

边缘滤波法解调的相移光纤布拉格光栅应变传感器

马伟超 陈少华 赵 昆 王爱军

(中国石油大学(北京)理学院, 油气太赫兹波谱与光电检测实验室, 北京 102249)

摘要 设计了一种基于相移光纤布拉格光栅(PSFBG)的应变传感器。将 PSFBG 和光纤布拉格光栅(FBG)通过光环行器连接在一起,并且沿着中线对称地粘贴在等强度悬臂梁上。两者共同作为探头的核心传感元件。它们粘贴的位置紧靠中线,从而承受着相同的应变,产生携带信息并且线宽极窄的传感光。通过边缘滤波法解调传感光,最终可以获取应变数值。理论模拟了由参数匹配的 PSFBG 和 FBG 产生的传感光谱,实验中获得了线宽仅为 101 pm 的传感光,实验结论与数值模拟吻合。在应变探头的实验验证中,解调结果与待测信号的线性关系良好,拟合度为 0.994,探头的应变分辨率为 $1.5 \mu\epsilon$ 。基于该设计的应变传感器具有高分辨率、低成本、无啁啾等优点,具有很高的实用价值。

关键词 传感器;应变传感器;边缘滤波;相移光纤布拉格光栅

中图分类号 TN253; TP212.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0905004

Phase-Shifted Fiber Bragg Grating Strain Sensor Demodulated by Edge Filter

Ma Weichao Chen Shaohua Zhao Kun Wang Aijun

(Laboratory of Oil Gas Terahertz Spectrum and Photoelectric Detection, College of Science, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract A novel strain sensor based on phase-shifted fiber Bragg grating (PSFBG) is designed. A PSFBG and a fiber Bragg grating (FBG) are connected together by an optical circulator, and symmetrically pasted on the uniform strength cantilever beam along the median. Both of them are the main sensing component of the strain probe. Because the location is next to the median, they have the same strain, and create sensing light which carries information and has extremely narrow line-width. Finally, the strain can be demodulated by an edge filter. The sensing light is got by theoretical simulation, and in experiment its line-width is only 101 pm. The experimental results are in good agreement with numerical simulation. In the experimental verification of strain sensor, the demodulation results have a good linear relationship with the signal to be measured. The fitting goodness is 0.994, and the resolution of strain probe is $1.5 \mu\epsilon$. The strain sensor based on this design is of high resolution and low cost, and is not chirped. It has a good practical value.

Key words sensors; strain sensor; edge filter; phase-shifted fiber Bragg grating

OCIS codes 060.2280; 060.2340; 060.2370; 060.3735

1 引 言

相移光纤布拉格光栅(PSFBG)是一种非均匀周期光栅,折射率分布是不连续的。通过在均匀光纤布拉格光栅(FBG)^[1]的某些特定部位引入相位突变,产生具有波长选择特性的法布里-珀罗(F-P)谐

振腔。通过将谐振波长的光注入 FBG 的阻带,在阻带中打开一个或多个线宽极窄的透射窗口,使得光栅对上述波长具有极高的选择性,而且窗口位置可以发生改变^[2]。因此,相移光纤光栅可用作窄线宽带通滤波器,并且在窄线宽单频光纤激光器^[3-4]、

收稿日期: 2013-03-25; **收到修改稿日期**: 2013-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(11175257)、中国石油大学(北京)基础学科研究基金

作者简介: 马伟超(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: mbs007mwc@126.com

导师简介: 陈少华(1975—),女,博士,副教授,主要从事光纤传感技术方面的研究。

E-mail: shchen@cup.edu.cn(通信联系人)

边缘滤波器^[5]、掺铒光纤增益平坦^[6]和波分多路复用系统^[7-8]中有很大的应用价值。

在传感技术方面, LeBlanc 等^[9-10]利用相移光栅透射峰的窄线宽特性, 于 1997 年和 1999 年分别制作了传感灵敏度极高的应变传感器和对温度不敏感的压力传感器。目前, 相移光栅已经应用于测量弯曲^[11]、应力^[12]、加速度^[13]、超声波^[14]、磁场^[15]、折射率^[16]等物理量的传感器。但上述传感器中的解调系统都非常复杂, 大大增加了传感系统的成本。

在对多种新型光纤光栅传感器^[17-21]的设计方案进行深入研究之后, 本文提出了一种基于相移光纤光栅的应变传感探头的设计方案, 传感信号通过边缘滤波法解调, 实验结论与数值模拟结果在误差范围内吻合。这种应变传感器具有高分辨率、低成本、无啁啾的优点。

2 实验装置与可行性分析

2.1 传感系统的设计

边缘滤波法是光纤光栅传感系统中最实用的解调技术之一。长周期光栅滤波^[22]是发展较早的边缘滤波法, 但受限于线宽较宽, 解调分辨率低; 光纤分布反馈(DFB)激光器的线宽很窄, 激光经边缘滤波后, 可获得较高的解调分辨率^[23], 但掺铒光纤上刻写的 PSFBG 透射率低, 光损耗大^[14], 影响了解调的实际效果。而在普通光敏光纤上刻写高反射率 PSFBG 的技术目前已经成熟, 图 1 为普通被动型单相移光栅的透射光谱曲线。图中, 透射峰 1 带宽仅为 20 pm, 同时理论上透射率最高可达 1。但由于反射窗口两侧旁瓣透射峰 2, 3 等的影响, 对 PSFBG 的解调无法应用常规的边缘滤波法。

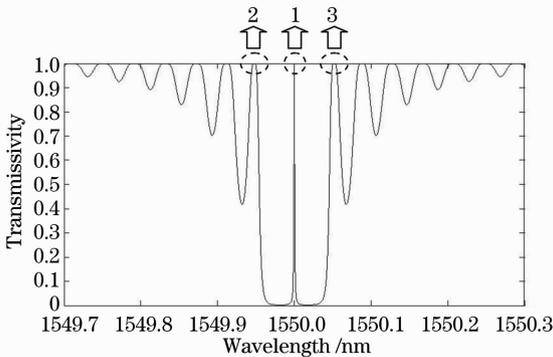


图 1 相移光纤光栅透射光谱

Fig. 1 Transmission spectrum of phase-shifted fiber Bragg grating

为了将相移光栅的透射峰 1 作为传感光, 设计

了如图 2 所示的传感系统, 其中, 采用放大自发辐射(ASE)宽带光源输出激光, PSFBG、FBG 和边缘滤波器分别与光环形器的三个端口依次连接。经 PSFBG 的透射光, 利用一参数合适的 FBG 反射后, 进入边缘滤波系统解调。解调后的光通过光电二极管(PIN)进行光电转换, 进而通过计算机(PC)计算出传感光的中心波长变化和待测物理量的数值。

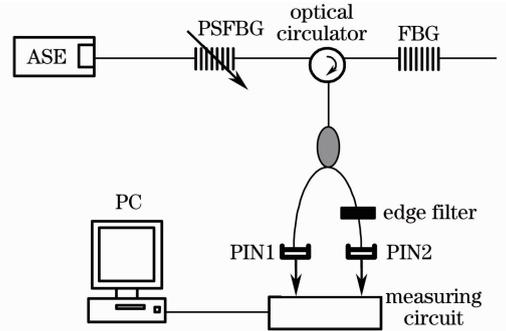


图 2 传感系统的设计图

Fig. 2 Design of sensor system

2.2 传感光谱的数据模拟

当 PSFBG 的相移量为 $\varphi = \pi$ 时, 透射峰位于反射光谱的正中央, 波长等于布拉格波长^[9], 方便与 FBG 的参数相匹配, 产生符合要求的传感光谱。因此, 所采用的 PSFBG 仅引入一个 $\varphi = \pi$ 的相移点, 参数为: 纤芯的有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.46$; 折射率调制深度 $\Delta n = 6 \times 10^{-5}$; 光栅的原始长度 $L = 4 \text{ cm}$; 中心波长 $\lambda_B = 1550 \text{ nm}$ 。所设计的 FBG 的参数为: 纤芯的有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.46$; 折射率调制深度 $\Delta n = 3 \times 10^{-5}$; 光栅长度 $L = 5 \text{ cm}$; 中心波长 $\lambda_B = 1550 \text{ nm}$ 。采用传输矩阵法^[24], 模拟得到 PSFBG 的透射光谱和 FBG 的反射光谱的理论曲线, 如图 3 所示。

PSFBG 的透射光 $T(\lambda)$ 经 FBG 反射后, 所得传感光谱 $S(\lambda)$ 为

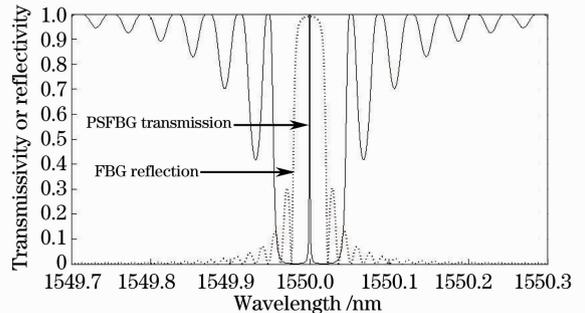


图 3 数值模拟的相移光栅透射光谱和光纤布拉格光栅反射光谱

Fig. 3 Simulated transmission spectrum of PSFBG and reflection spectrum of FBG

$$S(\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} T(\lambda')R(\lambda - \lambda')d\lambda', \quad (1)$$

式中 $R(\lambda)$ 为 FBG 的反射光谱。图 4 为传感光谱的理论模拟结果,虽然光谱存在微小的旁瓣,但该旁瓣光强很小,不会对后续测量造成影响。

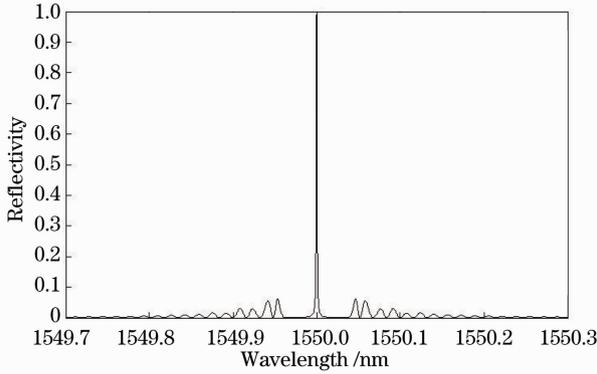


图 4 数值模拟的传感光谱

Fig. 4 Simulated sensing spectrum

3 应变传感实验

3.1 传感光谱验证

实验中采用的 PSFBG 和 FBG 的中心波长均为 1528.500 nm, FBG 的 3 dB 带宽为 0.157 nm。用 Agilent 光谱仪(86140A, 波长分辨率 0.06 nm)测得传感光谱如图 5 所示,与数值模拟的传感光谱谱形一致。图中光谱的中心波长为 1528.500 nm, 3 dB 带宽为 0.101 nm, 带宽明显小于之前的 FBG。图 5 中光谱中心波长两侧的上翘部分即为图 4 中的旁瓣,通过调整 PSFBG 和 FBG 的参数可以得到进一步消除。若采用透射峰线宽小于 1 pm 的 PSFBG^[10], 与参数匹配的 FBG 按照上述光路的方式组合,则可以得到线宽更窄的光谱,从而在保持成本低廉的基础上大大提高光纤光栅传感器的分辨率。

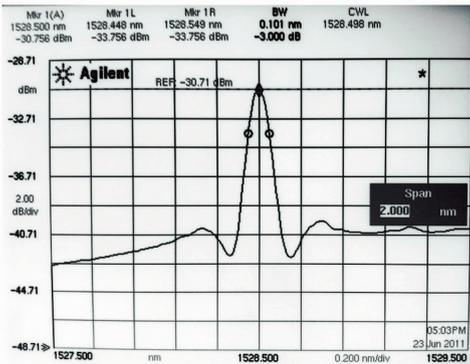


图 5 实验测得的传感光谱

Fig. 5 Experimental sensing spectrum

3.2 探头应变传感实验验证

制作的应变传感探头如图 6 所示,主要包括:承重支架、等强度悬臂梁、PSFBG 和 FBG。由于非均匀应变会使 PSFBG 的透射峰展宽^[5],从而影响传感光的稳定,所以悬臂梁必须采用等强度悬臂梁,它固定在承重支架上,其材料为磷青铜。为了保证所受的应变相等并且均匀,PSFBG 和 FBG 沿中线对称地粘贴在悬臂梁上,且 PSFBG 的长度要与其他参数匹配,长度过大会使峰值透射率大幅下降,解调难度增大。另外,如果在等强度悬臂梁的前端增加一个质量块,用于引导悬臂梁振动,则应变传感探头可用作地震检波器^[25]。

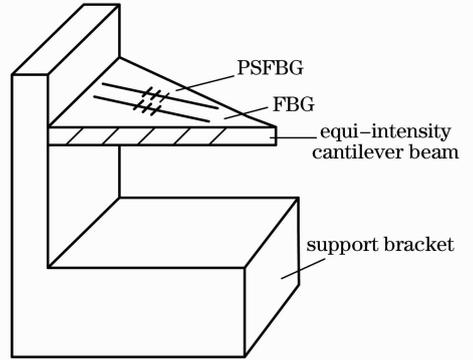


图 6 应变传感探头的结构

Fig. 6 Construction of strain sensing probe

由于 PSFBG 和 FBG 参数匹配,且应变相等,那么两者传输光谱的波长改变,可以引起图 5 中传感光谱的波长变化。实验中另外使用一个 FBG 作为边缘滤波器,并使传感光谱波长变化范围位于其下降边沿,最终测得的数据结果如图 7 所示,其中应力值为横轴,电压值为纵轴。从图 7 可以看出,在 5.1~5.85 N 的范围内,施加应力与输出电压的线性关系良好,拟合度为 $R^2 = 0.994$ 。

通过测量等强度悬臂梁的相关尺寸和参数,计算得到每施加 0.05 N 的应力,悬臂梁的应变增量为

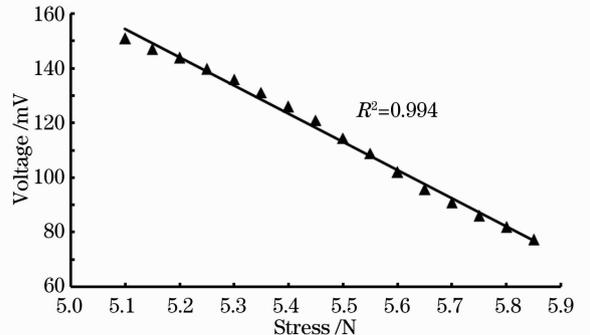


图 7 电压和应力的数值关系

Fig. 7 Numerical relationship between voltage and stress

1.5 $\mu\epsilon$, 其中 0.05 N 为应力值的步距。考虑到光纤光栅对于应变灵敏度的典型值为 1.2 pm/ $\mu\epsilon$ ^[26], 计算出本实验中探头的波长分辨率为 1.8 pm, 应变分辨率为 1.5 $\mu\epsilon$, 高于普通 FBG 传感器的分辨率^[27]。同时, 由于透射峰窗口性能主要与引入的相移有关, 而相移的长度为微米量级, 故在粘贴和调谐过程中不会引入任何啁啾。与光纤 DFB 传感器相比, 该光路采用被动式结构, 光损耗要小得多, 具有结构简单、成本低廉的特点。另外, 该传感光路采用边缘滤波法解调, 既适用于动态测量, 也适用于静态测量, 且响应速度快。综上所述, 基于该结构的应变传感探头具有很好的实用价值。

4 结 论

设计了一种基于 PSFBG 的新型应变传感器。将 PSFBG 和 FBG 串联在一起, 对称地粘贴在等强度梁上, 形成应变传感探头, 再通过边缘滤波法解调, 获取应变信息。探头的波长分辨率为 1.8 pm, 应变分辨率为 1.5 $\mu\epsilon$, 实验结论与数值模拟结果相符合。基于这种结构的应变传感器既有普通边缘滤波 FBG 传感器低成本、低损耗的特点, 又有 DFB 光纤传感器高分辨率、无啁啾的特点, 具有极好的实用性, 有望应用于光纤传感技术的多个领域。

参 考 文 献

- 1 A D Kersey, M A Davis, H J Patrick, *et al.*. Fiber grating sensors[J]. *J Lightwave Technol*, 1997, 15(8): 1442-1463.
- 2 Bi Weihong, Wu Guoqing. Theoretical analysis of Bragg wavelength demodulation based on phase-shift fiber grating[J]. *J Applied Optics*, 2006, 27(2): 140-143.
毕卫红, 吴国庆. 基于相移光纤光栅的布拉格波长解调原理的分析[J]. *应用光学*, 2006, 27(2): 140-143.
- 3 Zhao Donghui, Yang Xiufeng, Liu Zhiguo, *et al.*. Analyses for characteristics of the phase-shifted fibre grating [J]. *J Optoelectronics · Laser*, 1998, 9(3): 177-180.
赵东晖, 杨秀峰, 刘志国, 等. 相移光纤光栅的特性分析及其应用[J]. *光电子·激光*, 1998, 9(3): 177-180.
- 4 Fan Wei, Chen Bai, Li Xuechun, *et al.*. Single-frequency Yb³⁺ doped fiber ring lasers operated at 1053 nm[J]. *Chinese J Lasers*, 2002, 29(4): 304-306.
范薇, 陈柏, 李学春, 等. 1053 nm 掺 Yb³⁺ 全光纤单频环形腔激光器[J]. *中国激光*, 2002, 29(4): 304-306.
- 5 S Liang, S C Tjin, N Q Ngo, *et al.*. Novel tunable fiber-optic edge filter based on modulating the chirp rate of a pi-phase-shifted fiber Bragg grating in transmission[J]. *Opt Commun*, 2009, 282(7): 1363-1369.
- 6 Qian Jingren, Chen Houfei. Phase shifted long period grating and its application in gain flattening[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(9): 1207-1211.
钱景仁, 陈后飞. 相移长周期光栅及其在增益谱平坦化中的应用[J]. *光学学报*, 1999, 19(9): 1207-1211.
- 7 G P Agrawal, S Radic. Phase-shifted fiber Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexing[J]. *IEEE Photon*

- Technol Lett*, 1994, 6(9): 995-997.
- 8 C Elosua, R A Perez-Herrera, M Lopez-Amo, *et al.*. An amplified coarse wavelength division multiplexing self-referencing sensor network based on phase-shifted FBGs in transmissive configuration[J]. *Measurement Science & Technology*, 2009, 20(3): 034017.
- 9 M LeBlanc, A D Kersey, T E Tsai. Sub-nanostrain strain measurements using a pi-phase shifted grating[C]. *OFS*, 1997, 16: 28-30.
- 10 M LeBlanc, S T Vohra, T E Tsai, *et al.*. Transverse load sensing by use of pi-phase-shifted fiber Bragg gratings[J]. *Opt Lett*, 1999, 24(16): 1091-1093.
- 11 Y G Han, J H Lee, S H Kim, *et al.*. Simultaneous measurement of bending and temperature using phase-shifted long-period fiber gratings[C]. *SPIE*, 2005, 5623: 9-15.
- 12 D Gatti, G Galzerano, D Janner, *et al.*. Fiber strain sensor based on a pi-phase-shifted Bragg grating and the Pound-Drever-Hall technique[J]. *Opt Express*, 2008, 16(3): 1945-1950.
- 13 T T Y Lam, G Gagliardi, M Salza, *et al.*. Optical fiber three-axis accelerometer based on lasers locked to pi phase-shifted Bragg gratings[J]. *Measurement Science & Technology*, 2010, 21(9): 094010.
- 14 A Rosenthal, D Razansky, V Ntziachristos. High-sensitivity compact ultrasonic detector based on a pi-phase-shifted fiber Bragg grating[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(10): 1833-1835.
- 15 P Orr, P Niewczas, M Stevenson, *et al.*. Compound phase-shifted fiber Bragg structures as intrinsic magnetic field sensors [J]. *J Lightwave Technol*, 2010, 28(18): 2667-2673.
- 16 R Falate, O Frazao, G Rego, *et al.*. Refractometric sensor based on a phase-shifted long-period fiber grating[J]. *Appl Opt*, 2006, 45(21): 5066-5072.
- 17 Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen, *et al.*. Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of a FBG Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0406006.
张乐, 吴波, 叶雯, 等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0406006.
- 18 Zou Hongbo, Liang Dakai, Zeng Jie, *et al.*. Dynamic demodulation of fiber Bragg grating vibration sensor based on cascaded long-period fiber grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(8): 0805005.
邹红波, 梁大开, 曾捷, 等. 基于级联长周期光纤光栅的光纤布拉格光栅振动传感器的动态解调[J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 0805005.
- 19 Wang Yiping, Wang Ming, Huang Xiaoqin. Transverse pressure sensor based on the polarization properties of fiber grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(4): 0405004.
汪弋平, 王鸣, 黄晓琴. 基于光纤光栅偏振特性的横向压力传感器[J]. *中国激光*, 2011, 38(4): 0405004.
- 20 Liu Qinpeng, Qiao Xueguang, Zhao Jianlin, *et al.*. Temperature insensitive acceleration sensing technology based on π phase of double fiber Bragg gratings[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(2): 0205006.
刘钦朋, 乔学光, 赵建林, 等. 双光栅 π 相位差温度不敏感加速度传感技术研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(2): 0205006.
- 21 Li Dongming, Chen Jun, Ge Huiliang, *et al.*. Water sound sensor using the optical fiber grating sensitivity enhanced through side pressure and end surface pulling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0506001.
李东明, 陈军, 葛辉良, 等. 侧面压迫式及端面拉伸式增敏光纤光栅水声传感器[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0506001.
- 22 Liu Bo, Tong Zhengrong, Chen Shaohua, *et al.*. A novel method of edge filter linear demodulation using long-period grating in fiber sensor system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(2): 199-202.
刘波, 童峥嵘, 陈少华, 等. 一种长周期光纤光栅边沿滤波线

- 性解调新方法[J]. 光学学报, 2004, 24(2): 199-202.
- 23 N Takahashi, K Yoshimura, S Takahashi, *et al.*. Development of an optical fiber hydrophone with fiber Bragg grating [J]. Ultrasonics, 2000, 38(1): 581-585.
- 24 T Erdogan. Fiber grating spectra[J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1277-1294.
- 25 Qiao Xueguang, Ding Feng, Jia Zhen'an, *et al.*. High-accuracy quasi-distributed optical fiber Bragg grating seismic demodulation system[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(7): 074221.
- 乔学光, 丁峰, 贾振安, 等. 高精度准分布式光纤光栅地震检波解调系统的研究[J]. 物理学报, 2011, 60(7): 074221.
- 26 M Majumder, T K Gangopadhyay, A K Chakraborty, *et al.*. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring: present status and applications[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 147(1): 150-164.
- 27 A D Kersey, T A Berkoff, W W Morey, *et al.*. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter[J]. Opt Lett, 1993, 18(16): 1370-1372.

栏目编辑: 王晓琰