

基于光纤光栅传感系统的光纤法布里-珀罗 滤波器热致非线性研究

盛文娟^{1,2}, 张 慧^{1*}, 杨 宁¹, 刘 洋², 彭刚定²

¹上海电力学院自动化工程学院, 上海 200090;

²新南威尔士大学电气工程与电信学院, 新南威尔士州, 悉尼 2052

摘要 研究和评估了基于光纤布拉格光栅(FBG)传感系统的压电陶瓷(PZT)驱动的光纤法布里-珀罗(FFP)滤波器的热致非线性,采用多项式拟合法减小FFP滤波器的热致非线性误差。在FFP滤波器所处环境温度变化超过15℃的情况下,采用大于等于4阶的多项式拟合和参考光栅的方法,可使FFP滤波器热致应变误差从750 με减小到15 με,标准差保持在10 με以下。实验结果显示,当PZT驱动的FFP滤波器的温度变化范围较大时,其热效应不是简单地保持不变或呈线性。

关键词 光学器件; 可调谐法布里-珀罗滤波器; 光纤布拉格光栅; 压电陶瓷; 热效应; 非线性; 多项式拟合

中图分类号 TP212 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.042301

Investigation on Thermo-Induced Nonlinearity of Fiber Fabry-Perot Filter by Using Optical Fiber Sensing System

Sheng Wenjuan^{1,2}, Zhang Hui¹, Yang Ning¹, Liu Yang², Peng Gangding²

¹College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

²School of Electrical Engineering and Telecommunications, The University of New South Wales, Sydney, New South Wales 2052, Australia

Abstract The thermo-induced nonlinearity of piezo-electrical transducer (PZT) driven fiber Fabry-Perot (FFP) filter using fiber Bragg grating (FBG) sensing system is investigated and evaluated. Polynomial fitting is adopted to model the nonlinearity. Under 4th or higher order polynomial fitting and a reference FBG, the thermo-induced strain error is reduced from 750 με to 15 με and the standard deviation is kept below 10 με while PZT driven FFP experiences over 15 °C temperature change. It is observed that thermal effect on PZT driven FFP is not simply invariable or linear in a wide temperature range.

Key words optical devices; tunable Fabry-Perot filter; fiber Bragg grating; piezo-electrical transducer; thermal effect; nonlinearity; polynomial fitting

OCIS codes 230.7408; 060.4370; 060.3735; 140.6810

1 引言

压电陶瓷(PZT)驱动的光纤法布里-珀罗(FFP)滤波器属于最常用的可调谐滤波器,它广泛应用于光纤通信、光学传感以及光谱分析^[1-2]等领域。应用中 FFP 滤波器的波长-电压关系常被认为呈线性或在其自由

收稿日期: 2016-10-08; **收到修改稿日期:** 2016-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(61304134)、中国国家留学基金管理委员会(2009102131)、上海市高校青年教师研究基金(61003089)、上海市“创新行动计划”部分地方院校能力建设专项项目(15160500800)、分布式试验检验系统数据处理平台(H2015-159)

作者简介: 盛文娟(1982—),女,博士,讲师,主要从事光纤光栅传感技术、远程监测与控制等方面的研究。

E-mail: wenjuansheng@shiep.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: zhangh_000@163.com

光谱范围(FSR)内呈局部线性。在光纤布拉格光栅(FBG)传感系统应用中,FFP滤波器通常被用作波长解调器,必须准确地找到FFP滤波器中心波长和驱动电压间的实际关系^[3-4],否则测量结果会产生很大误差。

FFP滤波器的非线性已得到广泛的关注,也有了一些校准或控制其非线性的方法。Liu等^[5-6]研究了PZT驱动的法布里-珀罗(F-P)型滤波器的非线性,并采用多项式拟合减小了随机误差。Qi等^[7]通过分析PZT的固有迟滞设计了一个高精度波长控制器并获得了高波长锁定精度。Ding等^[8]采用粒子群优化算法(POS),实现了高精度、快速FBG波峰位置在线检测。Kallapur等^[9]采用比例-积分控制器控制FFP滤波器腔长。上述方法都直接有效地减小了FFP滤波器的非线性,但没有对特定类型的非线性提出改进方法。本文详细分析了FFP滤波器非线性产生的原因,在本课题组以往的研究工作中也为该类型的非线性提出了解决方案,如:基于交流转直流(AC-DC)修正法消除因交流驱动电压引起的非线性、并行数据处理法消除因串行数据处理引起的非线性^[10]等。

多数研究都简单地将FFP滤波器波长-电压间的非线性归结为PZT位移和电压间的固有非线性和迟滞。实际上FFP滤波器由PZT制成,因此会产生PZT的电气和热属性^[11-13]。由于在短时间测量中影响较小,PZT驱动的热效应引起的FFP滤波器的非线性很少被关注。但在长时间测量中,由于PZT的温度依赖特性,研究温度对FFP滤波器的影响对减小其非线性很有必要。本研究集中于电压、温度对FFP滤波器长时间测量精度的影响。基于多光束干涉理论讨论了热效应引起的FFP滤波器的非线性。基于一组FBGs对热效应进行研究并采用多项式拟合法减小其非线性误差。

2 FFP滤波器的热致非线性

PZT执行器由容易产生铁电极化的PZT制成。现已有很多关于PZT温度和电气特性的研究^[14-17],但少有研究成果涉及到FFP滤波器的非线性,尤其是热效应引起的FFP滤波器的非线性。理论上,当PZT执行器驱动FFP滤波器时,执行器位移和电压间的固有非线性导致FFP波长-电压的关系为非线性。根据多光束干涉理论,F-P干涉仪的单位相位差为

$$\delta(\lambda) = \frac{4\pi}{\lambda}nl\cos\theta + 2\Phi(\lambda), \quad (1)$$

式中 λ 为光束的波长, n 为两反射面间的介质折射率, l 为两反射面间距, θ 为反射角, $\Phi(\lambda)$ 为由反射引起的相变。当F-P干涉仪的透射谱达到最大值,单位相位差满足:

$$\delta(\lambda) = 2k\pi, \quad (2)$$

式中 k 为整数。所以F-P干涉仪的中心波长可导出为

$$\lambda = \frac{2}{k}nl\cos\theta + \frac{\Phi(\lambda)}{k\pi}\lambda, \quad (3)$$

在多数情况下, l 远大于 λ , $\Phi(\lambda) \leq \pi$,因此(3)式等号右侧第二项可近似忽略不计。F-P干涉仪的第 k 个透射波峰可近似计算为

$$\lambda_k = \frac{2}{k}nl\cos\theta, \quad (4)$$

故F-P干涉仪的FSR为

$$R_{\text{FS},k} = \lambda_k - \lambda_{k+1} = \frac{2}{k}nl\cos\theta - \frac{2}{k+1}nl\cos\theta = \frac{2}{k(k+1)}nl\cos\theta. \quad (5)$$

因此,F-P干涉仪的FSR取决于干涉序列。在PZT驱动的FFP滤波器中,F-P干涉仪反射表面间距可表示为

$$l = l_0 + (T - T_0) \cdot \alpha \cdot l_0 + D[V(t)], \quad (6)$$

若令 $f[V(t), T] = (T - T_0) \cdot \alpha \cdot l_0 + D[V(t)]$,则 l 可表示为

$$l = l_0 + f[V(t), T], \quad (7)$$

式中 l_0 为初始温度 T_0 下两反射表面的初始间距; T 为当前温度; α 为热膨胀系数; $V(t)$ 为加在PZT上的驱动电压, t 为时间; $D[V(t)]$ 为所施加电压引起的反射面移位,是非线性函数; $f[V(t), T]$ 为驱动电压和温度

引起的总位移。因此,(4)式中透射波长和(5)式中的 FSR 可分别表示为

$$\lambda_k = \frac{2}{k} n \{l_0 + f[V(t), T]\} \cos \theta, \quad (8)$$

$$R_{FS,k} = \frac{2}{k(k+1)} n \{l_0 + f[V(t), T]\} \cos \theta, \quad (9)$$

若令 $F[V(t), T] = \frac{2}{k} n \{l_0 + f[V(t), T]\} \cos \theta$, 则(8)、(9)式可简化为

$$\lambda_k = F[V(t), T], \quad (10)$$

$$R_{FS,k} = \frac{1}{k+1} F[V(t), T], \quad (11)$$

式中 $F[V(t), T]$ 为 FFP 中心波长、驱动电压和温度三者间的非线性函数。中心波长和 PZT 驱动的 FFP 滤波器的 FSR 受驱动电压和温度影响。热效应和迟滞引起的压电执行器位移-电压响应的非线性可通过 FFP 滤波器获得。

3 FFP 滤波器热致非线性测量

基于 FBG 传感系统的测量方案如图 1 所示。放大自发辐射(ASE)光源输出宽带光。利用光电探测器检测 FBG 反射光谱以计算其特征波长。数模转换器(DAC)产生 1 Hz、2~4.5 V 的锯齿波循环扫描电压驱动 FFP 滤波器。在调谐期可以检测出每个 FBG 的反射波峰,并且通过分析其在每个调谐周期的时间位置变化可解调出 FBGs 感知的物理扰动。

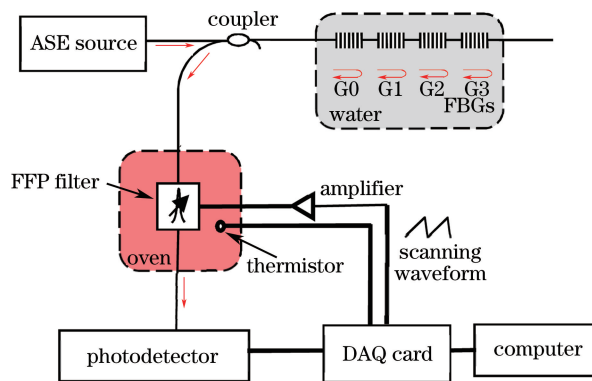


图 1 FBG 传感测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FBG sensing measurement system

4 个 FBGs 被浸没在一个提供均匀稳定温度(18 °C)环境的水箱里。FFP 滤波器放置在温度可调的电烘炉中。校准热敏电阻贴在 FFP 滤波器表面,用于读取温度数字。用 Labview 程序同步信号,FBGs 的初始中心波长由高分辨率可调谐激光器(安捷伦公司的 HP8164B 光波测量系统)测得,实验过程中用质心检测算法(CDA)寻找 FBGs 波峰位置,每个 FBG 初始中心特征波长如表 1 所示。

表 1 FBGs 特征波长

Table 1 Characteristic wavelength of FBGs

FBG number	G0	G1	G2	G3
Wavelength / nm	1528.83	1541.76	1557.41	1562.18

第一个实验研究了 FFP 滤波器在不同温度下,驱动电压响应的非线性。FFP 滤波器的环境温度先由室温加热到 38 °C,然后将电烘炉关闭,静置自然冷却至室温。热敏电阻检测到的 FFP 滤波器的表面温度如图 2 所示。4 个 FBGs 的波长漂移量和 G1,G2,G3 波长绝对漂移量(G0 作为参考)分别如图 3(a)、(b)所示。

布拉格波长漂移和绝对波长漂移都随温度的变化呈非线性,这与(10)、(11)式吻合。在滤波器的热传递过程中,冷却过程比加热过程的温度变化更接近 FFP 滤波器的实际情况。在 FFP 滤波器冷却过程中,每隔 1 °C 记录下 G2 的布拉格波长以及对应的响应电压,结果如图 4 所示,可以看出驱动电压和热效应都导致了

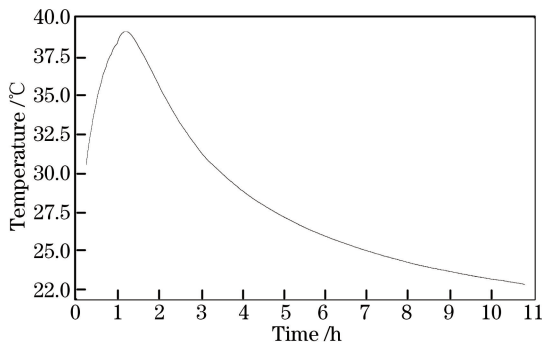


图 2 FFP 滤波器的表面温度随时间变化曲线

Fig. 2 FFP filter surface temperature with the change of time

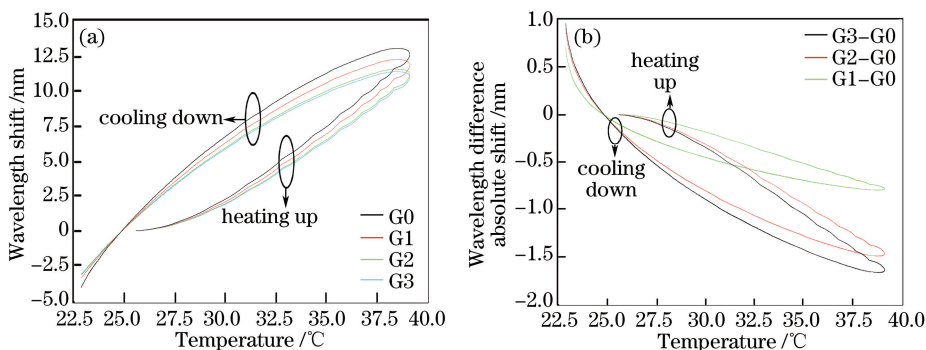


图 3 (a) FBGs 的波长漂移; (b) G1, G2, G3 的绝对波长漂移

Fig. 3 (a) Wavelength shifts of the FBGs; (b) absolute wavelength shifts of G1, G2, G3

FFP 滤波器波长-电压的非线性。一旦温度和电压给定,某一 FBG 对应的布拉格波长即可计算出。布拉格波长和温度、驱动电压间的关系可由下式拟合得到:

$$\lambda_{B,p} = F(V_p, T) = \sum_{i=0}^N a_i(T) V_p^i, (p = 0, 1, 2, 3), \quad (12)$$

式中 $\lambda_{B,p}$ 是检测到的光栅布拉格波长; p 是光栅序号; N 是正整数; $a_i(T)$ 是多项式系数; V_p 是光栅 p 对应的电压, $a_i(T)$ 与 T 的关系可以用如下多项式拟合:

$$a_i(T) = \sum_{j=0}^M a_{ij} T^j, \quad (13)$$

式中 M 是正整数, a_{ij} 是系数。可以看出,一旦光栅对应的电压和温度已知,即可算出实际的布拉格波长,进而算出应变。

第二个实验中,将 G2 设置为应变传感光栅, G1 设置为温度参考光栅。考虑到有限的光栅数目, N 取 2。将先前实验冷却过程中获得的数据代入到(12)、(13)式得到拟合系数 a_{ij} 如表 2~表 6 所示。

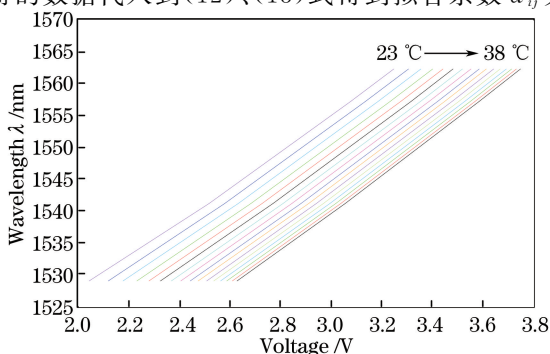


图 4 不同温度下检测电压与布拉格波长间的关系

Fig. 4 Relationship between detection voltages and Bragg wavelengths at different temperatures

表 2 $N=2, M=1$ 时多项式拟合系数 a_{ij} 的取值Table 2 Value of polynomial fitting coefficient a_{ij} while $N=2, M=1$

i	a_{i0}	a_{i1}
0	1519.400	-1.438
1	10.085	0.245
2	3.338	-0.046

表 3 $N=2, M=2$ 时多项式拟合系数 a_{ij} 的取值Table 3 Value of polynomial fitting coefficient a_{ij} while $N=2, M=2$

i	a_{i0}	a_{i1}	a_{i2}
0	1593.980	-6.674	0.089
1	-20.817	2.414	-0.037
2	8.988	-0.443	0.007

表 4 $N=2, M=3$ 时多项式拟合系数 a_{ij} 的取值Table 4 Value of polynomial fitting coefficient a_{ij} while $N=2, M=3$

i	a_{i0}	a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}
0	1837.500	-32.026	0.957	-0.009
1	-180.728	19.062	-0.607	0.006
2	37.280	-3.388	0.107	-0.001

表 5 $N=2, M=4$ 时多项式拟合系数 a_{ij} 的取值Table 5 Value of polynomial fitting coefficient a_{ij} while $N=2, M=4$

i	a_{i0}	a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}	a_{i4}
0	3130.350	-210.496	10.108	-0.216	0.002
1	-1032.860	136.694	-6.638	0.142	-0.001
2	188.574	-24.273	1.178	-0.025	0.001

表 6 $N=2, M=5$ 时多项式拟合系数 a_{ij} 的取值Table 6 Value of polynomial fitting coefficient a_{ij} while $N=2, M=5$

i	a_{i0}	a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}	a_{i4}	a_{i5}
0	9465.130	-1299.920	84.501	-2.737	0.044	0.000
1	-5482.610	901.942	-58.894	1.913	-0.031	0.000
2	977.502	-159.950	10.443	-0.339	0.005	0.000

下面进行实验来验证这些系数,为了避免出现尖锐的环境温度变化,将 FFP 滤波器加热到一个稳定的温度,然后让其自然冷却到室温,图 5(a)、(b)分别为滤波器表面温度和光栅对应的电压随冷却时间的变化曲线。

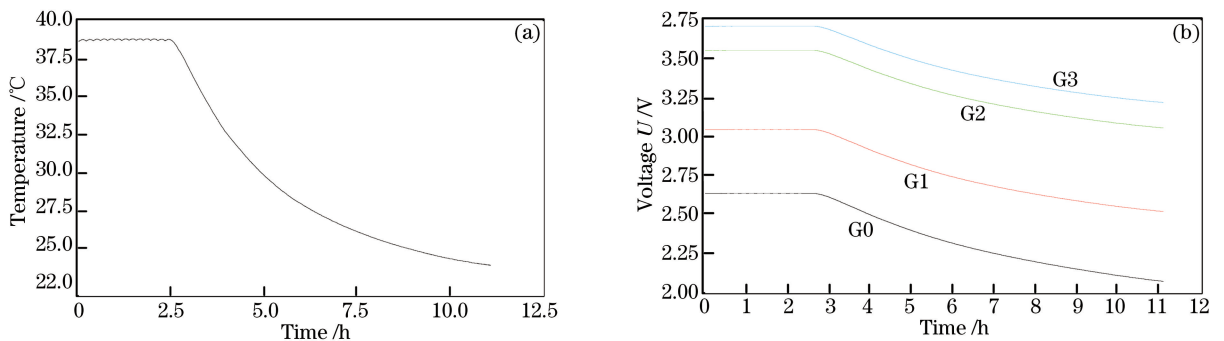


图 5 (a) 滤波器表面温度和(b)光栅对应的电压随时间变化曲线

Fig. 5 (a) Filter surface temperature curve and (b) grating corresponding, voltage with the change of time

将 FFP 滤波器加热到稳定温度,然后冷却至室温。FBGs 仍放置在水箱中。分别在有、无不同阶数的多项式拟合情况下,记录 G2 的应变传感结果和应变标准差随时间的变化,结果如图 6 所示。

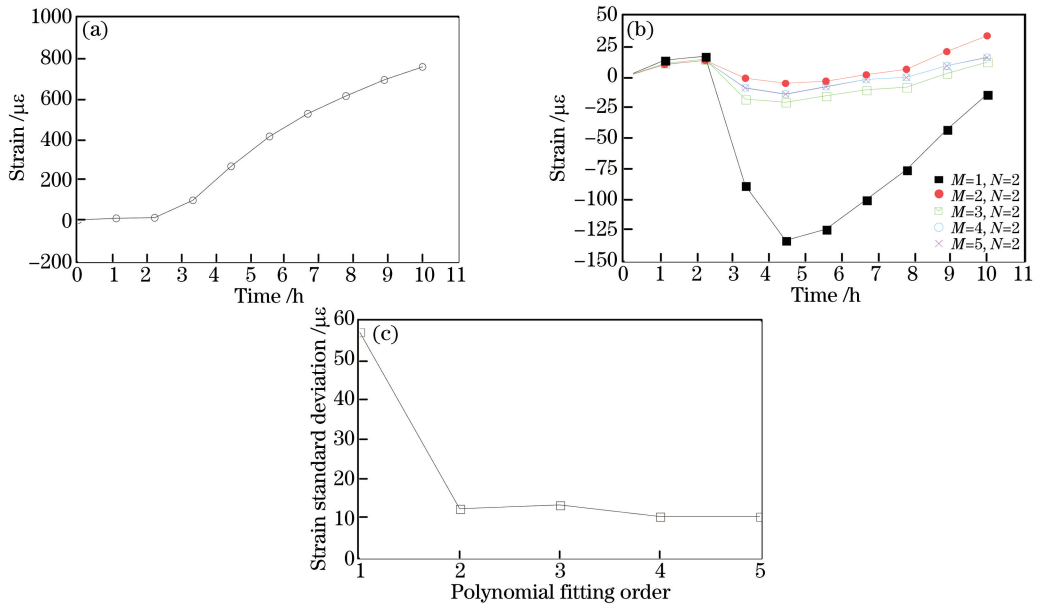


图 6 (a)无多项式拟合下和(b)有多项式拟合下的应力传感结果随时间的变化;(c)不同多项式拟合阶次下的应变标准偏差

Fig. 6 Strain sensing results (a) without and (b) with polynomial fitting change with time;

(c) strain standard deviation in different polynomial fitting orders

由于 G1 为温度补偿光栅,应变感应光栅 G2 检测到的应变应是稳定的,但 G2 的应变随着 FFP 滤波器环境温度的下降而增加,如图 6(a)所示。10 h 内,FFP 滤波器的环境温度从 39 $^{\circ}\text{C}$ 降低到 24 $^{\circ}\text{C}$ 时,G2 检测到的应变从 0 增加至 750 $\mu\epsilon$ 。实验结果表明,当 FFP 滤波器环境温度变化超过 15 $^{\circ}\text{C}$ 时,用 4 阶和 5 阶多项式拟合可以将应变精度从 750 $\mu\epsilon$ 降低到 15 $\mu\epsilon$ 。对 6 阶的高阶多项式拟合进行的研究显示,其对精度的改进效果可以忽略不计。

从上述实验结果分析可知,已知 FBG 的特征波长和实时 FFP 滤波器所处环境温度,热效应引起的 FFP 滤波器非线性可以通过多项式拟合消除长期测量系统的解调精度可以得到很大的改善。

4 结 论

基于 FBG 光纤传感系统对 PZT 驱动的 FFP 滤波器的热致非线性进行了研究和评估。从实验观察可知,FFP 的中心波长和 FSR 会随着温度的变化呈非线性变化。采用多项式拟合法消除非线性误差,当 PZT 驱动的 FFP 滤波器所处外界温度变化超过 15 $^{\circ}\text{C}$ 时,采用大于 4 阶的多项式拟合和一个参考光栅的方法,应变传感精度最小可降低到 15 $\mu\epsilon$,标准差可减小到 10 $\mu\epsilon$ 以下。此方法也可用于其他类型的可调谐光学滤波器的非线性研究。

参 考 文 献

- [1] Jang Junfeng, Yan Jinling, Wang Shuang, *et al.* Study on suppression filter scanning FBG demodulation in environmental temperature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1206001.
江俊峰, 闫金玲, 王 双, 等. 环境变温下 FBG 解调中滤波器扫描波动抑制研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1206001.
- [2] Wang Min, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an, *et al.* Research on signal demodulation technology of fiber Bragg grating sensor system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, 41(12): 54-58.
王 敏, 乔学光, 贾振安, 等. 光纤布拉格光栅传感系统信号解调技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, 41(12): 54-58.
- [3] Yu Youlong, Tan Ling, Li Qian, *et al.* Influence of thermal effect caused by piezoelectric transducer on interferometric demodulation for fiber Bragg grating sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0506005.
余有龙, 谭 玲, 李 茜, 等. 压电陶瓷发热对光纤光栅传感信号干涉解调的影响[J]. *光学学报*, 2014, 34(5):

0506005.

- [4] Wang Yongjun, Liu Yongchao, Sun Jingtao, *et al.* Interrogation technology for high-speed and high-resolution fiber Bragg gratings sensing system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205003.
王拥军, 刘永超, 孙靖涛, 等. 高速高分辨率光纤布拉格光栅传感系统的解调技术[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205003.
- [5] Liu K, Liu T, Jiang J, *et al.* Investigation of wavelength modulation and wavelength sweep techniques in intracavity fiber laser for gas detection[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(1): 15-21.
- [6] Liu K, Jing W C, Peng G D, *et al.* Investigation of PZT driven tunable optical filter nonlinearity using FBG optical fiber sensing system[J]. Optics Communications, 2008, 281(12): 3286-3290.
- [7] Qi H B, Wei S H, Wei C. Design and experimental research of a high-precision wavelength controller for tunable fiber Fabry-Perot filters[J]. Optoelectronics Letters, 2013, 9(2): 101-104.
- [8] Ding H, Wu X, Liang J, *et al.* Online calibration of PZT driven fiber Fabry-Perot filter nonlinearity using FBG array and PSO algorithm[J]. Measurement, 2009, 42(7): 1059-1064.
- [9] Kallapur A G, Boyson T K, Petersen I R, *et al.* Low pass filter model-based offline estimation of ring-down time for an experimental Fabry-Perot optical cavity[C]. IEEE International Conference on Control Applications, 2012: 75-79.
- [10] Sheng W J, Liu Yang, Peng G D. An optimized demodulation method for fiber F-P tunable filter based on parallel operation and AC-DC method[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2014, 25(3): 429-434.
盛文娟, Liu Yang, Peng G D. 基于并行处理和 AC-DC 修正的可调光滤波器解调技术研究[J]. 光电子 • 激光, 2014, 25(3): 429-434.
- [11] Nicolai M, Uhlig S, Schönecker A, *et al.* Experimental investigation of non-linear behaviour of PZT piezoceramics at low temperatures[J]. Advances in Science & Technology, 2008, 56: 105-110.
- [12] Burianova L, Hana P, Pustka M, *et al.* Non-linear properties of PZT ceramics in the wide temperature range[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2005, 25(12): 2405-2409.
- [13] Zhou H M, Cui X L. Static magnetoelectric coupling of magnetoelectric laminated composites under combined temperature and stress loadings[J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(8): 083905.
- [14] Charlot B, Coudouel D, Very F, *et al.* Droplet generation for thermal transient stimulation of pyroelectric PZT element [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2015, 225: 103-110.
- [15] Wang Peng, Zhao Hong, Liu Jie, *et al.* Dynamic real time calibration method for FBG wavelength demodulation system based on tunable F-P filter[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0806006.
王 鹏, 赵 洪, 刘 杰, 等. 基于可调谐 F-P 滤波器的 FBG 波长解调系统的动态实时校准方法[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0806006.
- [16] Yin Yu, Yu Zhenhong. Optimization of optical clock recovery performance based on F-P cavity with fiber Bragg grating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 110602.
殷 宇, 余震虹. 光纤光栅对基于 F-P 腔全光时钟恢复性能的优化[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 110602.
- [17] Sun Shihui, Yu Youlong, Li Hui, *et al.* Research on stress wave detection technology 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.