

长周期光纤光栅温度传感性能分析

刘明生^{1,2} 梁丽丽^{1*} 李燕³ 李国玉³ 杨康³

¹河北工业大学信息工程学院, 天津 300401

²石家庄铁路职业技术学院信息工程系, 河北 石家庄 050041

³邯郸学院 信息技术研究所, 河北 邯郸 056005

摘要 长周期光纤光栅的谐振波长与温度的变化基本呈线性关系,线性拟合的标准差可以表示长周期光纤光栅损耗峰对应波长的波动性。提出了一种初步衡量长周期光纤光栅的温度传感性能优劣的方法,即用长周期光纤光栅温度灵敏度与拟合标准差的比值 P 的大小来判断长周期光纤光栅的温度传感性能优劣。大量的实验数据证明,长周期光纤光栅温度传感特性的优劣与参数 P 的大小是一致的,即 P 值越大则长周期光纤光栅的温度传感特性越好, P 值越小则长周期光纤光栅的温度传感特性越差。

关键词 光栅;长周期光纤光栅;温度传感性能

中图分类号 TN249 文献标志码 A doi: 10.3788/LOP51.010501

Performance Analysis of Long Period Fiber Grating Temperature Sensing

Liu Mingsheng^{1,2} Liang Lili¹ Li Yan³ Li Guoyu³ Yang Kang³

¹School of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

²Department of Information Engineering, Shijiazhuang Railway Vocational and Technical College, Shijiazhuang, Hebei 050041, China

³Institute of Information Technology, Handan Colloge, Handan, Hebei 056005, China

Abstract Resonance wavelength of long period fiber grating basically has a linear relation with the temperature changes, and the volatility of the wavelength corresponding to the loss peak can be represented by the standard deviation of the linear fitting. A new method for temperature sensing performance evaluation of long period fiber grating (LPFG) is proposed. The method is to use the ratio of the temperature sensitivity to the fitting standard deviation, P , to measure the sensing properties of LPFG. Lot of experimental results show that temperature sensitivity has a good consistence with the P value. The greater the P value is, the better the temperature sensing property of LPFG is, and the smaller the P value is, the poor the property is.

Key words gratings; long-period fiber grating; temperature sensing performance

OCIS Codes 050.2770; 140.3510; 350.2770

1 引言

长周期光纤光栅(LPFG)是透射光栅,当外界的温度发生变化时,引起纤芯基模、包层有效折射率、周期等的变化,从而引起谐振波长的变化^[1],因此LPFG可以用作温度传感元件,利用波长相对温度的变化来表征温度灵敏度。与光纤布拉格光栅(FBG)相比,LPFG的温度灵敏度远高于FBG的温度灵敏度,但是LPFG的应用远少于FBG,主要是因为FBG的反射谱是一个很尖锐的波峰,对于波峰对应的波长位置很容易判断,并且波动性很小。LPFG的透射谱是一个很宽的波谷,由于波谷相对于FBG的波峰而言宽很多,所以波谷对应的波长的位置不容易判断,这样也造成波谷对应的波长位置波动性很大。LPFG对外界多种因素都很敏感^[2-4],外界因素的干扰引起的波长的波动性也不容忽视。因此,交叉敏感和自身透射谱宽引起的波长波动小和温度灵敏度高是

收稿日期: 2013-07-30; 收到修改稿日期: 2013-09-17; 网络出版日期: 2013-12-13

基金项目: 国家863计划(2013AA014203)、河北省应用基础研究计划重点基础研究项目(13960306D)

作者简介: 刘明生(1960-),男,博士,教授,主要从事光纤光栅方面的研究。E-mail: liumings601001@sina.com

* 通信联系人。E-mail: liangli70118@163.com

LPGF 应用于温度传感所需要达到的要求。为此本文提出了一种分析 LPGF 温度传感性能的方法,它可以作为实际应用中光栅选择的关键依据参数,对其详细的研究和分析具有很重要的实际意义。

2 基本理论

LPGF 利用波长来表征温度传感特性,其温度灵敏度表达式为^[2-3]

$$\frac{d\lambda_{\text{res}}^m}{dT} = \lambda_{\text{res}}^m \gamma^m (\alpha + \Gamma_{\text{temp}}), \quad (1)$$

式中 λ_{res}^m 为 LPGF 的透射谱的谐振波长; $\gamma^m = \frac{1}{1 - A \frac{d(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})}{d\lambda_{\text{res}}}}$ 表示光纤波导色散因子, $\alpha = \frac{\Delta A / A}{\Delta T}$ 表示光纤

的热膨胀系数, $\Gamma_{\text{temp}} = \frac{d(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})/dT}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}}$ 表示温度灵敏度因子, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 、 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 为纤芯基模和一次 m 阶包层模的有效折射率, A 为 LPGF 的周期, ΔA 为 LPGF 周期的改变量。由(1)式可知,谐振波长随温度的变化与光栅周期热膨胀系数、热光效应、波导色散因子等因素有关。

对于 LPGF,随着温度的升高,谐振波长向长波长方向漂移,随着温度的降低,谐振波长向短波长方向漂移,且基本呈线性关系,并且损耗峰幅值基本不变^[4]。可以对波长与温度的关系进行线性拟合,拟合的关系式就是以后进行光栅光栅温度传感解调的关系式,所以拟合的准确程度直接决定了 LPGF 能否准确传感温度。设线性拟合的公式为 $\lambda = \lambda_0 + KT$, K 即为温度灵敏度,线性拟合的标准差(SD, D_s)为

$$D_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \{ \sum_j [\lambda_{ij} - (\lambda_0 + KT_i)]^2 / n \}}{(N-2)}} \quad (2)$$

线性拟合标准差同一个温度点对应的波长值与拟合后对应的波长值的平方差代表了由于 LPGF 透射谱宽波谷对应波长难判断引起的波长的波动性的大小,不同温度点对应的波长值与拟合后对应的波长值的平方差代表了由于交叉敏感引起的波长的波动性的大小。

结合温度灵敏度的定义(1)式可得参数 P 的表达式为

$$P = \frac{\frac{d\lambda_{\text{res}}^m}{dT}}{D_s} = \frac{\lambda_{\text{res}}^m \gamma^m (\alpha + \Gamma_{\text{temp}})}{D_s} \quad (3)$$

3 实验及分析

利用高频 CO_2 激光器写制 LPGF,对写制过程不同的两类 LPGF 各任选一个进行温度传感特性实验,其实验装置图如图 1 所示^[5]。

每个温度点的 n 个数值的平均值即为该温度点对应的波长值,其温度上升时波长随温度的变化关系如图 2 中的点线所示。将点线进行线性拟合,图 2(a)的斜率为 $0.07204 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,图 2(b)的斜率为 $0.09182 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

图 2(b)中的 LPGF 虽然线性拟合的斜率即波长温度灵敏度比图 2(a)中的 LPGF 高,但是其波长的波动

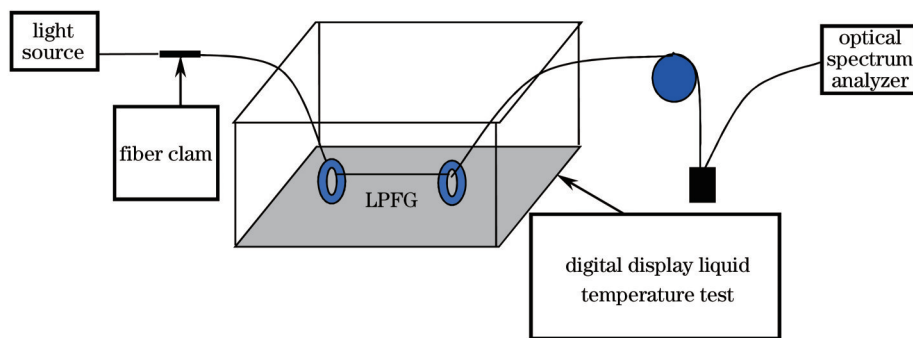


图 1 LPGF 液体温度传感特性实验装置图

Fig.1 Experimental setup of LPGF liquid temperature sensing properties

性太严重,例如 35 °C 时对应的波长比 30 °C 时对应的波长还要小,显然图 2(a) 中的 LPFG 比图 2(b) 中的更适合作为温度传感器。

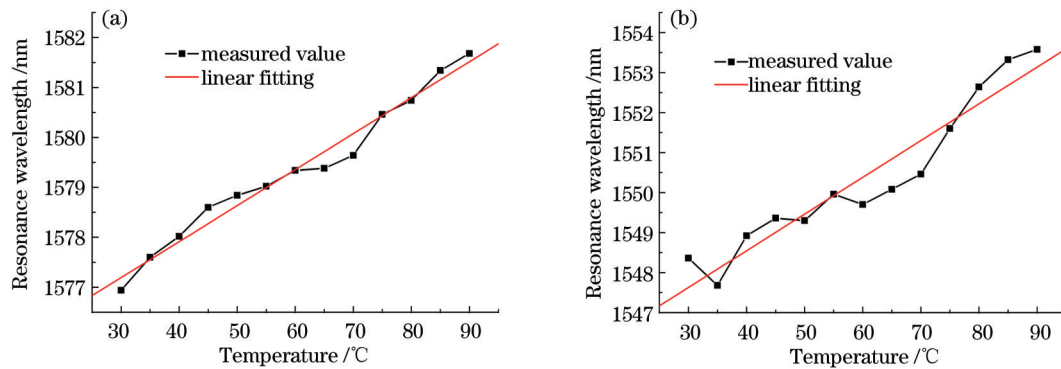


图 2 谐振波长随液体温度的变化关系

Fig.2 Resonance wavelength with the change of the liquid temperature

4 LPFG 传感性能分析

结合(2)、(3)式和图 2,分别计算温度灵敏度、线性拟合标准差和参数 P 如表 1 所示。

表 1 温度灵敏度与准确性参数 P 的关系

Table 1 Relationship between temperature sensitivity and accuracy parameter P

	Fig.2(a)	Fig.2(b)
Temperature sensitivity /(nm/°C)	0.07204	0.09182
Standard fitting deviation /nm	0.2322	0.56884
Accuracy parameter P	0.31024978	0.16141622

由表 1 可知,仅由温度灵敏度这一个参数的大小不能说明 LPFG 温度传感特性的好坏,谐振波长在某个温度点的稳定性也直接影响着 LPFG 的传感特性,而参数 P 的大小与温度传感特性的好坏相一致。

如果 LPFG 的线性拟合标准差一定,即 LPFG 在某个温度点时波长波动的范围一定,那温度灵敏度越高 LPFG 的温度传感特性越好,对应的参数 P 也应更大;同理,如果 LPFG 的温度灵敏度一定,也就是在相同的温度差下 LPFG 波长的漂移量一定,那某个温度点的波长左右波动范围越小则利用此光栅解调时越能准确解调出对应的温度,即 LPFG 温度传感特性越好,对应的参数 P 也应该更大。

为了验证参数 P 的大小与温度灵敏度和线性拟合标准差的关系,将大量实验的结果分别进行计算分析,利用温度灵敏度、拟合标准差和参数 P ,绘制三维曲面如图 3 所示。

由图 3 可知,当 LPFG 的温度灵敏度确定时,线性拟合误差越小参数 P 越大;当线性拟合的误差一定时,

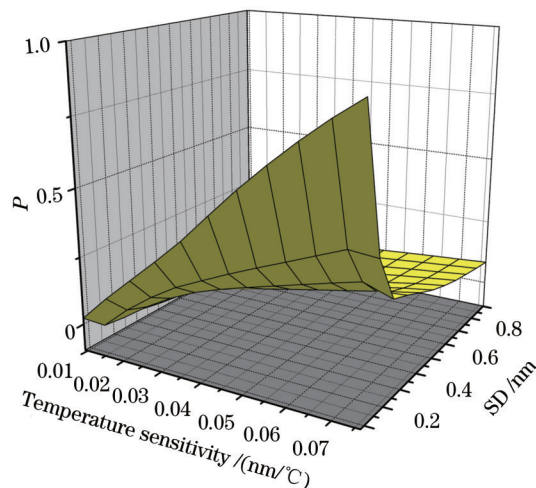


图 3 温度灵敏度、拟合标准差和 P 之间的关系

Fig.3 Relationship among temperature sensitivity, standard fitting deviation and P

温度灵敏度越大参数 P 越大。所以LPFG温度传感特性的优劣可以用参数 P 来判断。

目前LPFG在温度传感方面的应用还不是很广,主要是因为LPFG对多参量交叉敏感和LPFG透射谱相比于FBG的要宽很多,在解调时很难准确判定谐振波长的位置,所以LPFG应用在温度传感方面时应该进行多步筛选。衡量温度传感器件特性的参数主要包括温度灵敏度、相对误差和绝对误差、相对精度和绝对精度,这些参数都要经过严密的测量和计算。参数 P 的确定较容易,在确定温度和谐振波长的关系后,拟合标准差的计算很简单,所以利用参数 P 与LPFG传感特性的一致性,用参数 P 的大小进行LPFG的初步筛选,然后再衡量LPFG用于温度传感时其他参数是否满足社会实际的要求,这样可以提高效率,节省很多计算时间。

5 结 论

LPFG具有比FBG高很多的温度灵敏度,受交叉敏感和LPFG透射谱宽、谐振波长难判断的限制,LPFG在温度传感方面的应用比FBG要少得多。随着光纤传感技术不断发展,LPFG写制技术不断提高,LPFG对温度高敏感性一定能得到充分的发挥,LPFG的应用前景必将非常广泛。

参 考 文 献

- 1 Bhatia V. Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing [J]. *Opt Express*, 1999, 4(11): 457-466.
- 2 Guan Shouhua, Yu Qingxu, Zheng Jianzhou. Study on torsion characteristics of a new-type long-period fiber grating [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(8): 1996-2000.
关寿华, 于清旭, 郑建洲. 一种新型长周期光纤光栅扭曲特性的研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 1996-2000.
- 3 Zeng Xiangkai, Rao Yunjiang, Liang Kuai. Characteristic analysis of LPFG resonance wavelength shift owing to transverse load [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0106002.
曾祥楷, 饶云江, 梁 快. 长周期光纤光栅谐振波长的横向负载特性分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0106002.
- 4 Liu Hongyue, Liang Dakai, Zeng Jie, *et al.* Long period fiber grating refractive index sensitivity-based reinforcing rebar corrosion sensor in concrete [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0806009.
刘宏月, 梁大开, 曾 捷, 等. 基于长周期光纤光栅折射率敏感特性的混凝土结构钢筋锈蚀监测[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0806009.
- 5 Bhatia V, Campbell D K, Sherr D, *et al.* Temperature-insensitive and strain-insensitive long-period grating sensors for smart structures [J]. *Opt Eng*, 1997, 36(7): 1872-1876.
- 6 Jang J N, Kim S Y, Kim S W, *et al.* Temperature insensitive long-period fibre gratings [J]. *Electron Lett*, 1999, 35(24): 1014-1015.
- 7 Guan Shouhua, Yu Qingxu, Song Shide, *et al.* Theoretical and experimental study on temperature characteristic of long-period fibre grating [J]. *Chinese J Sensors and Actuators*, 2007, 20(3): 543-545.
关寿华, 于清旭, 宋世德, 等. 长周期光纤光栅温度特性的理论与实验研究[J]. *传感技术学报*, 2007, 20(3): 543-545.
- 8 Liang Lili, Liu Mingsheng, Li Yan, *et al.* The method of one-time writing LPFG using high frequency CO₂ laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 090503.
梁丽丽, 刘明生, 李 燕, 等. 使用高频CO₂激光器一次写入长周期光纤光栅的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(9): 090503.