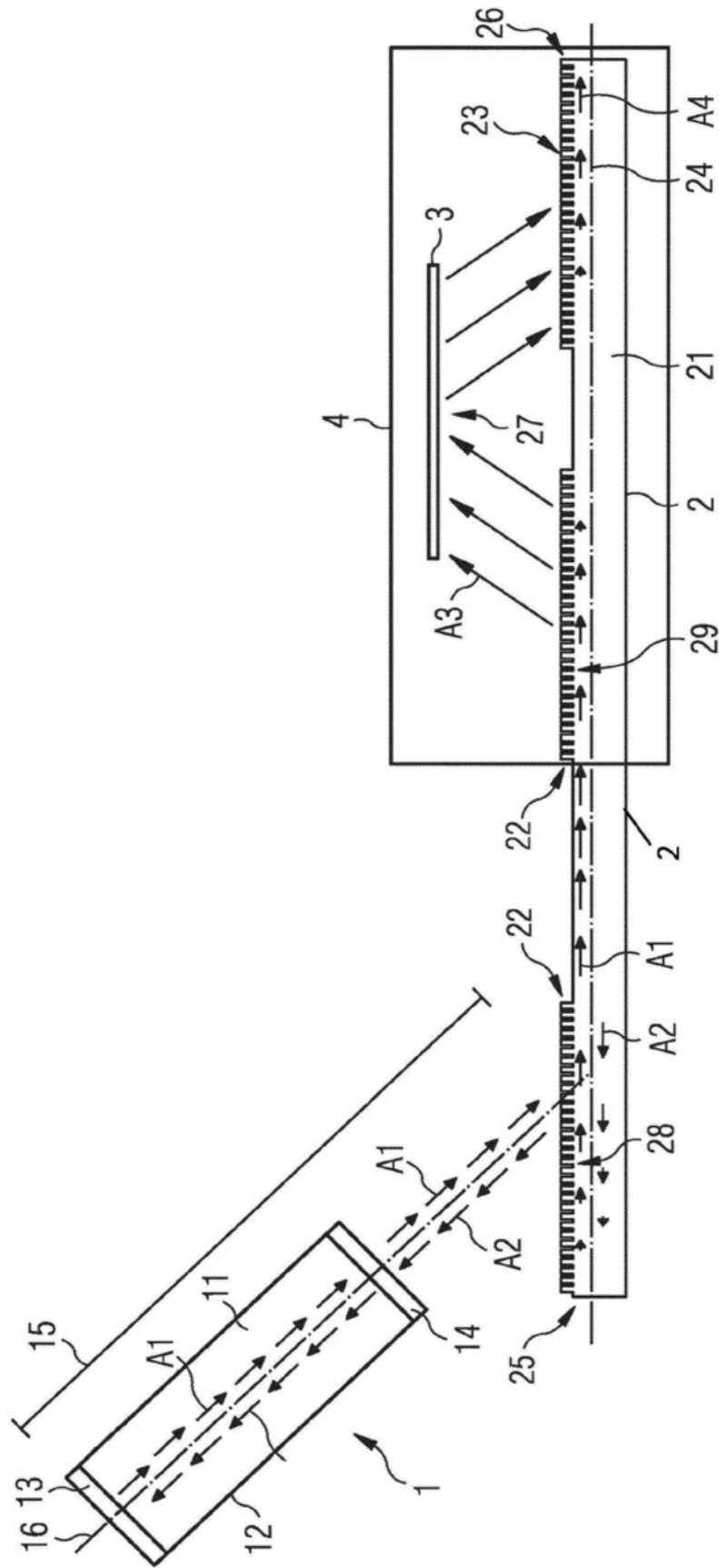


图3

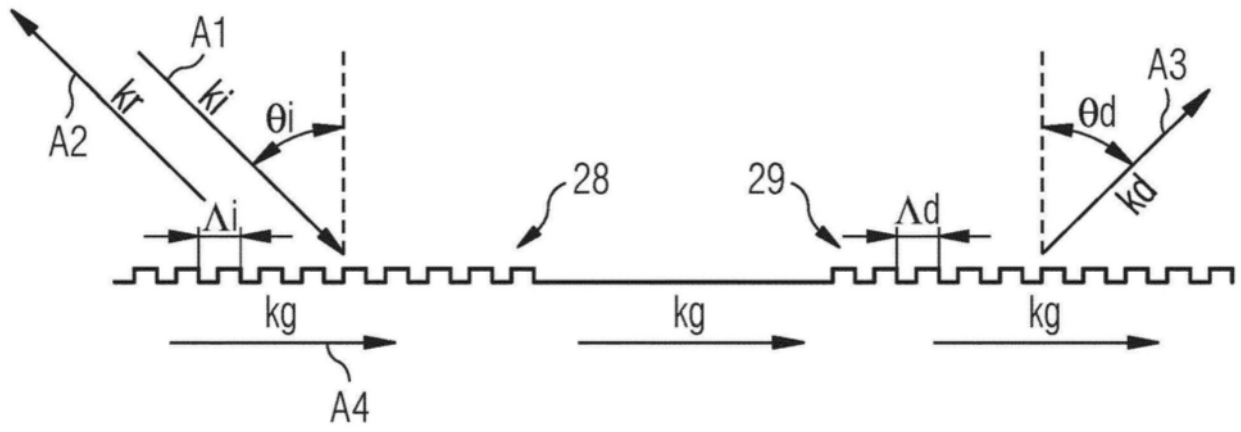


图4

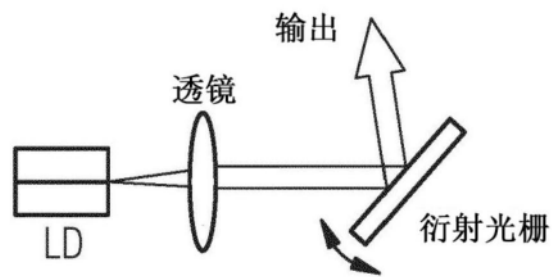


图5A

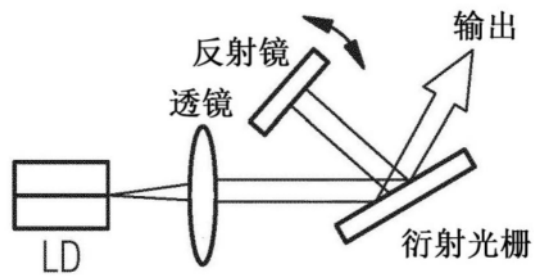


图5B

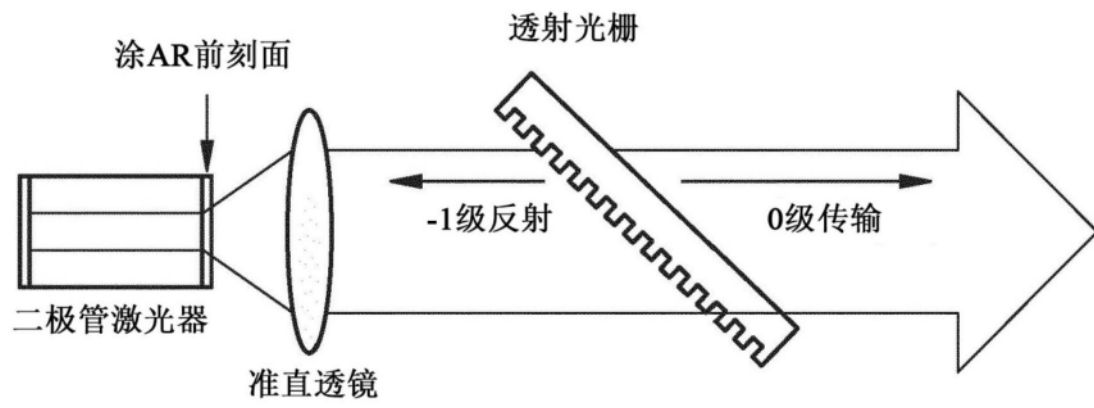


图5C