

基于衍射解调的新型光纤光栅高温传感网络

庞丹丹¹ 隋青美¹ 姜明顺^{1,2}

(¹山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)
²兖矿集团有限公司, 山东 邹城 273500)

摘要 基于光纤布拉格光栅(FBG)高温传感特性,设计了一种基于波长调制的耐高温光纤光栅传感网络。系统设计了一种新型封装结构的耐高温光栅传感头。并针对传统 FBG 传感网络结构可靠性低的缺点,设计了一种高可靠分布式传感网络结构。采用 InGaAs 图像传感衍射解调技术对光反射波长进行解调。20~290 °C 范围测试实验表明,所设计的传感网络温度响应曲线平均线性度达 0.9991,灵敏度为 0.0258 nm/°C,测量精度达±0.6 °C,响应时间小于 16 s,稳定性高,适用于实际工作环境中的高温测量。

关键词 光栅;光纤布拉格光栅;高温;分布式传感网络;封装;解调

中图分类号 TN253;TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1105005

New Fiber Bragg Grating High Temperature Sensing Network Based on Diffraction Demodulation

Pang Dandan¹ Sui Qingmei¹ Jiang Mingshun^{1,2}

(¹College of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)
²Yanzhou Coal Mining Group Co. Ltd., Zoucheng, Shandong 273500, China)

Abstract A high temperature fiber Bragg grating (FBG) sensing network based on wavelength modulation is highly developed on the basis of FBG high temperature sensing characters. A new packaged high temperature FBG sensor head is designed in this system. A high reliable distributed sensing network structure is also proposed to overcome the low reliability of the traditional FBG sensing network. Diffraction technique based on InGaAs image sensing is used to demodulate reflected wavelength. The results show that the average goodness-of-fit of sensing system's temperature curve is 0.9991, the sensitivity is 0.0258 nm/°C, the accuracy is ±0.6 °C and the response time is less than 16 s. Moreover, the sensing network is steady enough for high temperature measurement.

Key words gratings; fiber Bragg grating; high temperature; distributed sensing network; package; demodulation

OCIS codes 060.1155; 060.2310; 060.2370

1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)温度传感网络在高温、强磁场等恶劣环境中有着广阔的应用前景。它的探头和仪表分离,能够在恶劣环境中进行非接触、远距离以及分布式测量,环境适应能力强,并且 FBG 本身具有质量轻、体积小、耐腐蚀、抗电磁干扰和易于实现分布测量等优点^[1],能精确、快速地实现对温度

的实时在线测量。

FBG 温度传感网络的实用化研究一直是国内外研究的热点^[2,3],以下几大难点更是备受关注。当温度高于 100 °C 时,实际工程应用中采用的耐高温 FBG,中心波长与温度变化量呈非线性关系且固有灵敏度低^[4],因此需对光栅进行特殊封装,以提高其在高温段响应线性度及灵敏度;FBG 温度传感网

收稿日期: 2011-06-06; **收到修改稿日期**: 2011-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(61074163)和山东大学自主创新基金(2010GN066)资助课题。

作者简介: 庞丹丹(1986—),女,博士研究生,主要从事光纤传感、光纤通信和光电子技术等方面的研究。

E-mail: pangdan58@163.com

导师简介: 隋青美(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事检测理论及应用和光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: qmsui@sdu.edu.cn

络通常采用分布式结构铺设在监测环境中,传统分布式结构直接将不同波长的 FBG 传感器串联在一起,当网络某处发生损坏时,其后面传感器都会失效,随着 FBG 传感网络应用广泛化,其可靠性越来越受到关注^[5,6];FBG 传感网络的解调技术一直是研究难点^[7~9];匹配光栅滤波法测量范围窄,制作要求高;CCD 解调法由于分辨率低且波谱范围在 400 至 1100 nm,不适合光纤光栅传感解调;目前最常用的法布里-珀罗解调系统虽精度高,但解调速度慢,体积大,且不能进行实地监测。

针对上述研究难点,本文提出了一种新型耐高温 FBG 传感网络。系统采用基于 FBG 高温传感特性设计的新型耐高温布拉格光栅传感头为传感元件,利用光开关且基于全同光栅技术设计了高可靠传感网络拓扑结构,并采用 InGaAs 图像传感衍射解调系统对反射波长进行解调。对该传感网络系统进行温度响应各特性实验测试,结果显示该系统具有可靠性高、线性度好、灵敏度高、响应速度快、精度高及稳定性好等优点,适用于高温安全监测。

2 传感网络原理与设计

2.1 FBG 高温传感原理及新型封装设计

外界温度变化会影响光纤光栅的折射率调制周期和纤芯折射率,从而引起光纤光栅反射峰波长变化,温度是光纤光栅能够直接传感测量的最基本物理量之一。

对于裸光栅,中心波长随温度的变化^[10]可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \beta)\Delta T, \quad (1)$$

式中 α 的表达式为 $\frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{\partial \Lambda}{\partial T}$, 代表光纤的热膨胀系数,

描述光栅的栅距随温度变化的关系; β 的表达式为

$$\frac{1}{n_{\text{eff}}} \cdot \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T},$$

代表光纤材料的热光系数,描述光纤折射率随温度变化的关系。光纤热膨胀系数 α 与热光系数 β 之和即为温度灵敏度系数。

由文献^[11]知,温度灵敏度系数随温度升高缓慢增大,当温度高于 100 °C 时,布拉格光栅中心波长随温度变化呈非线性关系,需对中心波长与温度变化量进行高阶拟合,增加了高温段温度测量难度。由高温段波长相对漂移公式^[12]知,光栅封装后,封装材料热膨胀系数越大,越能有效地提高高温段响应线性度。

若将 FBG 封装于热膨胀系数为 α_f 的材料中,

温度变化时封装材料的热膨胀会使光纤发生应变,使光栅波长发生变化,提高光栅温度灵敏度。封装后的 FBG 中心波长随温度变化为^[13]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = [\alpha + \beta + (1 - P_c)(\alpha_f - \alpha)]\Delta T, \quad (2)$$

式中 $(1 - P_c)(\alpha_f - \alpha)$ 为封装材料受到温度调制后使光栅产生应变而增加的温度灵敏度系数。

基于上述原理,设计了新型封装的耐高温布拉格光栅传感头,传感头结构如图 1 所示,表面涂覆层为聚酰亚胺的耐高温布拉格光栅封装在内径 2 mm,管壁厚 0.5 mm,长 5 cm 的细铜管中,在细铜管两端采用聚合胶进行密封,相比传统的将聚合胶均匀密封于封装结构中的方法,可以避免聚合胶对光栅的影响,提高传感器的稳定性。铜管两侧套有螺丝管帽,保护内部聚合胶及光栅,光栅两端光纤通过管帽中心小孔穿出,制作简单。该封装结构使用热膨胀系数高的细铜管,增加了灵敏度,在高温段响应线性度好且易于安装。

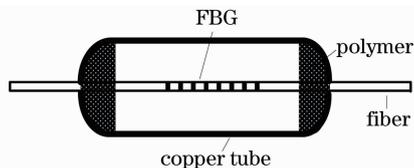


图 1 耐高温 FBG 传感头

Fig. 1 Structure of high temperature FBG sensor head

2.2 传感系统组成及网络结构设计

耐高温光纤光栅传感系统原理图如图 2 所示,主要由放大自发辐射光源(ASE)、耐高温 FBG 传感阵列、InGaAs 图像传感衍射解调系统和计算机(PC)显示系统组成。

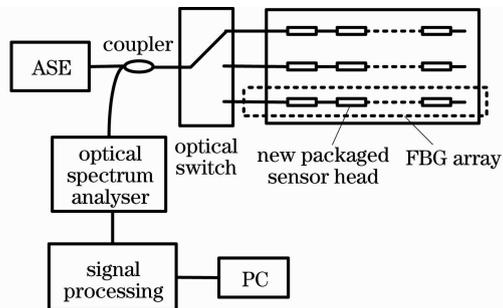


图 2 耐高温 FBG 传感系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of high temperature FBG sensing system

系统选用了 ASE 做为宽带光源,光源平坦度为 ± 1 dB,工作范围为 1525~1565 nm,光谱带宽覆盖了实验所需的波长变化范围。从宽带光源发出的光经光纤耦合器、光开关后沿光纤进入耐高温 FBG 传

感阵列,该阵列由多个不同中心波长的新型封装布拉格光栅传感头组成,包含被测量信息的反射光通过耦合器进入 InGaAs 图像传感衍射解调系统,对反射光进行解调得到各个传感头的中心波长并输入到计算机中。

在实际应用中,FBG 传感阵列通常铺设在地下或管道中^[14],难以维修及更换;且传感阵列有多个传感头串联在一起,单个传感头失效,易造成传感网络局部瘫痪。为提高传感网络可靠性,利用光开关且基于全同光栅技术设计了一种高可靠耐高温 FBG 传感阵列,阵列中一个通道的结构如图 3 所示(图 2 虚线框放大图)。

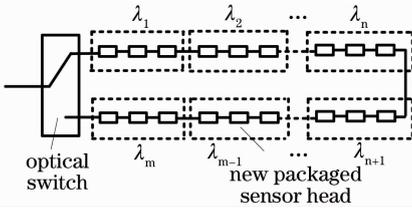


图 3 耐高温 FBG 传感阵列结构局部图

Fig. 3 Structure of high temperature FBG sensing array

光通过总光开关后进入传感阵列,该网络结构通过在传感阵列的每个通道加入 1×2 光开关使每个通道变为环路,每个光开关的切换时间小于 1 s,由图 3 可知,当传感阵列中传感头或传感光纤故障时,该结构可以利用切换光开关向未失效的传感头提供新的信号传输通道,尤其当传感阵列中仅存在一段传感光纤发生故障时,该结构可以使所有传感头正常工作,有效地降低传感网络瘫痪率,提高网络可靠性。

假设 20 m 温度监测范围内,每 2 m 为一个测量区域,传统测量方法在每个测量区域内放置一个不同波长 FBG,每个 FBG 监测范围为 2 m,测量可靠性低。如图 3 所示,新网络结构利用全同光栅技术,在一条光纤通道上将 3 个中心波长 λ_i 及材料特性完全相同的 FBG 作为一组,测量一个小区域的温度。同样 20 m 监测范围内,每 2 m 测量区域内放置 3 个全同光栅,每个 FBG 监测范围为传统测量方法的三分之一,测量可靠性明显提高。但同一通道不同测量区域处光栅的中心波长不能相同,要有一定的波长间隔。

2.3 解调系统及其性能测试

传感网络使用 InGaAs 图像传感衍射解调系统对波长进行解调,实验使用的解调系统选用 Bayspec 公司生产的基于透射式衍射光栅技术和线

阵 InGaAs 图像传感器技术的光纤布拉格光栅查询分析仪模块开发而成,该解调系统的结构如图 4 所示。从耦合器输出的反射光经过准直透镜后照射到全息体相位光栅(VPHG)上,照射到 VPHG 上的光发生衍射色散,不同波长的光被分开并通过聚光透镜聚焦照射在 InGaAs 线阵的不同敏感单元上,不同波长的光信号被探测并被转换成电信号,包含光谱信息的电信号经过信号处理后得到中心波长的值。该解调系统可以有效地提高整个传感系统的测量精度、稳定性及响应速度^[15,16]。

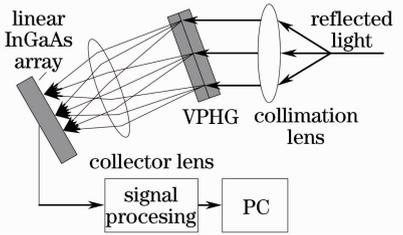


图 4 解调系统结构

Fig. 4 Structure of optical spectrum analyzer

分别利用功率计和波长计,对解调系统的输入功率和波长的精确度及稳定性进行测试分析。输入功率测试结果表明 InGaAs 解调系统输入功率精确度为 ± 0.2 dB,稳定性为 ± 0.4 dB。波长测试结果如图 5、6 所示。图 5 为 3 个不同温度下,InGaAs 解调系统测得的中心波长与波长计测得的波长之间的误差。图 6 为当温度变化范围为 $0 \sim 60$ °C 时,3 组不同中心波长下,InGaAs 解调系统测得的中心波长随温度变化漂移量。测量结果表明,波长精确度为 ± 10 pm,稳定性为 ± 11 pm。

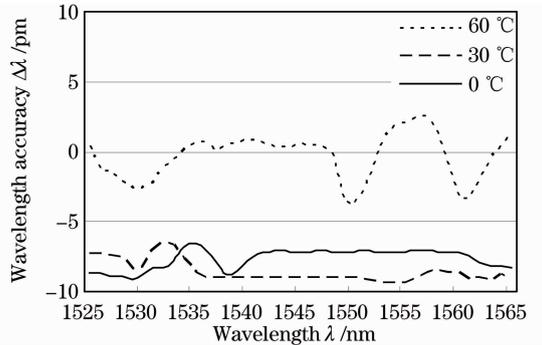


图 5 解调系统波长精确度实验

Fig. 5 Wavelength accuracy test of optical spectrum analyzer

3 实验结果与分析

3.1 温度测量实验

实验使用的裸光栅表面涂覆耐高温材料聚酰亚

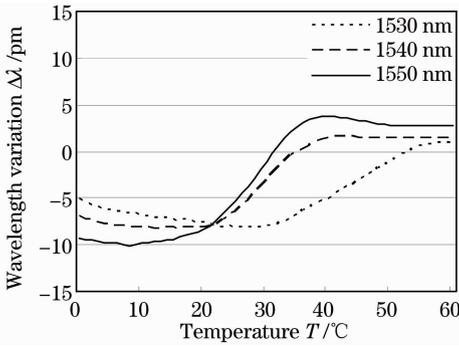


图 6 解调系统波长稳定性实验

Fig. 6 Wavelength stability test of optical spectrum analyzer

胺,测量温度可达 300 °C。将 20 °C 时中心波长分别为 1535.05, 1546.04 和 1554.95 nm 的 3 组裸光栅按新型传感阵列结构串联,对该阵列进行温度实验。实验中温度变化范围为 20~290 °C,将传感阵列放入加热炉中,温度每变化 10 °C 作为一个数据点,然后对 3 组裸光栅进行上述封装做成耐高温光栅传感头,并对其组成的耐高温 FBG 传感阵列进行温度特性测量。封装前后中心波长随温度变化关系如图 7 所示。由图 7 可知,3 组裸光栅波长随温度变化曲线线性度达 0.9925,响应灵敏度达 0.0113 nm/°C;经过封装后,波长随温度变化曲线线性度达到 0.9991,响应灵敏度为 0.0258 nm/°C。由此可见,经过封装的耐高温布拉格光栅传感头能很好地提高系统的响应线性度和灵敏度。

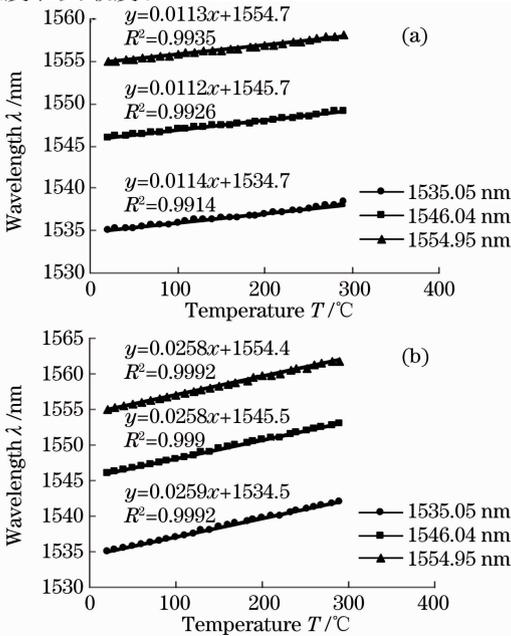


图 7 裸光栅(a)与封装光栅(b)温度传感特性对比

Fig. 7 Comparison of the temperature sensing properties for (a) naked FBG and (b) packaged FBG

3.2 系统精确度实验

在 20~290 °C 内,对系统测温精确度进行了实验。先预热加热炉 30 min,使炉内温度稳定,将由 3 组不同中心波长的传感头组成的耐高温 FBG 传感阵列放入加热炉中,由于炉腔内温度的不均匀性,3 组不同中心波长的传感头分别固定在炉腔内 3 个不同测温区域(A, B 和 C 区)内,同时每个区域放入一支型号相同的标准热电偶测温计进行校准。系统精确度实验结果如图 8 所示,在 20~290 °C 内传感系统在不同测温区域的测量误差均小于 ±0.6 °C,传感系统测温数据与标准热电偶测温计测得数据有较好的一致性。

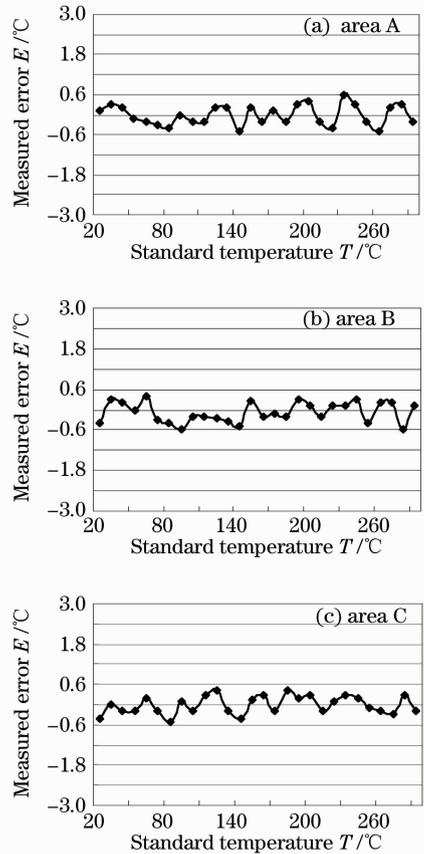


图 8 温度测量误差曲线

Fig. 8 Temperature measurement error curve

3.3 系统稳定性实验

先对系统在不同波长下的测量稳定性进行实验,实验中设定加热炉温度分别为 50, 150 和 250 °C,系统传感阵列由 16 组不同波长的传感头组成,测定传感阵列在 3 个温度下的测量稳定性,如图 9 所示。在 3 个温度下,随着波长的变化系统测量温度波动范围为 ±0.3 °C,实验结果表明测量某一温度时,测量结果不会因传感阵列中传感头中心波

长不同而受到影响,保证了系统稳定性。

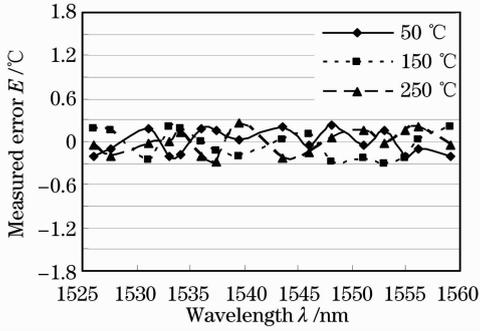


图 9 测量温度随波长的变化曲线

Fig. 9 Measured temperature at different wavelengths

再对系统长期稳定性进行实验,利用加热炉将传感阵列中 3 组不同中心波长的传感头测量温度分别设定为 50,150 和 250 °C,测定 3 组传感头在对应温度下的 10 h 稳定性,实验结果如图 10 所示。可见高温传感系统具有良好的长期稳定性,最大温度波动范围为±0.7 °C。

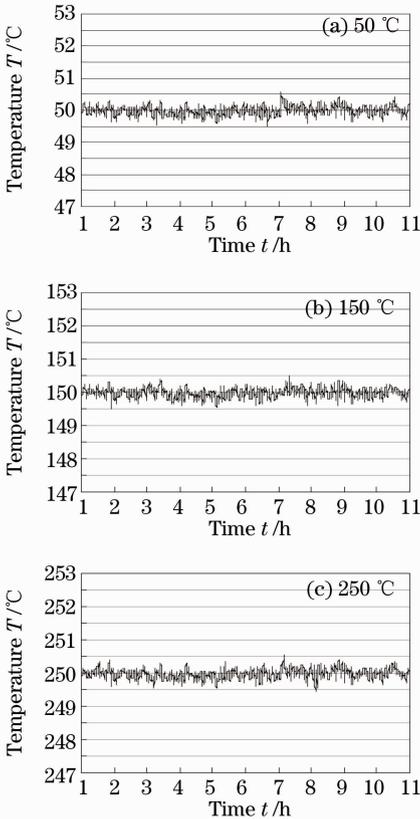


图 10 系统稳定性曲线(10 h)

Fig. 10 Curve of system stability (10 h)

3.4 系统响应时间实验

将具有 3 组不同中心波长的传感阵列放入常温恒温水槽中,待稳定后迅速放入 260 °C 加热炉中,升温响应波形如图 11(a) 所示。可以看出,该传感系

统的升温响应时间小于 16 s。待传感阵列在 260 °C 加热炉中稳定后迅速放入常温恒温水槽中,降温响应波形如图 11(b) 所示。从图中可以看出,该传感系统的降温响应时间小于 16 s,与升温响应时间一致性良好。

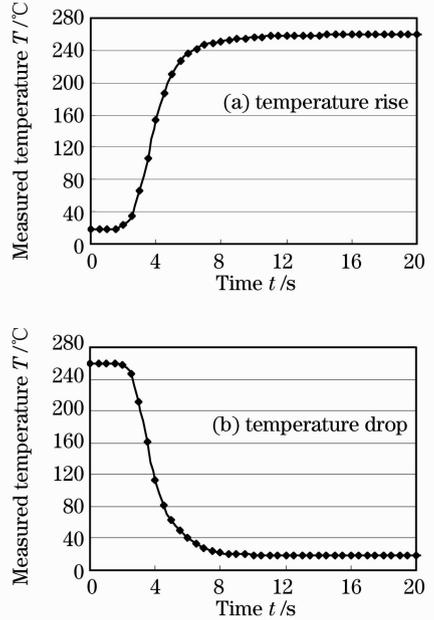


图 11 系统响应时间曲线

Fig. 11 Curve of system response time

4 结 论

基于光纤布拉格光栅高温传感特性,设计了新型封装的耐高温布拉格光栅传感头,并利用不同中心波长的耐高温传感头串联成传感阵列,设计了高可靠传感网络拓扑结构。采用 InGaAs 图像传感衍射解调系统对光反射波长进行解调,构建了一种基于衍射解调的耐高温布拉格光栅传感网络。20~290 °C 范围测试实验表明,所设计的传感网络温度曲线线性拟合度达 0.9991,灵敏度为 0.0258 nm/°C,测量精度达±0.6 °C,响应时间小于 16 s,且具有良好的稳定性。今后通过改进实验装置,可进一步提高测温范围及精度。该传感网络还具有安装方便、抗电磁干扰和可靠性高等优点,适用于各种高温环境中的温度测量。

参 考 文 献

- Lan Yuwen, Liu Bo, Luo Jianhua. Pressure sensor based on distributed-Bragg-reflector fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 629~631
- 兰玉文, 刘波, 罗建花. 基于分布布拉格反射光纤激光器的压力传感器[J]. *光学学报*, 2009, 29(3): 629~631
- Liu Deming, Sun Qizhen. Distributed optical fiber sensing technology and its applications [J]. *Laser & Optoelectronics*

- Progress, 2009, **46**(11): 29~33
- 刘德明, 孙琪真. 分布式光纤传感技术及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(11): 29~33
- 3 Wang Yubao, Lan Haijun. Study of fiber Bragg grating sensor system based on wavelength-division multiplexing/time-division multiplexing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2196~2201
- 王玉宝, 兰海军. 基于光纤布拉格光栅波/时分复用传感网络研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(8): 2196~2201
- 4 Cao Bin, Ou Pan, Jia Ming *et al.*. An innovative temperature-compensate package for fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1959~1961
- 曹彬, 欧攀, 贾明等. 一种新型光纤光栅温度补偿装置[J]. 中国激光, 2008, **35**(12): 1959~1961
- 5 Silvia Diaz, Beatriz Cerrolaza, Gorka Lasheras *et al.*. Double Raman amplified bus network for wavelength-division multiplexing of fiber-optic sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(3): 733~739
- 6 Pengchun Peng, Hongyih Tseng, Sien Chi. A hybrid starring architecture for fiber Bragg grating sensor system [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(9): 1270~1272
- 7 Ying Chaofu, Peng Baojin, Ren Zhijun *et al.*. Demodulation method of distributed fiber Bragg grating sensor using blazed fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2891~2895
- 应朝福, 彭保进, 任志君等. 基于闪耀光纤光栅透射特性的分布式光纤布拉格光栅传感器解调方法[J]. 中国激光, 2010, **37**(11): 2891~2895
- 8 Libo Yuan, Jun Yang. Two-loop-based low-coherence multiplexing fiber-optic sensor network with a Michelson optical path demodulator[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(6): 601~603
- 9 Hongwei Gao, Shuzhong Yuan, Liu Bo *et al.*. InGaAs spectrometer and FP filter combined FBG sensing multiplexing technique [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(14): 2282~2285
- 10 Zhan Yage, Xiang Shiqing, He Hong *et al.*. Study on high temperature optic fiber grating sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1235~1238
- 詹亚歌, 向世清, 何红等. 光纤光栅高温传感器的研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(9): 1235~1238
- 11 Jia Zhen'an, Qiao Xueguang, Fu Haiwei. Study on temperature sensitivity coefficient of fiber Bragg gratings [J]. *J. Optoelectronic • Laser*, 2003, **14**(5): 453~456
- 贾振安, 乔学光, 傅海威. 光纤光栅温度灵敏度系数研究[J]. 光电子•激光, 2003, **14**(5): 453~456
- 12 Liu Qinpeng, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. Research of high temperature sensing for fiber Bragg grating [J]. *J. Optoelectronic • Laser*, 2007, **18**(2): 147~149
- 刘钦鹏, 乔学光, 贾振安等. 光纤 Bragg 光栅高温传感技术研究[J]. 光电子•激光, 2007, **18**(2): 147~149
- 13 Feng Yan, Zhang Hua, Li Yulong *et al.*. Temperature sensitization model of fiber Bragg grating with metal coating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 336~341
- 冯艳, 张华, 李玉龙等. 金属化保护的光纤布拉格光栅温度传感模型[J]. 光学学报, 2009, **29**(2): 336~341
- 14 Zhang Xiaoli, Liang Dakai, Lu Jiyun *et al.*. A high reliable optic fiber Bragg grating sensor network design[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0105004
- 张晓丽, 梁大开, 芦吉云等. 高可靠光纤布拉格光栅传感器网络设计[J]. 中国激光, 2011, **38**(1): 0105004
- 15 Li Guoyu. Study on Imaging Spectrograph Method for FBG Sensing Interrogation Techniques [D]. Tianjin: Nankai University, 2007. 48~53
- 李国玉. 成像光谱法光纤光栅传感解调技术的研究[D]. 天津: 南开大学, 2007. 48~53
- 16 Tao Jun, Mu Lei, Du Ping. Application of optical fiber sensors using linear InGaAs spectral imaging technique to seepage monitoring of dam [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 42~46
- 陶珺, 穆磊, 杜平. 基于 InGaAs 光谱成像技术的光纤光栅传感器在大坝渗流监测系统中的应用[J]. 光子学报, 2010, **39**(1): 42~46

栏目编辑: 李文喆