

doi:10.3788/gzxb20164506.0606001

# 基于扫描激光器的边孔光纤光栅温度 压力传感系统

杨韞铎, 康娟, 徐贵, 周鹏威, 裘燕青, 李裔

(中国计量学院 光学与电子科技学院, 杭州 310018)

**摘 要:** 研究了一种基于波长扫描激光器的光纤温度压力测量系统. 光纤传感头为边孔光纤光栅, 利用其特有的双折射特性产生双反射峰, 以实现对温度和压力的同时测量. 系统采用嵌入式开发技术, 将激光波长扫描、光谱数据采集和以牛顿最小二乘法为核心的光栅解调算法高度整合于一体, 极大降低了光纤传感系统的体积与成本. 实验结果表明, 在温度 10~50℃、压力 0~1.2 MPa 时, 双反射峰对应温度与压力的变化均呈现良好的线性响应特性; 系统的波长解调准确度可达 1 pm, 温度及压力的分辨率分别达到 0.1℃ 和 0.1 MPa. 该系统可为温度、压力的参量测量提供低成本、小型化、性能可靠的解决方案.

**关键词:** 光纤传感; 温度压力测量; 光纤光栅; 边孔光纤; 扫描激光器; 嵌入式系统; 寻峰算法

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)06-0606001-6

## Temperature and Pressure Sensing System of Side Hole Fiber Grating Based on Scanning Laser

YANG Yun-duo, KANG Juan, XU Ben, ZHOU Peng-wei, QIU Yan-qing, LI Yi

(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** An optical fiber temperature and pressure simultaneous measurement system based on wavelength scanning laser was proposed. The fiber optic sensor head is fiber Bragg gratings based on side hole polarization maintaining fibers. Taking use of its unique double reflection peaks arising from birefringence, simultaneous measurement of temperature and pressure can be achieved. Embedded technology was applied in the system. The controls of laser wavelength scanning, acquisitions of spectral data and the data demodulations based on Newton least squares fitting algorithm, were highly integrated in one system, greatly reducing the size and cost of the fiber optic sensing system. Experimental results show that the double reflection peaks correspond to changes in temperature and pressure with a good linear characteristics, in the temperature range of 10~50℃ and the pressure range of 0~1.2 MPa. The wavelength demodulation accuracy of the system is up to 1 pm, corresponding to the resolution of temperature and pressure is up to 0.1℃ and 0.1 MPa, respectively. The proposed system can provide a low cost, small size, reliable system solutions to the simultaneous measurements of temperature and pressure.

**Key words:** Fiber optic sensors; Temperature and pressure sensing; Fiber Bragg grating; Side hole fiber; Wavelength scanning laser; Embedded systems; Peak-detection algorithm

**OCIS Codes:** 060.2300; 060.2370; 060.3735; 060.3510

**基金项目:** 国家自然科学基金(Nos. 61505194, 61405184, 61505192)、浙江省自然科学基金(No. LY16F050006)和浙江省大学生科技创新活动计划(No. 2015R409045)资助

**第一作者:** 杨韞铎(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感技术. Email: S1404080316@cjlu.edu.cn

**导师(通讯作者):** 李裔(1977-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光电、光谱精密测量及光纤传感器. Email: yli@cjlu.edu.cn

**收稿日期:** 2016-01-18; **录用日期:** 2016-03-09

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)由于其具有抗电磁干扰、耐腐蚀、电绝缘、高灵敏度和低成本等优点,被广泛应用于油气勘探、建筑结构监测、交通运输等领域<sup>[1-4]</sup>. 利用 FBG 进行双参量或多参量测量也是该领域的一个热点问题. 温度和压力是油气资源开发中的基本油藏工程参量,实时、高准确度测量对于确定油层位置、厚度、含水层的深度以及油气井的安全都具有十分重要的意义<sup>[5]</sup>.

国内外学者针对 FBG 的温度和压力特性进行了全面研究,提出多种 FBG 的双参量测量方案,如采用双光纤光栅相互配合的测量方案<sup>[6]</sup>、基于双三角形悬臂梁结构对温度和压力不同应变特性的光纤光栅测量方案<sup>[7]</sup>、利用双周期光纤光栅对应变和温度敏感差异性的测量方案<sup>[8]</sup>以及基于熊猫光纤两个偏振态特性的光纤光栅测量方案<sup>[9]</sup>. 这些方案或是需要多个光纤光栅相互配合使用,或是光纤结构较为复杂,制作和粘贴工艺要求相对较高,而且都存在着一个共同的缺点,即依赖于宽带光源、光谱仪等大型仪器设备. 而很多研究应用领域都需要一种小型化、低成本、使用灵活方便且能实时、快速、直观地获取测量参量的系统仪器. 因此这些方案仅适用于实验研究,难以广泛应用于实际工业生产领域. 为此,本文设计并制作了一种能够对温度和压力进行双参量同时测量的小型化传感系统. 系统采用嵌入式开发技术,集成化程度高;同时利用边孔光纤光栅双折射特性产生的双反射峰,实现对温度和压力双参量的同时测量. 系统具有体积小、成本低、分辨率高、使用方便、抗干扰能力强、易于复用等优点.

## 1 系统结构及工作原理

边孔光纤光栅温度压力传感系统如图 1,由嵌入式系统、波长扫描激光器模块、信号转换、采集模块和光纤传感模块五部分组成. 工作原理为:由嵌入式系统控制波长扫描激光器以波长间隔为 1 pm、时间间隔为 1 ms 进行逐点扫描,扫描激光器发出的光进入 3 dB 耦合器(Coupler),沿单模光纤进入边孔光纤光栅,由边孔光纤光栅的双折射特性产生的双反射峰再经 3 dB 耦合器(Coupler)进入光电转换模块,光信号转换为电信号. 波长扫描激光器每发出一个波长的光后,嵌入式系统控制模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)完成一次数据采样及转换工作,并将转换结果依次存储于嵌入式系统当中. 当一次扫描过程完成后,即可得到一组边孔光纤光栅反射光谱的数据(功率值). 利用牛顿最小二乘拟合算法完成对双反射峰中心波长的拟合计算,并根据双反射峰的峰值和间距,实现对温度和压力的测量.

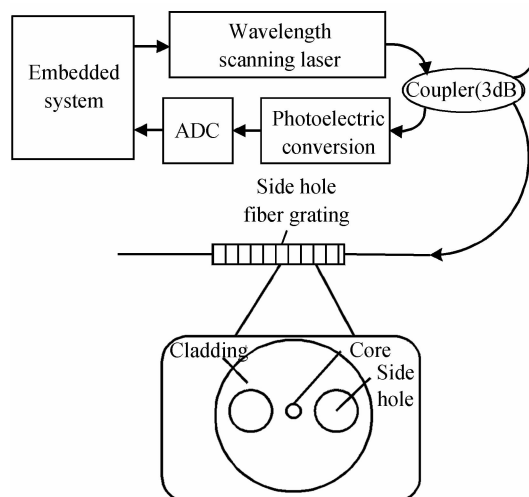


图 1 边孔光纤光栅温度压力传感系统结构框图  
Fig. 1 Block diagram of the side hole fiber grating temperature and pressure sensing system

### 1.1 边孔光纤光栅温度压力传感器

边孔光纤是一种特殊结构光纤,它的纤芯两侧有两个以纤芯为中心对称的空腔孔洞<sup>[10]</sup>,其横截面示意图与剖面图分别如图 2(a)、(b).

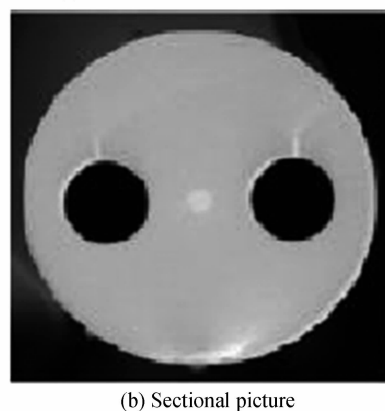
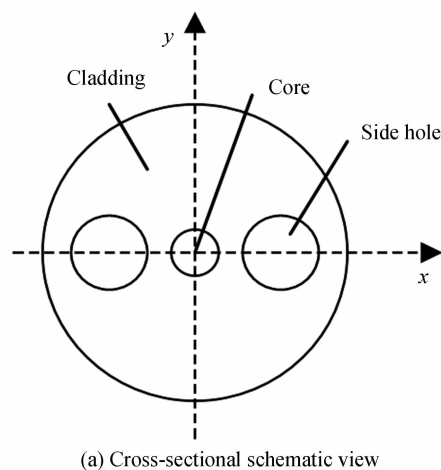


图 2 边孔光纤结构

Fig. 2 The structure of the side hole fiber

由于边孔光纤结构的非对称性,在拉丝过程中会产生一定的残余应力,使得边孔光纤具有一定的双折射特性,并在光纤内部形成一对正交双折射轴<sup>[11]</sup>. 因

此,光源发出的光经边孔光纤光栅反射后,其反射光谱中会形成满足布喇格条件的两个反射峰,它们的偏振态相互正交<sup>[12]</sup>.

由于边孔光纤的特殊结构,不同偏振方向上的两个反射峰有着不同的温度和压力响应特性<sup>[13]</sup>.当光纤温度变化时,由于光纤材料在两个偏振方向上的热膨胀系数一致,所以双反射峰具有相同的温度特性,从而发生同向、同步的漂移,因此双峰间距几乎不受温度影响.而当光纤所受压力变化时,由于光纤几何结构的不对称性和内部感受应力的不同,所以双反射峰将会发生不同程度的漂移,即双峰间距将随压力的不同而发生变化.本系统正是利用了边孔光纤光栅的这种双折射特性,通过测量双反射峰峰值的漂移量和双峰间距的变化量实现对温度和压力参数的同时测量.

### 1.2 硬件系统设计

边孔光纤光栅温度压力传感系统的硬件部分主要包括嵌入式系统、波长扫描激光器、光电转换、模数转换、通信模块等,系统硬件实物图如图3.其中嵌入式系统采用了意法半导体推出的基于ARM Cortex-M4内核的STM32F4系列高性能微控制器,其采用了90nm的非易失性存储器(Non-Volatile Memory, NVM)工艺和自适应实时存储器加速器(Adaptive Real-Time Memory Accelerator, ART),内部集成了全新的数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)和浮点运算单元(Float Point Unit, FPU)指令,具有很高的算法执行速度和代码效率,同时搭载了最新的UCOSIII实时操作系统,实现了硬件资源的统一管理,控制所有任务协调、一致运行.波长扫描激光器模块作为系统光源,扫描范围为1525~1565nm,达到40nm,扫描准确度

为1pm,每秒钟可实现1000个波长点的扫描;ADC则采用16位1MHz的高速精密模数转换器;通信模块可通过USB、串口、网口等方式将测量结果对外输出.

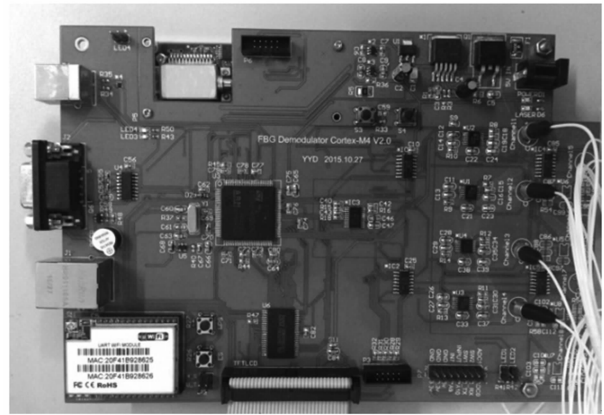


图3 系统硬件实物图

Fig. 3 Physical diagram of system hardware

光电转换模块的性能不仅影响光信号的转换质量,而且直接决定最终测量数据的准确度.与线性放大器相比,对数放大器具有更大的动态测量范围,更高的测量准确度,因此本系统将采用AD8304对数放大器.AD8304专门针对光纤系统中低频信号的光功率测量进行了优化,采用先进的跨导线性技术,拥有专门的光电二极管接口,内部集成了温度补偿电路,动态测量范围可达80dB以上<sup>[14]</sup>.其输出电压值 $V_{out}$ 和被测光功率值 $P$ 的关系为

$$P = K_1 V_{out} + C_1 \quad (1)$$

式中, $K_1$ 和 $C_1$ 可视为常量,因此输出电压 $V_{out}$ 和被测光功率 $P$ (单位:dBm)为线性关系,具体电路原理图如图4.

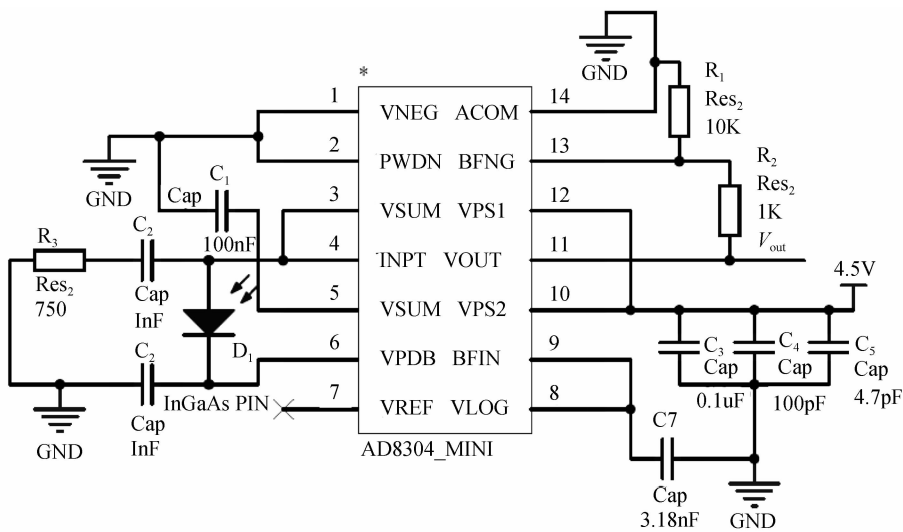


图4 AD8304对数放大电路原理

Fig. 4 AD8304 logarithmic amplification circuit schematic

### 1.3 峰值拟合算法

目前比较主流的光纤光栅峰值拟合算法有一般多

项式拟合、傅里叶变换、牛顿最小二乘法拟合等<sup>[15-16]</sup>.

一般多项式拟合能够有效利用的数据很少,其结果不

具有通用性和说服力;傅里叶变换算法运算量极大,难以移植于嵌入式系统;而牛顿最小二乘拟合算法公式简单、运算量适中,且拟合效果理想.因此系统采用牛顿最小二乘拟合算法作为光栅解调的核心算法,将其移植于嵌入式系统中可实现峰值拟合的独立运算,摆脱对计算机等大型运算设备的依赖,促进光纤传感系统向小型化方向的发展.

牛顿最小二乘拟合算法是先对波形数据根据高斯(Gauss)函数进行多项式变换,然后采用一般多项式拟合算法的原理得到所求的峰值.

光纤光栅的反射谱线可近似地用高斯函数来表示,即

$$I(\lambda) = A_0 \exp \left[ - \left( \frac{\lambda - \lambda_s}{\Delta\lambda_s} \right)^2 \right] + C_0 \quad (2)$$

式中,  $\lambda_s$  表示与反射谱线功率最大时所对应的波长值(即中心波长).只要解出光纤光栅反射谱线的高斯函数表达式,就能够求出反射谱线的中心波长值.

将反射谱线函数进行线性回归,对式(2)两边取对数得

$$\ln I(\lambda) = - \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda_s} + \frac{2\lambda_s\lambda}{\Delta\lambda_s} + \left( \ln A_0 - \frac{\lambda_s^2}{\Delta\lambda_s} \right) \quad (3)$$

令

$$\begin{cases} y_i = \ln I(\lambda_i) \\ a = -\frac{1}{\Delta\lambda_s} \\ b = \frac{2\lambda_s}{\Delta\lambda_s} \\ c = \ln A_0 - \frac{\lambda_s^2}{\Delta\lambda_s} \end{cases} \quad (4)$$

利用一般多项式拟合原理,可求得  $a$ 、 $b$  的值,并代入到式(5)中,即可得到对应反射谱线的中心波长值  $\lambda_s$ ,即

$$\lambda_s = - \frac{b}{2a} \quad (5)$$

根据牛顿最小二乘拟合算法,代入一组反射光谱的采样数据(功率值)及对应波长值,通过计算得出  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的值,即可求得式(2)中的相关参量.

图5为双反射峰的拟合曲线图,其中  $x$  方向的拟合公式为

$$I_x(\lambda_x) = 28.60457 \cdot \exp \left[ -2 \times \left( \frac{\lambda_x - 1543.62726}{0.42352} \right)^2 \right] - 41.99757$$

$y$  方向的拟合公式为

$$I_y(\lambda_y) = 29.05882 \cdot \exp \left[ -2 \times \left( \frac{\lambda_y - 1549.7205}{0.51206} \right)^2 \right] - 39.52682$$

相关指数分别为  $R_x^2 = 0.9256$ ,  $R_y^2 = 0.90673$ ,  $x$  和  $y$  方向反射峰的中心波长分别为 1 543.6272 6 nm 和 1 549.720 5 nm,准确度可达 1 pm,拟合效果理想.

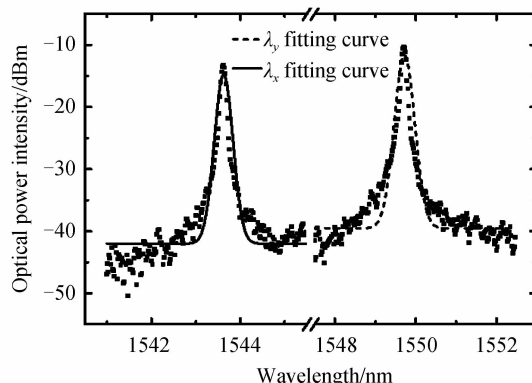


图5 双反射峰拟合曲线

Fig. 5 Double reflection peak fitting graph

当波长扫描激光器完成一次波长扫描后,根据ADC的采样值即可得到一组反射光谱的功率数据,同时对应每个扫描点的波长值也预先存储于嵌入式系统中.将光谱数据(功率值与波长值)代入牛顿最小二乘拟合算法,即可完成对反射峰的峰值拟合,具体流程如图6.首先从采样数据(功率值)的第一个点开始寻峰,当存在两组分布于阈值两侧的相邻点(即一点大于阈值、另一点小于阈值)时,即认为存在一个反射峰,并在该区间内确定最大值的位置,然后将最大值左右各1500个点的采样值与波长值代入牛顿最小二乘拟合算法,计算得出反射峰的中心波长.当完成一次峰值拟合后,从上一次确定区间的末端继续进行寻峰,重复上述过程,直至采样点查找完毕,从而实现多反射峰的峰值拟合.

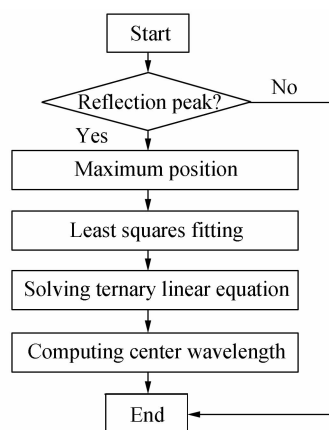


图6 牛顿最小二乘拟合算法程序流程

Fig. 6 Least squares fitting algorithm program flowchart

## 2 实验及结果分析

对边孔光纤光栅温度压力传感系统的温度、压力测量性能进行了相关实验.

### 2.1 温度测量

将边孔光纤光栅放置于温控箱中,测量温度范围为 10~50℃.图7为边孔光纤光栅在不同温度时刻的反射谱,图8为双反射峰中心波长数值随温度变化的

线性拟合曲线.通过图7可以看出,当温度变化时,双峰同时向同方向漂移,由图8可以进一步得出,双峰峰值与温度的线性度  $R^2$  为 0.998,双反射峰的温度灵敏度分别为

$$\frac{\Delta(\lambda'_x - \lambda_x)}{\Delta P} = 9.552 \text{ pm}/^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta(\lambda'_y - \lambda_y)}{\Delta P} = 9.473 \text{ pm}/^\circ\text{C}$$

可见双峰间距随温度变化的灵敏系数为  $\alpha = 0.079 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,由于系统拟合准确度为 1 pm,因此当温度变化不大时,即温度对双峰间距的影响小于系统误差时,可以认为双反射峰的中心波长随温度是线性变化的,而双峰间距几乎不随温度变化.

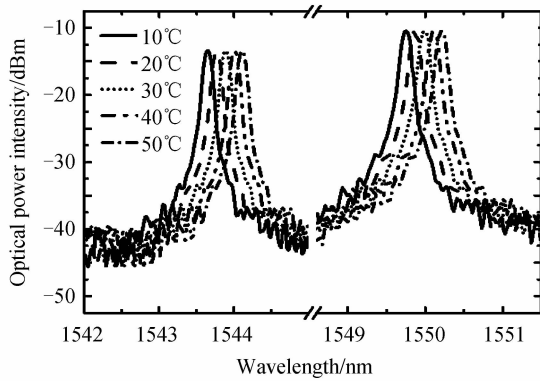


图7 不同温度时边孔光纤光栅的反射谱  
Fig.7 Reflection spectra of side hole fiber grating at different temperatures

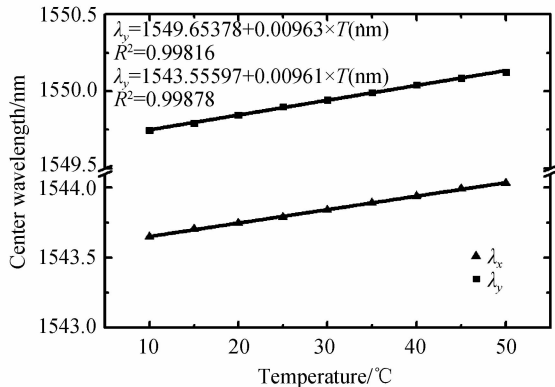


图8 温度特性的线性拟合曲线  
Fig.8 Linear fitting curve of temperature characteristic

## 2.2 压力测量

将边孔光纤光栅放置于压力测试系统中,压力的测试范围为 0~1.2 MPa,图9为边孔光纤光栅在不同压力时刻的反射谱,图10为双峰间距随压力变化的线性拟合曲线.通过图9可以看出,当压力变化时, $x$ 偏振方向的中心波长漂移量明显大于 $y$ 偏振方向.实验过程中, $y$ 方向反射峰的中心波长变化量仅有 0.8 pm/MPa(在误差范围内等于未发生变化).由图10可以进一步看出双峰间距与压力成良好的线性关系,其线性

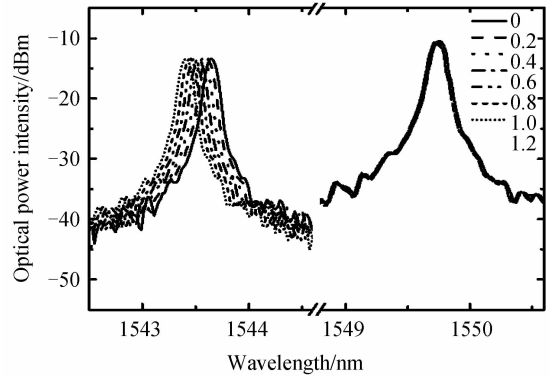


图9 不同压力时边孔光纤光栅的反射谱  
Fig.9 Reflection spectra of side hole fiber grating at different pressures

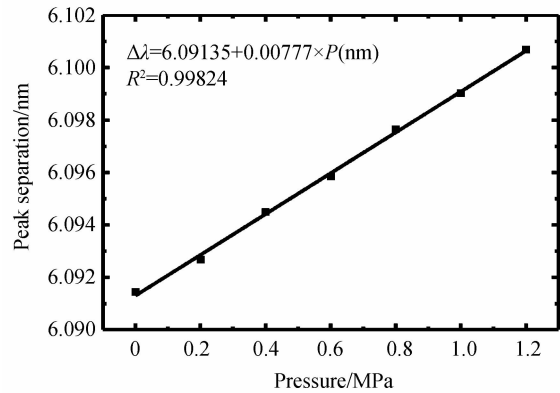


图10 双峰间距随压力的线性拟合曲线  
Fig.10 Linear fitting curve of double reflection peak gap with pressure

度  $R^2$  为 0.998 24.双峰间距随压力变化的灵敏系数为

$$\frac{\Delta(\lambda_y - \lambda_x)}{\Delta P} = 7.67 \text{ pm}/\text{MPa}$$

## 3 结论

设计并制作了一种基于波长扫描激光器的温度压力传感系统,利用边孔光纤光栅双折射特性产生双反射峰,通过测量双峰峰值和双峰间距,实现了对温度压力参量的同时测量,分辨率分别达到 0.1°C 和 0.1 MPa.该系统不仅具有分辨率高、探测动态范围大、解调速度快等优点,同时集成化程度高,可实现光纤传感系统的小型化.

### 参考文献

- [1] MENG Ling, JIANG Ming-shun, SUI Qing-mei, et al. Optical fiber grating temperature and pressure sensors in oil well measuring[J]. *Optical Communication Technology*, 2008, **32** (11): 29-32.  
孟玲,姜明顺,隋青美,等.石油测井光纤光栅温度压力传感器[J]. *光通信技术*, 2008, **32**(11):29-32.
- [2] MICHAEL H, REN L, LI H N, et al. A fiber Bragg grating sensor for detection of liquid water in concrete structures[J]. *Smart Materials & Structures*, 2013, **22**(5): 1307-1312.
- [3] WU Yong-hong, SHAO Chang-jiang, QU Wen-jun, et al.

- Study on FBG strain sensor for application to large engineering long term health monitoring[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(4): 481-484.
- 吴永红, 邵长江, 屈文俊, 等. 大型工程长期健康监测用 FBG 应变传感器的研究[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(4):481-484.
- [4] RAMLY R, KUNTJORO W, RAHMAN M K A. Using embedded Fiber Bragg Grating (FBG) sensors in smart aircraft structure materials[J]. *Procedia Engineering*, 2012, **41**(12): 600-606.
- [5] ZHANG Xiang-dong, LI Yu-lin, PENG Wen-da, *et al.* Pressure and temperature measurement system based on EFPI combined with FBG for oil and gas down-hole[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 864-867.
- 张向东, 李育林, 彭文达, 等. 光纤复合型油气井下压力温度测量系统[J]. *光子学报*, 2003, **32**(7):864-867.
- [6] QIAO Xue-guang, CHEN Yi, JIA Zhen-an. Study on simultaneous discriminating measurement of temperature and pressure based on dual FBG[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(1): 12-14.
- 乔学光, 陈懿, 贾振安. 基于双光纤光栅温度压力同时区分测量的研究[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(1):12-14.
- [7] ZHANG Jing-long, YU Chong-xiu, WANG Kui-ru, *et al.* A fiber grating dual-parameter sensor of ditrignon cantilever beam for measurement of strain and temperature[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 770-774.
- 张锦龙, 余重秀, 王葵如, 等. 双三角形结构的光纤光栅压力和温度双参量传感器[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4):770-774.
- [8] WANG Mu-guang, WEI Huai, TONG Zhi, *et al.* Simultaneous measurement of strain and temperature using a single dual-period fiber grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **22**(7): 867-869.
- 王目光, 魏淮, 童治, 等. 利用双周期光纤光栅实现应变和温度同时测量[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7):867-869.
- [9] WANG Wei, MENG Zhou, YANG Hua-yong. Temperature and pressure sensing characteristics on panda polarization-maintaining fiber bragg grating[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, **5**(2): 35-38.
- 王伟, 孟洲, 杨华勇. 熊猫型保偏光纤光栅温度和压力传感特性的实验研究[J]. *光学与光电技术*, 2007, **5**(2):35-38.
- [10] LI Zhi-zhong, SUN Chong-feng, HU Yong-ming, *et al.* Study on the birefringence of the circular-core side hole fiber [J]. *Advanced Sensor Systems & Applications II*, 2005, **5634**(02): 474-480.
- [11] SUN Chong-feng, YI Zhi-zhong, HU Yong-ming, *et al.* A side hole fiber grating peak separation measurement scheme based on polarization detection [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(2): 139-142.
- 孙崇峰, 李智忠, 胡永明, 等. 基于偏振检测的边孔光纤光栅双峰间距的测量[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(2):139-142.
- [12] LEE S H, KIM B H, HAN W T. Effect of filler metals on the temperature sensitivity of side-hole fiber [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(12): 9712-9717.
- [13] LI Zhi-zhong, LUO Hong, Yang Hua-yong, *et al.* Side-hole fiber grating sensing characteristics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(8): 1081-1086.
- 李智忠, 罗洪, 杨华勇, 等. 边孔光纤光栅的传感特性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8):1081-1086.
- [14] YANG Fa-hong, ZHANG Xiao-mei, LUAN Bao-kuan. Characteristic study and simulation analysis of the logarithmic amplifier[J]. *Modern Electronics Technique*, 2008, **31**(3): 182-184.
- 杨法红, 章小梅, 栾宝宽. 对数放大器特性研究与应用分析[J]. *现代电子技术*, 2008, **31**(3):182-184.
- [15] CHEN Zhi-jun, BAI Jian, WU Zu-tang, *et al.* Optimization and comparison of the peak-detection algorithms for the reflection spectrum of fiber bragg grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(11): 83-88.
- 陈志军, 白剑, 吴祖堂, 等. 光纤布喇格光栅反射谱寻峰算法优化及比较[J]. *光子学报*, 2015, **44**(11):83-88.
- [16] LAMBERTI A, VANLANDUIT S, PAUW B D, *et al.* A novel fast phase correlation algorithm for peak wavelength detection of fiber Bragg grating sensors[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(22):7099-7112.