

光纤布拉格光栅-长周期光纤光栅级联结构研究进展

赵 强, 闫星魁, 张可可, 陈世哲, 张继明, 刘世萱

山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266061

摘要 光纤光栅是光纤传感和光纤通信领域的重要器件之一, 光纤光栅的级联因其特性新颖一直是研究的热点。着重介绍了光纤布拉格光栅-长周期光纤光栅(FBG-LPG)级联结构在包层模式再耦合、边缘滤波和独立级联 3 方面的研究进展, 讨论了各自的技术难点, 并提出了改进意见。针对透射型 FBG-LPG 光路复杂的问题, 提出一种反射型 FBG-LPG 独立级联结构, 简化了光路, 优化了系统性能, 并进行了实验验证。在此基础上展望了 FBG-LPG 级联结构的发展趋势。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 长周期光纤光栅; 级联结构; 光纤传感器

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.080002

Research Progress of Fiber Bragg Grating-Long Period Fiber Grating Cascaded Structure

Zhao Qiang, Yan Xingkui, Zhang Keke, Chen Shizhe, Zhang Jiming, Liu Shixuan

Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266061, China

Abstract Optical fiber gratings have become one of the most important devices in the field of optical fiber sensing and optical fiber communication. Because of the novel characteristics, cascaded structures of the fiber gratings have always been the focus of research. The research progresses of cladding mode recoupling, edge filtering and independent cascading of the fiber Bragg grating-long period fiber grating (FBG-LPG) cascaded structure are summarized, and their technical difficulties are discussed. Suggestions for improvement are presented. To address the problem of the complexity of transmission type FBG-LPG optical path, a reflection type FBG-LPG independent cascaded structure which can effectively simplify the structure is proposed, and the system performance is optimized and verified by experiment. The development trend of the FBG-LPG cascaded structure is predicted.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; long period fiber grating; cascaded structure; fiber sensors

OCIS codes 060.3735; 060.2340; 050.2770; 060.2370

1 引 言

光纤光栅是利用光纤材料的光敏性、通过曝光等方式在纤芯内形成空间相位光栅并具有特定功能的一类光无源器件, 国内外研究人员对其进行了系统而深入的研究^[1-3], 现已广泛应用于光纤传感和光纤通信领域^[4-11]。光纤光栅根据周期大小可分为光纤布拉格光栅(FBG)和长周期光纤光栅(LPG), FBG的周期通常只有几百纳米, 而LPG的周期通常在几十到几百微米。从模式耦合与传输的角度分析, FBG是前向传输的纤芯模式与反向传输的纤芯模式之间的耦合, 而LPG是前向传输的纤芯模式与同向传输的包层模式之间的耦合。从光谱特征的角度分析, FBG具有高反射的窄带光谱, 而LPG具有无后向散射的宽带透射光谱。

在光纤传感领域, 光纤光栅的级联一直是研究的热点^[12-14], 其中关于FBG-LPG级联结构方面的研究主要集中在3个方面: 1) 利用FBG和LPG近距离模式耦合后形成的干涉光谱进行多参数同步检测, 即对包

收稿日期: 2017-03-03; **收到修改稿日期:** 2017-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(61405106)、青岛市应用基础研究计划(17-1-1-99-jch)、山东省科学院青年基金(2014QN029)、山东省重点研发计划(2016GGH4501)、山东省自然科学基金(ZR2013DM013)

作者简介: 赵 强(1982—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事光纤传感在海洋观测方面的研究。E-mail: zqhero9494@163.com

层模式再耦合进行研究^[15];2) 利用 LPG 吸收峰边缘的线性区对 FBG 进行边缘滤波解调,即对边缘滤波进行研究^[16];3) 将 FBG 和 LPG 简单串接起来,相当于两个独立的器件,分别对外界环境参数进行检测,即对 FBG-LPG 独立级联结构进行研究^[17]。

本文对上述 FBG-LPG 级联结构的 3 个研究方面进行简要介绍,分析各自的技术难点和存在的问题,并提出改进的方法。特别是针对透射型 FBG-LPG 独立级联结构光路复杂、实用困难的问题,提出一种反射型 FBG-LPG 独立级联结构。通过在光路末端增加端面反射镜的方式简化光路结构,增强系统在工程中的适应性,并探索端面反射率变化对系统光谱特性的影响。实验结果表明,当端面反射率下降时,光谱整体强度下降,但是 FBG 的相对反射率增大。因此,可以通过调节端面反射率来调整输出光谱中 FBG 和 LPG 的相对强度,优化系统性能,从而有望获得一种新型多参数光纤传感器。最后简单讨论了 FBG-LPG 级联结构的发展趋势。

2 包层模式再耦合的研究进展

2.1 包层模式再耦合的系统光路结构及原理

FBG-LPG 级联结构中光的传输路径为:宽带光源(SLED)发出的光经 3 dB 光纤耦合器的 1 端口依次到达 LPG 和 FBG,经 FBG 反射后再次经过 LPG,最后通过 3 dB 光纤耦合器的 2 端口到达解调端(OSA),如图 1(a)所示。一般情况下,光在光纤纤芯内传输,但当光首次经过 LPG 时,满足条件的一部分光将由纤芯耦合至包层中。当 FBG 和 LPG 之间的距离 d 在一定范围内时,前向传输的纤芯模式和同向传输的包层模式几乎可以无损耗地同步到达 FBG,FBG 高阶模式的反射使纤芯和包层这两种模式的光反向传输;当前向传输的纤芯模式和同向传输的包层模式再次经 LPG 时,包层模式再次耦合进纤芯,最终进入 OSA,由 OSA 得到 FBG-LPG 级联结构的光谱,其中包括 FBG 中心波长处的反射光和一系列 FBG 高阶模式的反射光,其模式耦合过程如图 1(b)所示。

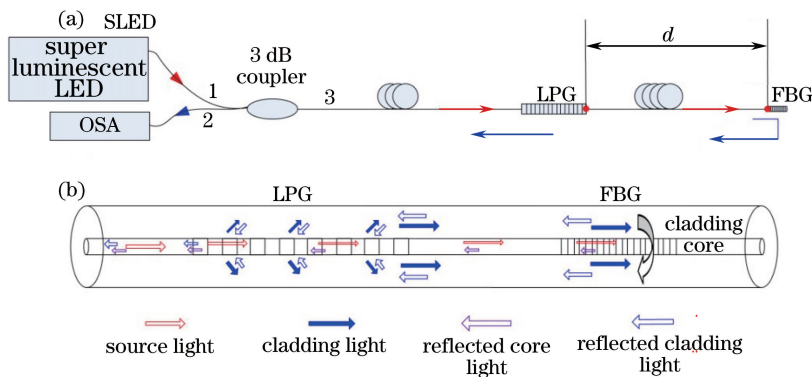


图 1 (a) FBG-LPG 级联结构的光路;(b)包层模式再耦合示意图

Fig. 1 (a) Optical path of FBG-LPG cascaded structure; (b) schematic of recoupling of cladding-mode

2.2 相关研究进展

2002 年 Zhang 等^[15]定性分析了 FBG-LPG 级联结构中纤芯模式和包层模式再耦合的现象。2010 年 Han 等^[18]进一步研究了该结构中纤芯模式和包层再耦合模式的传感特性,利用纤芯模式只对温度敏感以及包层再耦合模式对温度和折射率均敏感的特性,研制了带有温度补偿功能的折射率传感器,但其测试灵敏度较低。2012 年 Sun 等^[19]通过测量 FBG-LPG 级联结构的纤芯模式与包层再耦合模式强度之比,得到了环境温度和应变。同年 Fu^[20]利用 LPG 对环境折射率的敏感性调制 FBG 的反射峰强度,提出了一种基于 FBG-LPG 级联结构的折射率传感器。2012 年曹莹等^[21]仿真了 FBG-LPG 级联结构的反射光谱,并模拟了镀膜级联结构之间的光纤长度、薄膜折射率和膜层厚度对反射光谱的影响。2015 年 Chen 等^[22]仿真分析了 FBG-LPG 级联结构的影响因素,研制了蔗糖浓度和温度同步测量传感器,并进行了实验验证。

2.3 讨 论

文献[15,18]阐述了包层模式再耦合光谱中波长与外界环境参数的变化关系;文献[19-20]则关注耦合模式的强度与外界环境参数的变化关系;文献[21-22]理论分析了包层模式再耦合的影响因素。综上,FBG-LPG 级联结构中包层模式的再耦合受以下因素的影响。

1) 间隔光纤长度。文献[21]的模拟结果表明,当两器件间隔光纤长度 d 的变化范围为 $0\sim 2$ cm 时,包层反射模式的强度逐渐减小;文献[15]、[18-20]的实验中两器件间隔光纤长度 d 均为 1 cm,这在一定程度上验证了文献[21]的模拟结果。文献[22]指出相位角的变化对包层反射模式的强度有影响,因相位角不确定,当两器件间距 d 在 $0\sim 1$ cm 范围内时,包层反射模式强度表现为无规律变化。然而,文献[15,18-20]中均采取熔接的方法制作 FBG-LPG 级联结构,在实际的器件熔接过程中,无法提前判断两段光纤的相位匹配程度,无法保证制作的级联结构包层反射模式的强度。此外,由于 FBG 和 LPG 栅区边缘位置较难准确定位,且光纤切割刀具也存在一定的加工误差,实际的间隔光纤长度 d 很难做到与设计一致。针对上述问题,这里提出采取在同一段光纤上先完成一个器件的写制,留出一定长度的间隔光纤后,再进行另一个器件写制的方法。此时,间隔光纤长度可利用步进电机精确控制,且避免了熔接引入的相位角不确定性问题,但在写制过程中要注意先写制器件对后写制器件光谱的影响。

2) LPG 的透射特性。LPG 的耦合强度对 FBG-LPG 级联结构的光谱有很大影响。若 LPG 存在强耦合,即光源发出的光在 LPG 处全部由纤芯耦合至包层,则纤芯中将无光到达 FBG 处,最终反射光也只有包层模式;若 LPG 耦合强度很弱,经 FBG 反射的包层模式强度也会很弱,难以观测。因此,LPG 的耦合强度需要控制在比较合理的范围内。文献[3]指出 LPG 的耦合强度与 LPG 的栅区长度、周期、写制时的调制强度及纤芯与包层间的折射率差有关,这也是在制作 LPG 时需要着重考虑的因素。

3) FBG 的反射特性。FBG 的反射率对 FBG-LPG 级联结构的光谱也有很大影响。FBG 的反射和透射光谱如图 2(a)所示,其中光纤包层与纤芯的折射率之差 $\Delta n = 0.0008$,可以看出反射光谱中同时存在纤芯模式和包层模式,包层模式离散地分布在纤芯模式的两侧,通常包层模式相对很弱而被忽略。当其他参数不变,调制强度不同时,图 2(a)中 A、B、C、D 4 个反射峰的强度变化如图 2(b)所示。随着调制强度的增加,FBG 包层模式反射率逐渐变大,包层模式的反射光谱也就越容易观测到。因此,在 FBG-LPG 级联结构中一般选择反射率大的 FBG。

4) FBG 和 LPG 的光谱重叠。由图 2(b)可以看出 FBG 的高阶反射模式离散地分布在特定波长处,当 LPG 的透射光谱与 FBG 的包层模式有重叠时,其包层中的光才可能被 FBG 反射。此外,在 FBG-LPG 级联结构中 LPG 一般为弱光栅,FBG 的高阶反射模必须要足够强,才能保证反射光经 LPG 耦合进纤芯时有足够的包层模式转化为纤芯模式,从而观察到明显的包层再耦合模式。横轴中 Δn 表示光纤包层和纤芯之间的折射率差。

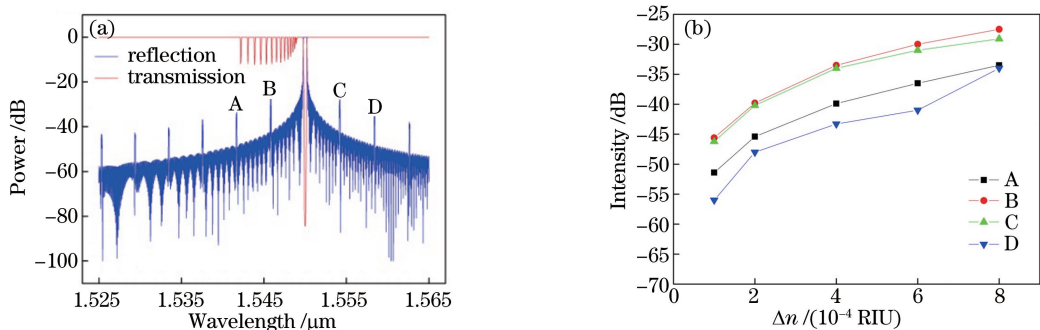


图 2 (a) FBG 的反射和透射光谱;(b)不同调制强度下 FBG 包层反射模式强度的变化

Fig. 2 (a) Reflection and transmission spectra of FBG; (b) change of FBG cladding reflection mode intensity under different modulation intensity

3 边缘滤波的研究进展

3.1 边缘滤波系统的光路及原理

边缘滤波系统的光路如图 3(a)所示, SLED 发出的光经 3 dB 光纤耦合器的 1 端口传输到 FBG, 经 FBG 反射后返回 3 dB 光纤耦合器, 再经 3 dB 光纤耦合器的 2 端口到达 LPG, OSA 对 LPG 的透射光进行解调。由 LPG 的透射谱[图 3(b)]可以看出, 在透射吸收峰两侧各有一段近似线性的范围, 因此 LPG 可以作为边缘线性滤波器, 将 FBG 波长编码的传感信号转化为强度信号, 然后利用光电探测系统测量此强度信号的变化, 从而得到传感信号的变化。LPG 边缘滤波解调的原理是将 FBG 中心波长的变化转化为光强的变化, 即通过测量 FBG 中心波长在 LPG 滤波器线性边缘波段上漂移时的光强差获知外界参数的变化。

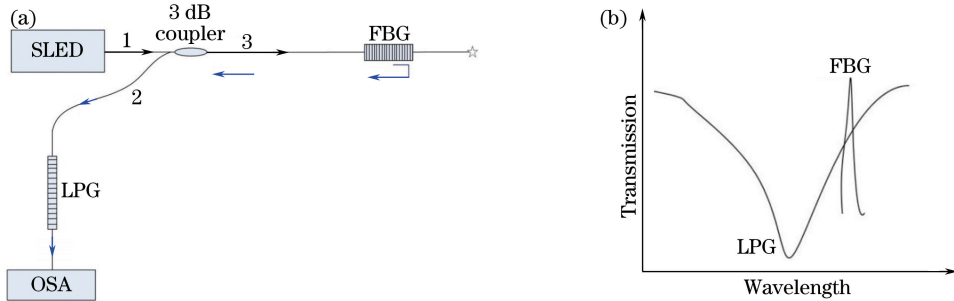


图 3 边缘滤波系统的(a)光路和(b)光谱

Fig. 3 (a) Optical path and (b) spectrum of edge filtering system

3.2 相关研究进展

1996 年 Patrick 等^[23]提出一种利用 2 个 FBG 和 1 个 LPG 同时测量应变/温度的传感器, 当 LPG 的光谱受应变/温度影响发生漂移时, 2 个 FBG 反射峰的相对强度 R_1 和 R_2 会有相应变化, 根据二者的差值即可得出应变/温度的变化。1998 年 Fallon 等^[16,24]利用 LPG 透射谱的边缘线性效应将应变引起的 FBG 波长变化转化为功率变化, 获得一种高静态分辨率和大动态范围的应力传感器。2009 年黄勇林等^[25]利用 LPG 的边缘滤波解调技术制作了一种 FBG 位移传感器, 该传感器由 3 dB 耦合器、FBG、LPG 和探测器构成, 实验表明系统输出光功率与位移呈良好的线性关系, 位移灵敏度为 $9.24 \text{ pW} \cdot \text{mm}^{-1}$, 分辨率为 0.01 mm 。2011 年周锐等^[26]设计了一种针对地震波信号的解调系统, 选用边缘线性良好的 LPG 作为滤波器, 并采用参考光路与滤波光路相比较的方法消除本底信号的影响, 波长灵敏度达 $1.13 \text{ pm} \cdot \text{mV}^{-1}$, 在 $2 \sim 150 \text{ Hz}$ 频段的动态分辨率为 $0.08 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1}$, 动态范围为 $50 \sim 60 \text{ dB}$ 。2012 年 Enríquez 等^[27]利用 LPG 调制的 FBG 反射光强度变化检测环境折射率大小, 利用 FBG 的波长变化测量环境温度, 研制了可用于水下环境或污染区域探测的温度/折射率传感器。2013 年朱珠等^[28]提出了一种基于双 LPG 边缘滤波的 FBG 解调方案, 该方案具有高灵敏度及自补偿的特点, 通过温度和振动信号监测实验表明该系统具有较好的响应度和精确度。2016 年巩鑫等^[29]研究了基于光纤光栅的光谱边缘滤波技术, 搭建了时分复用光纤光栅应变传感系统, 提出复用光纤光栅应变的交叉传感解调算法, 实验测试并解调了两个光纤光栅的交叉传感数据。2017 年罗霄等^[30]将级联长周期 FBG 作为边缘滤波器, 利用它的 4 个线性区同时解调 4 个 FBG 的传感信号。

3.3 讨 论

边缘滤波的主要特点是 FBG 反射波长在 LPG 透射谱的线性边缘区域, 利用 LPG 对外界环境变化更敏感的特性, 通过测量 FBG 反射强度的变化, 从而获得环境参数的变化^[16,23-25,27], 其实质是将 FBG 波长与外界参数的变化关系利用 LPG 转化为 FBG 反射光强度与外界参数的变化关系, 这导致光源功率起伏、连接处损耗、传输过程中微弯等对系统特性产生影响。采用参考光路的方法可消除上述因素的影响^[26,28], 保证系统的稳定性。在此基础上, 文献[29-30]将传统的 LPG 边缘滤波研究拓展到新的领域。

为了优化 LPG 的边缘滤波特性, 要求 FBG 与 LPG 的光谱有重叠区域, 即 FBG 的反射峰要在 LPG 某一透射峰的上升沿或下降沿区域。一般 LPG 各透射峰越靠近长波段, 其响应外界环境变化的灵敏度越高。在实际的系统设计中, 除考虑光源及解调仪波长范围外, 所选 FBG 的反射峰应尽量在 LPG 波长最大的透射峰内, 以增强解调效率和提高传感器灵敏度。

此外,为了提高解调精度,要求 LPG 透射峰边缘尽量线性且陡峭,而实际的 LPG 透射峰边缘并非线性,通过窄压 LPG 透射峰的 3 dB 带宽有助于实现这一要求。LPG 的 3 dB 带宽可表示为 $\Delta\lambda = 2\Delta\lambda_d \sqrt{(u_0/\pi)^2 - (\kappa L/\pi)^2} / L = 2\lambda_d \sqrt{(u_0/\pi)^2 - (\kappa L/\pi)^2} / N^{[31]}$, 其中 L 为光栅长度, N 为光栅的周期数, κL 为耦合深度, λ_d 为 LPG 的设计波长。当光栅的周期数 N 较多、 κL 较大时, LPG 的 3 dB 带宽较小,该经验可作为写制 LPG 时的参考。

4 独立级联的研究进展

包层模式再耦合结构需要满足 FBG 和 LPG 的模式耦合条件,因此在 FBG-LPG 级联结构传感器设计中需要考虑 FBG 及 LPG 各自的特性,制作 FBG-LPG 传感器时需要解决间隔光纤长度精确测量和光纤相位角失配带来的不确定性问题;在边缘滤波应用中要求两器件的光谱相互重叠,且 LPG 透射峰的上升沿或下降沿线性度要好。为了能够充分利用 FBG 和 LPG 的优点,2015 年 Alwis 等^[17]采用透射型光路,提出了由 FBG-LPG 独立级联结构组成的带温度补偿的液体折射率传感器方案,其中 FBG 与 LPG 既不用满足包层模式再耦合条件,光谱也无需存在重叠区域,只是将两个独立的器件简单熔接级联,如图 4 所示。

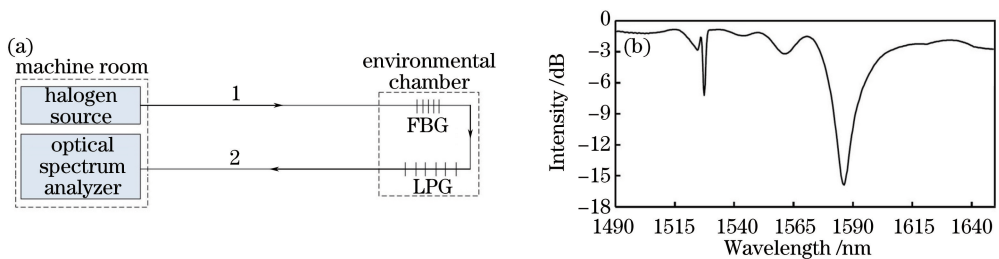


图 4 透射型系统的(a)光路和(b)光谱

Fig. 4 (a) Optical path and (b) spectrum of transmission system

透射型光路的特点是双光路连接,然而在工程应用中传感器需要安装在现场甚至野外,光源和解调仪等设备一般放在专门的控制室,二者间通常有一定距离。在大规模传感网络中,如果采用透射型光路,光路数量将会加倍,造成资源浪费,施工难度大。针对透射型光路存在的问题,这里提出一种反射型 FBG-LPG 独立级联结构,光路如图 5 所示。在光路末端连接端面反射镜可以简化光路结构,增强系统在工程中的适应性。

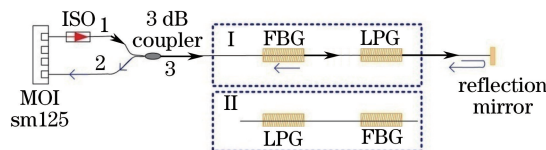


图 5 FBG-LPG 独立级联结构的光路

Fig. 5 Optical path of FBG-LPG independent cascading structure

具体地,对于图 5 中的光路结构,光源和解调仪采用 MOI 公司的 sm125,为防止通道间相互影响,在其中一个通道的出射口加入光纤隔离器(ISO)。图中 I 为 FBG 在前、LPG 在后的光路结构,II 为 LPG 在前、FBG 在后的光路结构。FBG 和 LPG 均采用紫外准分子激光掩模法写制,其初始特征波长分别为 1539.58 nm 和 1567.546 nm。3 dB 光纤耦合器的分光比为 1:1,光纤端面反射镜的反射率为 95%。实验得到的带有光纤端面反射镜级联结构的光谱如图 6 所示。

由图 6(a)可以明显看出 LPG 的透射峰,其损耗强度约为 17 dB;而光谱的峰值 A 与图 6(b)的单个 FBG 光谱的特征反射峰对应,可以初步判断峰值 A 即为 FBG 的特征反射峰。然而,峰值 A 的强度只有约 2 dB,解调仪很难准确定位反射峰,造成解调困难。

对出现上述现象的机理定性分析。如图 7 所示,光源发出的宽带光谱(1510~1590 nm)①经 FBG 后,部分被反射为窄带光②,透射光谱③中出现对应的损耗;由于 LPG 是透射型器件,无后向反射光,且纤芯模与包层模式间的耦合造成相应波段的能量损耗,因此其透射光谱④将同时带有 FBG 和 LPG 两个器件的特征损耗峰;LPG 与反射镜之间的光纤距离为米级,其传输损耗可以忽略,因此光谱④与光谱⑤可以认为是相

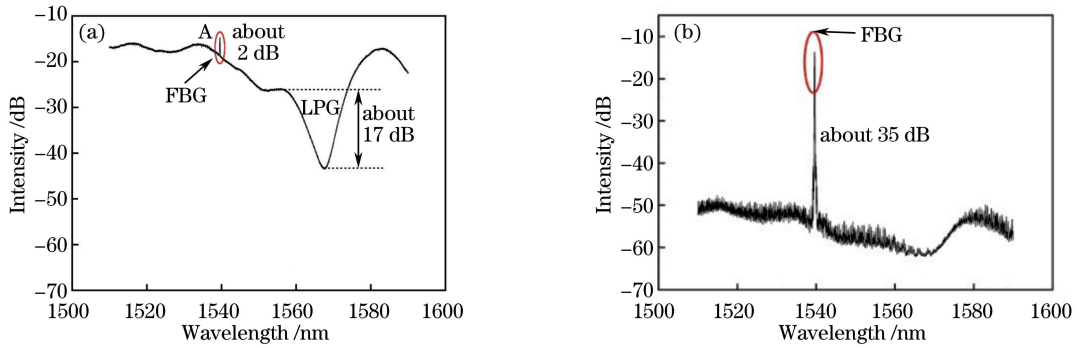


图 6 带光纤端面反射镜的级联结构的(a) FBG-LPG 光谱和(b) FBG 光谱

Fig. 6 (a) FBG-LPG spectrum and (b) FBG spectrum of the cascaded structure with optical fiber-end mirror

同的(同理,光谱⑥和光谱⑦也可以认为是相同的);光纤端面反射镜在 (1550 ± 40) nm 范围内具有高反射率(约为 95%),经反射镜后得到约 5% 能量损耗的光谱⑥和⑦;再次经过 LPG 后,相应波段的能量将再次受到损耗,因此光谱⑦中 LPG 的特征损耗峰将再度加深,得到光谱⑧;FBG 两个通光方向的特征波长与反射率相同,而此时光谱⑧中对应的波段已经在第一次经过 FBG 时发生损耗,此时 FBG 无后向反射,对光谱几乎没有影响,从而得到光谱⑨。考虑到反射镜约 5% 的能量损耗,即经反射镜后 FBG-LPG 级联结构的整体光谱强度降低约 5%,光谱⑨中 FBG 的特征透射峰强度也应降低约 5%,因此在最终输出光谱⑩中 FBG 的特征反射峰大约剩余尖端的 5% 左右。

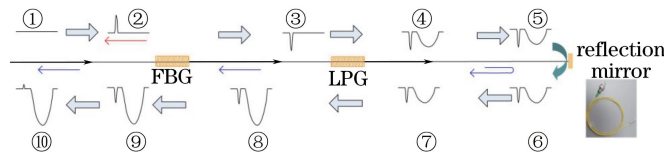


图 7 光在 FBG-LPG 级联结构中传输示意图

Fig. 7 Schematic of optical transmission in FBG-LPG cascaded structure

由上述分析推断,如果降低反射镜的反射率,返回解调仪的能量损耗变大,整体光谱强度将进一步降低,FBG 反射峰的相对强度将会变大。为了验证该推断,将反射镜的反射率降低为约 70%,实验结果如图 8 所示, ΔP 为光谱强度变化量。结果表明降低反射镜的反射率确实会增加 FBG 反射峰的相对强度,有利于 FBG 反射峰的寻峰探测。这说明通过调节端面反射率可以调整输出光谱中 FBG 反射峰和 LPG 透射峰的相对强度,优化光谱整体性能,为获得性能好的多参数传感器提供了一种可能。但同时也应充分考虑端面反射镜反射率降低时 LPG 透射峰强度降低的问题,以及由镜面反射率在全波段的不均匀性带来的 LPG 透射光谱的变形。因此在设计 FBG-LPG 独立级联结构时,应综合考虑以上多种因素的影响。

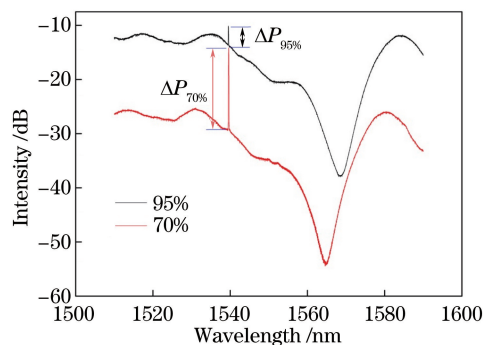


图 8 光纤端面反射镜不同反射率下的光谱

Fig. 8 Spectrum of fiber end face mirror under different reflectivity

5 结 论

介绍了 FBG-LPG 级联结构在包层模式再耦合、边缘滤波和独立级联 3 方面的研究进展,并进行了简要评述,针对各自存在的问题提出了解决方案。特别是针对透射型独立级联结构存在的问题,提出一种反射型光路结构,定性分析了光谱变化,通过调节光纤端面反射镜的反射率可调节输出的光谱强度,从而可调节输出光谱中 FBG 反射峰和 LPG 透射峰的相对强度,达到了简化光路结构、优化系统性能和提高探测准确率的目的。

在后续研究中,一方面可通过调整 FBG 和 LPG 各自的参数对现有 FBG-LPG 级联结构的传感特性进行优化,另一方面可以引入其他的物理效应,如有源光纤的热光效应,使 FBG-LPG 级联结构产生更加新颖的特性。

参 考 文 献

- [1] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, *et al.* Fiber grating sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1442-1463.
- [2] Giles C R. Lightwave applications of fiber Bragg gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1391-1404.
- [3] Erdogan T. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1997, 14(8): 1760-1773.
- [4] Urrutia A, Goicoechea J, Ricchiuti A L, *et al.* Simultaneous measurement of humidity and temperature based on a partially coated optical fiber long period grating[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 227: 135-141.
- [5] Marignetti F, de Santis E, Avino S, *et al.* Fiber Bragg grating sensor for electric field measurement in the end windings of high-voltage electric machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 2796-2802.
- [6] Wada D, Lgawa H, Murayama H. Simultaneous distributed measurement of the strain and temperature for a four-point bending test using polarization-maintaining fiber Bragg grating interrogated by optical frequency domain reflectometry[J]. Measurement, 2016, 94: 745-752.
- [7] Vidakovic M, McCague C, Armakolas I, *et al.* Fibre Bragg grating-based cascaded acoustic sensors for potential marine structural condition monitoring[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(19): 4473-4478.
- [8] Esposito F, Ranjan R, Campopiano S, *et al.* Experimental study of the refractive index sensitivity in arc-induced long period gratings[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(1): 7100110.
- [9] Zhang Yujing, Wang Meng, Wang Zefeng, *et al.* Research progress of tilted fiber Bragg gratings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(7): 070005.
张宇菁, 王 蒙, 王泽锋, 等. 倾斜光纤光栅研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(7): 070005.
- [10] Sun Shihui, Yu Youlong, Li Hui, *et al.* Detection technique of stress waves based on fiber Bragg grating[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(5): 0505002.
孙诗惠, 余有龙, 李 慧, 等. 基于光纤光栅的应力波检测技术研究[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0505002.
- [11] Luo Binbin, Zou Wengen, Zhao Mingfu, *et al.* pH sensor based on fiber grating with extremely large tilt angle and its sensitivity enhancement[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0106009.
罗彬彬, 邹文根, 赵明富, 等. 极大倾斜角度光纤光栅 pH 值传感器及其增敏研究[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0106009.
- [12] Zhang Lei, Yu Qingxu. An improved demodulation method for F-P and FBG multiplexing system[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2009, 20(8): 1008-1011.
张 磊, 于清旭. 光纤 F-P 腔与 FBG 复用传感器精确解调方法研究[J]. 光电子 • 激光, 2009, 20(8): 1008-1011.
- [13] Ding J F, Zhang A P, Shao L Y, *et al.* Fiber-taper seeded long-period grating pair as a highly sensitive refractive-index sensor[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(6): 1247-1249.
- [14] Luo Z H, Wen H Q, Guo H Y, *et al.* A time- and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22799-22807.
- [15] Zhang A P, Tao X M, Chung W H, *et al.* Cladding-mode-assisted recouplings in concatenated long-period and fiber Bragg gratings[J]. Optics Letters, 2002, 27(14): 1214-1216.

- [16] Fallon R W, Zhang L, Everall L A, *et al.* All-fibre optical sensing system: Bragg grating sensor interrogated by a long-period grating[J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, 9(12): 1969-1973.
- [17] Alwis L, Sun T, Grattan K T V. Optical fibre refractive index sensor in a hybrid fibre grating configuration[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 120: 11-14.
- [18] Han M, Guo F W, Lu Y F. Optical fiber refractometer based on cladding-mode Bragg grating[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(3): 399-401.
- [19] Sun A, Wu Z S. Hybrid long-period-grating and fiber Bragg grating for cladding-mode-recoupling-based discrimination of temperature and strain[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(4): 044402.
- [20] Fu M Y. Refractive index sensing based on the reflectivity of the backward cladding-core mode coupling in a concatenated fiber Bragg grating and a long period grating[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(5): 1415-1420.
- [21] Cao Ying, Gu Zhengtian. Optical properties of cascaded long-period and fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0405003.
曹莹, 顾铮天. 级联长周期光纤光栅和 Bragg 光纤光栅的光学特性[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0405003.
- [22] Chen Y, Liu B L, Liu H L, *et al.* Multi-parameter simultaneously sensing based on an optimized concatenated FBG with LPG[J]. *Journal of Optical Communications*, 2015, 36(2): 115-122.
- [23] Patrick H J, Williams G M, Kersey A D, *et al.* Hybrid fiber Bragg grating/long period fiber grating sensor for strain/temperature discrimination[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(9): 1223-1225.
- [24] Zhang L, Fallon R, Everall L A, *et al.* Large-dynamic-range and high-resolution from a strain sensing system using long-period grating interrogating FBG strain sensor[C]. 24th European Conference on Optical Communication, 1998: 6313288.
- [25] Huang Yonglin, Dai Sen. Edge filter demodulation of fiber Bragg grating displacement sensing using long period grating[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2009, 22(9): 1266-1269.
黄勇林, 代森. 基于长周期光栅边缘滤波解调的光纤布拉格光栅位移传感研究[J]. *传感技术学报*, 2009, 22(9): 1266-1269.
- [26] Zhou Rui, Qiao Xueguang, Wang Ruohui, *et al.* Seismic wave interrogation system based on the linear edge filter characteristics of long period fiber grating[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, 22(7): 987-991.
周锐, 乔学光, 王若晖, 等. 基于长周期光纤光栅线性边缘滤波的地震波解调系统[J]. *光电子 • 激光*, 2011, 22(7): 987-991.
- [27] Enríquez D A C, da Cruz A R, Rocco Giraldi M T M, *et al.* Hybrid FBG-LPG sensor for surrounding refractive index and temperature simultaneous discrimination[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(4): 981-986.
- [28] Zhu Zhu, Liang Dakai, Sun Hongbing. Double-edged filter wavelength demodulation system for fiber Bragg gratings based on long period fiber grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0305001.
朱珠, 梁大开, 孙红兵. 基于双长周期光纤光栅边缘滤波的光纤布拉格光栅解调系统[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0305001.
- [29] Gong Xin, Hua Dengxin, Li Shichun, *et al.* Edge filtering demodulation and calibration of fiber grating system based on time-division multiplexing[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(10): 1010006.
巩鑫, 华灯鑫, 李仕春, 等. 时分复用光纤光栅系统的边缘滤波解调与标定[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1010006.
- [30] Luo Xiao, Huang Yonglin. Simulation research on distributed FBG demodulation system based on CLPG[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2017, 36(1): 45-47.
罗霄, 黄勇林. CLPG 的分布式 FBG 解调系统仿真研究[J]. *传感器与微系统*, 2017, 36(1): 45-47.
- [31] Zhang Zijia. Theoretical basis and sensing technology of fiber Bragg grating[M]. Beijing: Science Press, 2009: 146-148.
张自嘉. 光纤光栅理论基础与传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 146-148.