

应力和温度同时测量的光纤布拉格光栅双参数传感器

王振宝 杨鹏翎 邵碧波 陶蒙蒙 吴勇 武俊杰

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘要 为解决光纤布拉格光栅(FBG)传感器温度和应力交叉敏感问题,研究了一种FBG双参数传感器。基于FBG测温、应力测量的基本原理,分析了FBG双参数传感器的工作原理。对设计的FBG双参数传感器进行了实验研究,得到了双参数传感器的温度及应力测量线性度及响应灵敏度,并给出了温度及应力两个参数共同作用下去除交叉敏感测量结果。测温光栅动态范围 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$,响应灵敏度为 $12.2\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$;封装后应力响应灵敏度为 $1.79\text{ pm}/\text{N}$ 。研究表明,在FBG应力测量过程中,该方法不仅可以有效去除温度交叉敏感问题,同时还可以实现温度及应力两种参数的准确测量。

关键词 光纤布拉格光栅; 双参数; 交叉敏感; 线性度; 灵敏度; 应力

中图分类号 TN216 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.100602

Fiber Bragg Grating for Simultaneous Measurement of Strain and Temperature

Wang Zhenbao Yang Pengling Shao Bibo Tao Mengmeng Wu Yong Wu Junjie

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

Abstract In order to avoid cross-sensitive connection of temperature and strain in fiber grating sensing system, one dual-parameter sensor employing fiber Bragg grating (FBG) is investigated. Based on theories of temperature and strain testing using FBG, the operating principle of the dual-parameter sensor is described. The experiment on the dual-parameter sensor is performed for linearity and sensitivity of temperature and strain, and measurement results combined effects of strain and temperature loading are described. Dynamic range and sensitivity of temperature FBG are about $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $12.2\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, for strain FBG about $1.79\text{ pm}/\text{N}$. The experimental results show that this method can eliminate available cross-sensitivity of temperature and strain for strain FBG sensor, and measure temperature and strain accurately and synchronously.

Key words fiber Bragg grating; dual-parameter; cross-sensitivity; linearity; sensitivity; strain

OCIS codes 060.3735; 060.2370; 280.4788

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)由于具有制作简单、易于大规模成阵和相对简单的解调方法,加之光纤本身具有的抗电磁干扰、耐腐蚀等优点,使得其在光纤传感领域的应用取得了巨大的成功^[1-4]。FBG作为传感器件,同时光纤作为传输通道进行数据的传输,这也是其他传感器无法比拟的优点。FBG可以用来对多种物理量进行测量,例如:温度、压力、电压、电流和电磁场等^[5-8],对这些物理量的测量,归根结底是反映在FBG中心波长的变化。而在进行除温度以外的其他单一物理量测量的过程中,如何消除温度交叉敏感问题一直是FBG传感领域研究的一项重要课题。为此,人们提出了各种各样的解决方案,如单FBG法、双参量矩阵运算法、双FBG参数变更法、应力(温度)补偿法和双参量矩阵运算法等^[9-11],但是这些方法或存在精度不高、或存在结构上难以实现及算法复杂等不足。本文提出一种更易于实现的、结构紧凑、解调算法更为简单的温度和应力双参数FBG传感器,不仅可以有效消除温度和应力交叉敏感的问题,同时也可以实现这

收稿日期: 2013-04-21; **收到修改稿日期**: 2013-06-18; **网络出版日期**: 2013-08-19

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室创新基金(SKL111103)

作者简介: 王振宝(1981-),男,硕士,副研究员,主要从事激光参数测量及光纤应用方面的研究。

E-mail: zhenbao_wang98@163.com

两个物理量的准确测量,且只需要使用一套光源,一套解调系统,实时性好。同时这种方法还可以扩展应用至温度与其他物理量的联合测量中,消除温度带来的交叉敏感问题。

2 理论分析

FBG 的温度、应变灵敏度很高,分别为 $0.1 \text{ nm}/10^\circ\text{C}$ 和 $10 \text{ nm}/1\%$ 应变,尤其在轴向方向的传感灵敏度很高。根据光栅 Bragg 方程 $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ (n_{eff} 为纤芯有效折射率; Λ 光栅周期)^[12],当外界温度改变时,可以得到 Bragg 方程的微分形式为

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}}\Lambda + 2n_{\text{eff}}\Delta\Lambda = 2\left[\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}\Delta T + (\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}} + \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial a}\Delta a\right] \cdot \Lambda + 2n_{\text{eff}}\frac{\partial\Lambda}{\partial T}\Delta T, \quad (1)$$

式中 $\partial n_{\text{eff}}/\partial T$ 代表 FBG 折射率温度系数; $(\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}}$ 代表热膨胀引起的弹光效应; $\partial n_{\text{eff}}/\partial a$ 代表由于热膨胀导致光纤芯径变化而产生的波导效应; $\partial\Lambda/\partial T$ 代表光纤的线性热膨胀系数。其中, $(\Delta n_{\text{eff}})_{\text{ep}}$ 和 $\partial n_{\text{eff}}/\partial a$ 在实际应用过程中作为小量可以忽略。这样可将(1)式改写为如下形式:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B\Delta T} = \frac{1}{n_{\text{eff}}}\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda}\frac{\partial\Lambda}{\partial T}. \quad (2)$$

令 $K_T = \frac{1}{n_{\text{eff}}}\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda}\frac{\partial\Lambda}{\partial T}$, 则

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_T\Delta T. \quad (3)$$

应力的施加是指对 FBG 进行纵向拉伸或压缩,求得应力引起光栅中心波长变化为

$$\Delta\lambda_B = 2\Lambda\left[\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial P}\Delta P + \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial a}\Delta a\right] + 2n_{\text{eff}}\frac{\partial\Lambda}{\partial P}\Delta P, \quad (4)$$

式中 ΔP 代表应力大小, Δa 表示由于纵向拉伸引起得光纤直径变化, $\partial n_{\text{eff}}/\partial P$ 表示弹光效应, $\partial n_{\text{eff}}/\partial a$ 表示波导效应, $\partial\Lambda/\partial P$ 代表光纤的线性伸缩系数。其中 $\partial n_{\text{eff}}/\partial a$ 在实际应用过程中作为小量可以忽略。这样可将上式改写为如下形式:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B\Delta P} = \frac{1}{n_{\text{eff}}}\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial P} + \frac{1}{\Lambda}\frac{\partial\Lambda}{\partial P}. \quad (5)$$

令 $K_P = \frac{1}{n_{\text{eff}}}\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial P} + \frac{1}{\Lambda}\frac{\partial\Lambda}{\partial P}$, 则

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_P\Delta P. \quad (6)$$

本文所设计的双参数 FBG 传感器如图 1 所示,该传感器由同一根光纤上相连的两个光栅组成,其空间间隔为 1 cm ,波长间隔约为 2 nm 。封装后的双参数传感器中,测温 FBG 仅感受外界温度信息,并作为应力测量光栅在应用过程中去除温度交叉敏感的依据。为增加应力测量 FBG 的应力灵敏度,在结构上进行了如图 1 所示的设计,即应力灵敏度增强区。

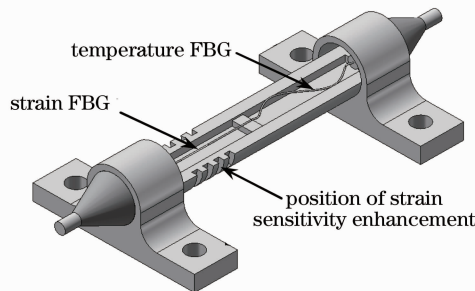


图 1 双参数 FBG 传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dual-parameter FBG sensor

应力传感光栅中心波长漂移与所施加应力和温度的对应关系:

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = k_P\Delta P + k_T\Delta T. \quad (7)$$

式中 k_P 和 k_T 分别代表 FBG 的应变和温度响应系数。通过测量温度传感光栅 1 和应力传感光栅 2 中心波长的漂移,由

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & k_{T1} \\ k_{P2} & k_{T2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta T \end{bmatrix} \quad (8)$$

可以同时确定对应待测应力和待测温度,式中 k_{P2} 、 k_{T1} 、 k_{T2} 分别对应温度传感光栅 1 和应力传感光栅 2 的应力及温度响应系数,可通过测量温度和应力变化下的波长漂移实验来确定。

3 实验研究

FBG 双参数传感器实物图如图 2 所示,其整体长度约为 5 cm。封装时,采用 353ND 环氧树脂实现 FBG 的固定,并进行高温老化处理。

双参数 FBG 传感器指标测量实验光路图如图 3 所示。光谱范围为 1525~1565 nm 的自发辐射(ASE)光源发出的光进入环形器端口 1,经由端口 2 进入双参数传感器,感受外界温度或应力信息的 FBG 反射光信号再次由端口 2 进入光纤环形器,最终由端口 3 输出至波长解调仪。

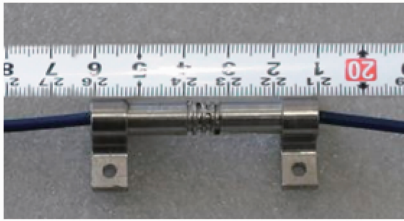


图 2 双参数 FBG 传感器实物图

Fig. 2 Real-object picture of dual-parameter FBG sensor

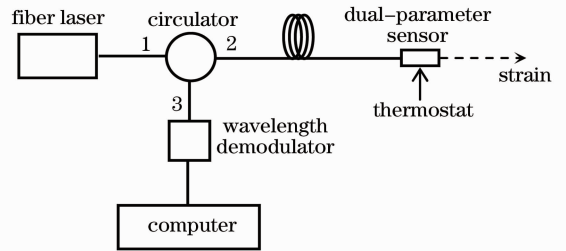


图 3 实验光路图

Fig. 3 Experimental arrangement

图 4 为双参数 FBG 传感器温度测量结果。实验过程中,通过温度控制箱调节温度范围为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$,解调仪记录不同温度情况下测温光栅及应力测量光栅中心波长的变化情况。实验结果表明,测温光栅及应力测量光栅中心波长随温度呈线性变化趋势,应力测量光纤温度响应灵敏度 $\Delta\lambda_{s,T}$ 为 $20.4\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时中心波长为 1531.254 nm),约为理论值的 2 倍,主要是因为封装结构及粘接胶对应力测量光栅的温度响应灵敏度起到了一定的增强作用;测温光栅温度响应灵敏度 $\Delta\lambda_{T,T}$ 为 $12.2\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时中心波长为 1529.604 nm),与理论值基本吻合。

实验过程中,保持温度不变,沿封装后的 FBG 双参数传感器轴向施加 $0\sim 51.5\text{ N}$ 的应力(换算为施加在裸光栅上的微应变为 $0\sim 60000\times 10^{-6}$),并通过 FBG 解调仪记录在施加不同应力情况下,测温光栅和应力测量光栅中心波长的变化情况。图 5 为轴向应力测量结果。由实验结果可以看出,测温光栅对应力不敏感,

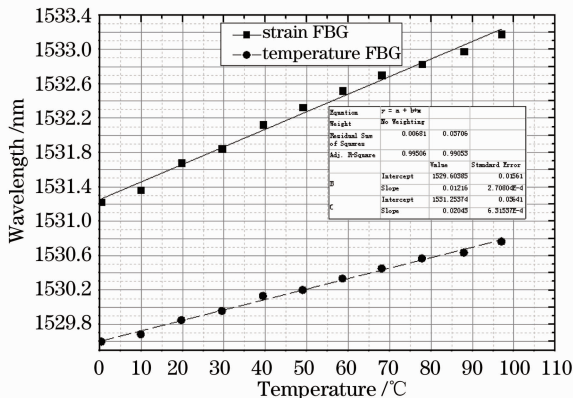


图 4 双参数 FBG 传感器温度测量结果

Fig. 4 Experimental results of temperature by dual-parameter FBG sensor

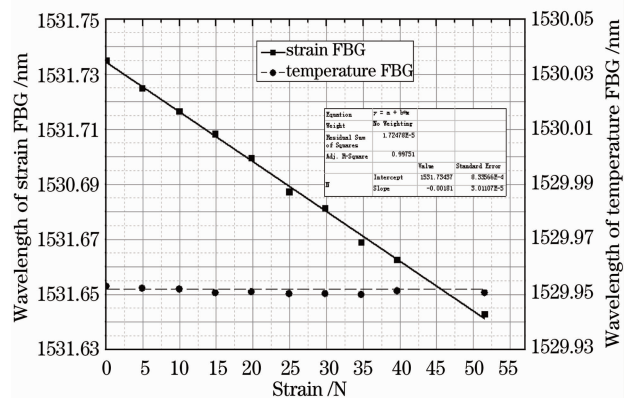


图 5 双参数 FBG 传感器应力测量结果

Fig. 5 Experimental results of strain by dual-parameter FBG sensor

应力测量光栅中心波长与施加应力大小 F 成线性关系,封装后其应力响应灵敏度 $\Delta\lambda_{s,F}$ 约为 1.79 pm/N。

表 1 给出了在同时施加温度和应力情况下的测量结果。施加的温度由测温光栅实际测量得到。应力测量光栅的中心波长变化中包含了温度及应力的双重影响,以测温光栅测量结果为依据,消除温度变化带来的影响,即可得到实际施加应力所引起的 FBG 中心波长的变化。

表 1 中中心波长漂移大小是相对 0℃ 时的中心波长而言,在应力及温度共同作用下应力测量光栅中心波长的漂移量测量结果,与图 4、图 5 中单一参数的测量结果相吻合。实验结果表明,以测温光栅的温度测量结果为依据,可以有效消除应力测量光纤在应力测量过程中的温度交叉敏感问题。

表 1 应力及温度共同作用下双参数 FBG 传感器测量结果

Table 1 Experimental results of dual-parameter FBG sensor under the combined effects of strain and temperature loading

Strain /N	Central wavelength of temperature FBG /nm	Central wavelength of strain FBG /nm	Temperature according to temperature FBG /℃	Excursion of central wavelength of strain FBG without effect of temperature /nm
51.5	1529.883	1531.629	22.9	-0.092
19.6	1530.120	1532.074	42.4	-0.045
39.2	1530.233	1532.235	51.7	-0.074

4 结 论

设计了一种双参数 FBG 传感器,该传感器不仅能够实现温度及应力同时准确测量,同时可以有效消除在应力测量过程中的温度交叉敏感问题。对研制的双参数 FBG 传感器开展的测温实验、应力测量实验以及温度应力联合作用等实验研究,也证明了该方法的有效性。同时根据具体的测量需求,这种方法还可以扩展应用至温度与其他物理量的联合测量中,以消除温度带来的交叉敏感问题。

参 考 文 献

- 1 Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, *et al.*. Fiber grating sensor[J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1442-1463.
- 2 Zhu Jing, Tu Xiaobo, Yao Qiong, *et al.*. Brillouin dynamic grating and its applications in distributed sensing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(10): 100007.
朱 靖,涂晓波,姚 琼,等. 布里渊动态光纤光栅及其在分布式传感中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 100007.
- 3 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.
- 4 Wu Yonghong, Shao Changjiang, Qu Wenjun, *et al.*. Basic theoretical model and its experimental investigation for standard embedded sensing fiber Bragg grating packaging[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1290-1293.
吴永红,邵长江,屈文俊,等. 传感光纤光栅标准化埋入式封装的理论及实验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1290-1293.
- 5 Spirin V V, Shlyagin M G, Miridonov S V, *et al.*. Fiber Bragg grating sensor for petroleum hydrocarbon leak detection [J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999, 32(5): 497-503.
- 6 Eckew, Latkal, Willschr, *et al.*. Optical fiber Bragg grating strain sensor network for X-38 spacecraft health monitoring[J]. SPIE, 2000, 4185: 888-891.
- 7 Qian Liliang, Zhang Shuai, Qian Xiangzhong. Analysis on sensor properties of microstructure optical fiber grating based on materials filling[J]. Optoelectronic Technology, 2011,31(3): 207-210.
钱立亮,张 帅,钱祥忠. 材料填充微结构光纤光栅传感特性研究[J]. 光电子技术,2011,31(3): 207-210.
- 8 Pang Dandan, Sui Qingmei, Jiang Mingshun. New fiber Bragg grating high temperature sensing network based on diffraction demodulation[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1105005.
庞丹丹,隋青美,姜明顺. 基于衍射解调的新型光纤光栅高温传感网络[J]. 中国激光,2011, 38(11): 1105005.
- 9 Feng Kui, Zhu Yong, Su Yang, *et al.*. Analysis of the cross sensitivity of magnetic field sensor with phase-shifted grating [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 2020-1025.
冯 奎,朱 勇,苏 洋,等. 相移光栅磁场传感方案交叉敏感分析[J]. 光学学报,2010, 30(4): 2020-1025.
- 10 Chen Zhimin, Xie Fang, Li Min. A dual-parameter sensor system employing a single fiber Bragg grating demodulated with

a fiber F-P filter[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2010, 32(5): 732–734.

陈志敏, 谢芳, 李敏. 光纤 F-P 解调的双参数光纤光栅传感系统[J]. *压电与声光*, 2010, 32(5): 732–734.

- 11 Liu Yunqi, Guo Zhuanyun, Liu Zhiguo, *et al.*. The mechanism and solutions of cross-sensitivity of fiber grating sensor measurements[J]. *J Optoelectronics Lasers*, 1999, 10(2): 179–182.

刘云启, 郭转运, 刘志国, 等. 光纤光栅传感测量中的交叉敏感机制及其解决方案[J]. *光电子·激光*, 1999, 10(2): 179–182.

- 12 G P Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics, Third Edition & Applications of Nonlinear Fiber Optics*[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin, *et al.* transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 279–285

阿戈沃 著. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 谈斌, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 279–285