

# 基于 FBG 精细谱的应变增敏型传感器的设计

苏娟<sup>1</sup> 董小鹏<sup>1</sup> 石志东<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 厦门大学信息科学与技术学院光波技术研究所, 福建 厦门 361005)  
(<sup>2</sup> 上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072)

**摘要** 提出了一种新型的基于非均匀光纤布拉格光栅(FBG)精细谱和边沿解调的应变灵敏度增强型传感器。理论研究了在轴向非均匀应变情况下普通 FBG 的传输谱以及基于传输谱精细结构的应变响应特性。仿真结果表明,将均匀应变转换为非均匀应变的新型传感器对应变的灵敏度为普通 FBG 的 4.6 倍。在实验上设计制作了这种可将被测物体的均匀应变转换为 FBG 的非均匀应变以提高应变灵敏度的传感器结构。实验测量结果证明了理论分析的可行性。这种传感器在采用窄线宽激光器的 FBG 边沿解调方案中具有提高动态应变响应灵敏度以及增大应变测量范围的作用,同时,由于其长度可小型化,在检测高频动态应变信号方面也有较大的应用前景。

**关键词** 传感器; 光纤布拉格光栅; 传输谱; 非均匀应变; 边沿滤波解调; 动态应变测量

中图分类号 TN235; TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0805002

## Design of the Sensitivity Enhanced Strain Sensor Based on Fine Transmission Spectrum of FBG

Su Juan<sup>1</sup> Dong Xiaopeng<sup>1</sup> Shi Zhidong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Lightwave Technology, School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai 200072, China

**Abstract** A novel sensitivity enhanced fiber Bragg grating (FBG) strain sensor based on fine transmission spectrum and edge filter interrogator of a non-uniform FBG is proposed. The fine transmission spectrum changes of FBG under axial non-uniform strain and the strain response character based on spectrum changes are studied theoretically. The simulation results show that the strain sensitivity of the FBG under non-uniform strain can be enhanced to 4.6 times normal FBG. The sensor structure is designed and made experimentally to enhance the strain sensitivity by changing uniform strain into non-uniform strain. The experimental results are in good accordance with theoretical results. The FBG strain sensitivity and the range of the dynamic strain measurement ability are both enhanced in narrow linewidth laser locked edge filter interrogation system by using this new FBG sensor. Because of its compact size, the new FBG strain sensor has great potential for high frequency dynamic strain monitoring.

**Key words** sensors; fiber Bragg grating; transmission spectrum; non-uniform strain; edge filter demodulation; dynamic strain measurement

**OCIS codes** 050.2770; 060.3735; 300.6370

## 1 引 言

光纤布拉格光栅(FBG)因其小尺寸、高灵敏度、良好的抗腐蚀和抗电磁干扰性能、低传输损耗、可波分复用并具备空间编码的优点被广泛应用于航空航

天、复合材料检测、土木工程和医学等各领域<sup>[1-2]</sup>。因此,各种应用领域中的动态信号成为 FBG 应变传感器的重要检测目标。

为了提高检测系统对来自结构的微弱、振动信

收稿日期: 2014-01-20; 收到修改稿日期: 2014-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(61077031)、上海市特种光纤与光接入网重点实验室开放课题(SKLSFO201101)

作者简介: 苏娟(1985—),女,博士研究生,主要从事光纤光栅传感器及特殊光纤传感等方面的研究。

E-mail: sj2008818@sohu.com

导师简介: 董小鹏(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信与光纤传感等方面的研究。

E-mail: xpd@xmu.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

号的感知能力,设计和制作对被测对象应变有高灵敏响应的FBG应变传感器具有十分重要的意义。为了提高FBG对应变的灵敏度,He等<sup>[3-4]</sup>提出了一种灵敏度系数可调的表贴式和埋入式FBG应变传感器,任亮等<sup>[5]</sup>提出了一种基于两端夹持封装技术灵敏度可调的FBG应变传感器并将其应用于小型水坝模型内部应力的测量<sup>[6]</sup>,同时Li等<sup>[7]</sup>设计了一种自带温度补偿的增敏型FBG应变传感器。这些增敏方法的设计思路都是要通过增加传感器的整体长度,将被测物体较大长度上的微小应变转化成传感器内部较短长度FBG区域的更大应变,FBG所受的应变沿轴向仍是均匀的。在传感器整体的尺寸或实际使用时它在被测物体上的安装空间不受限制的前提下,这种应变灵敏度增强方案是可行的;但如果在实际应用中被测物体尺寸较小,或传感器的安装空间有限,或需要测量物体内的低频振动(如材料内部的超声)等场合,这种需要通过增大传感器封装尺寸以提高FBG应变灵敏度的方案在应用中存在较大的局限性。

针对上述灵敏度增强型FBG传感器设计存在的问题,本文提出了一种将被测物体应变转化成FBG非均匀应变从而导致其光谱的精细结构发生变化,结合采用窄线宽激光器与FBG光谱边沿解调的方案,提高FBG对被测物体应变的响应灵敏度。理论仿真了FBG轴向非均匀应力和应变对FBG传输或反射谱精细结构的影响,分析了通过产生非均匀应力提高FBG传输谱曲线斜率的同时增加FBG轴向局部应变使光谱的特征波长(如峰值波长)随应变改变的移动量增大的可行性,并在实验上进行了验证。实验结果表明,通过特殊设计的传感器结构可以使FBG传输谱的最大斜率达到普通FBG最大斜率的1.2倍,光谱特征波长随应变的变化量可达普通FBG的1.5倍,提高了FBG对被测物体应变的灵敏度。通过进一步改进和优化基板的材料和结构设计,传感器的灵敏度应该还可进一步提高。由于这种新的灵敏度增强型FBG传感器设计方案不需要增大传感器的封装尺寸,因此在实际应用中有更强的实用性。

## 2 非均匀光纤布拉格光栅精细谱的特性

虽然已有文献对普通FBG在非均匀应变作用下的光谱变化以及将FBG的这种光谱变化应用于

材料裂纹的监测和还原FBG非均匀受力分布进行研究<sup>[8-12]</sup>,但如何将被测物体的均匀应变转换为普通FBG的非均匀应变,并利用FBG在非均匀应变作用下传输或反射谱的精细结构增强传感器对被测物体均匀应变的检测能力还未见报道。由于FBG在非均匀应变作用下产生的精细谱具有更丰富的信息,可以预期通过检测和分析非均匀应变下FBG精细谱的变化提高传感器对应变测量的能力。因此,提出了一种将被测物体的均匀应变转化为普通FBG非均匀应变的传感器结构,定量分析了FBG在非均匀应变作用下传输谱的分裂以及边沿斜率和特征波长偏移量的变化情况,结果表明这种新的传感器结构可以有效提高基于边沿滤波法解调的FBG应变检测灵敏度。

### 2.1 非均匀FBG传输谱的仿真与分析

垂直跨过裂缝的光纤光栅在结构裂缝处和裂缝附近存在轴向应力集中区<sup>[10]</sup>。简化应力集中区的分布情况并且建立如图1所示的模型。采用Apollo Photonics公司的FOGS-BG软件基于分段矩阵法<sup>[11]</sup>仿真计算了在非均匀应力作用下均匀FBG的传输谱,并分析了其精细结构的变化情况。计算所用的参数如下:光栅长度 $L=15\text{ mm}$ ,周期 $\Lambda_0=532.8\text{ nm}$ ,有效折射率 $n_{\text{eff}}=1.4544$ ,平均有效折射率的改变量 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}=0.0001$ ,光纤泊松比 $\nu=0.17$ ,弹光系数 $P_{11}=0.121$ , $P_{12}=0.27$ ,切趾方式为高斯切趾。图1中 $L_1=L_5=4.5\text{ mm}$ , $L_2=L_4=2.5\text{ mm}$ , $L_3=1\text{ mm}$ , $n=8$ , $E$ 为应变变量。

在图1所示的非均匀轴向应力作用下,均匀FBG成为非均匀FBG,传输谱随应变增加变化情况的仿真结果如图2所示,随应变 $E$ 的增加传输谱精细结构包括边沿斜率、分裂情况、特征波长位置(图2中点 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 的位置)和展宽等都发生改变。计算得非均匀FBG传输谱沿波长各处的斜率变化情况如图3所示,非均匀FBG光谱线性区域的斜率和及其位置也在发生变化。经优化选择,非均匀FBG在初始应变 $E_0=12\text{ }\mu\epsilon$ 时边沿斜率最大,是普通FBG的1.2倍,因此可在传感器制作时加入初始应变,调整光谱形状达到边沿斜率增大的效果。仿真结果显示边沿斜率提高的效果与光谱的形状有关。非均匀FBG光谱中特征波长位置( $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ )随应变漂移量如图4所示,在相同的应变作用下非均匀FBG特征波长位置移动量是均匀FBG中心波长偏移量的4.6倍,这是在应力集中区的作用下FBG长度范围内的平均应变增大的结果,主要由 $n$

和  $L_3$  决定。图 5 计算了波长分别锁定于光谱线性区域中心处(非均匀 FBG: 1549.814 nm, 普通 FBG: 1549.764 nm, 两种传感器初始应变均为  $E_0 = 12 \mu\epsilon$ )时, 不同应变下通过 FBG 边沿的窄带激光反射的光强度相对变化量  $\Delta P/P$  (假设入射光强为 1 mW)。在相同应变下, 非均匀 FBG 返回的光强度变化量的幅值是普通 FBG 的 4.6 倍。仿真结果显示, 在相同应变下通过 FBG 边沿反射回激光信号的强度变化量的大小主要取决于 FBG 特征波长的偏移量, 这是由于特征波长的偏移量的提高远大于边沿斜率的提高。因此可以通过优化  $n$  和  $L_3$  的取值提高传感器的灵敏度。

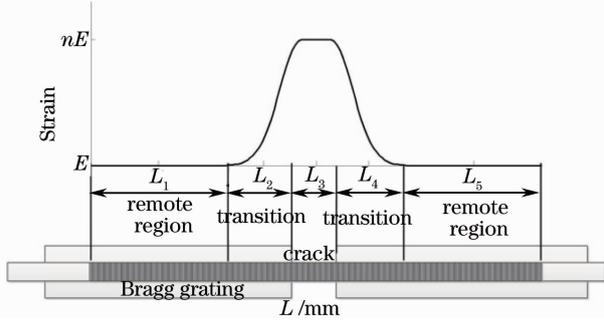


图 1 光谱分析中 FBG 沿轴向的应变分布假设  
Fig. 1 Assumed axial strain distribution of FBG used in the spectrum simulation

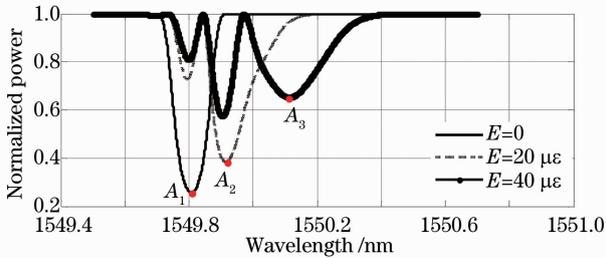


图 2 非均匀 FBG 在不同应变作用下光谱精细结构仿真结果

Fig. 2 Simulation results of the fine spectra of non-uniform FBG under different strains

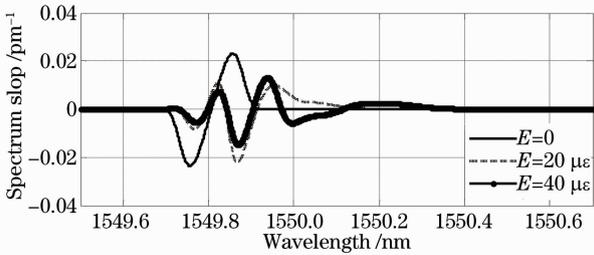


图 3 非均匀 FBG 光谱斜率在不同应变下的情况仿真结果  
Fig. 3 Simulation results of spectrum slope of non-uniform FBG under different strains

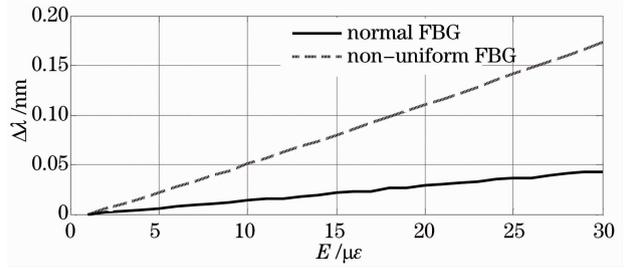


图 4 普通 FBG 中心波长和非均匀 FBG 光谱中特征波长偏移量随应变变化的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of characteristic wavelength shift of non-uniform FBG and wavelength shift of normal FBG versus strain

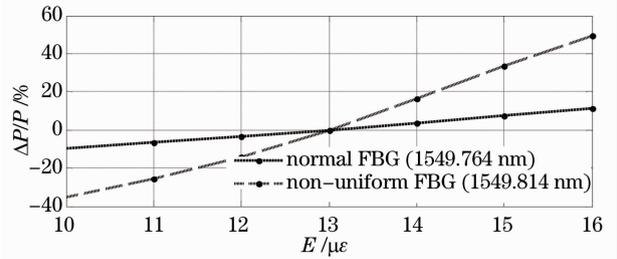


图 5 普通 FBG 和非均匀 FBG 的  $\Delta P/P$  随应变变化仿真结果( $E_0 = 12 \mu\epsilon$ )

Fig. 5 Simulation results of  $\Delta P/P$  of normal FBG and non-uniform FBG versus strain ( $E_0 = 12 \mu\epsilon$ )

## 2.2 实验验证

本文设计了一种封装厚度仅为 0.3 mm, 将被测应变转化为非均匀应变的传感器结构, 如图 6 所示。使普通 FBG 在非均匀应力下成为非均匀 FBG, 普通的 FBG 垂直跨过图 6 所示基板结构的凹槽(凹槽宽度小于光栅区长度), 其余部分用环氧胶固定在基板上, 在被测应变作用下普通 FBG 在跨过凹槽的部分受力大于其他部位形成新型的应变传感器(理想情况下受力分布的简化模型如图 1 所示), 如图 7 所示的 FBG1。实验将普通 FBG(中心波长 1557.700 nm, 3 dB 带宽 0.134 nm) 粘贴在同等厚度的常规基板上, 与新型传感器(所用普通 FBG 中心波长 1550.808 nm, 3 dB 带宽 0.14 nm) 串联后, 用同种环氧胶水粘贴于等强度悬臂梁表面作为参考, 如图 7 所示。由于两种传感器的封装厚度、胶层厚度以及在悬臂梁上的粘贴位置离加荷载点的距离相同, 所以在悬臂梁上所受应变是相同的。光栅串的一端接宽带放大自发辐射(ASE)光源, 另一端接入光谱分析仪(ANDO, AQ6317B)测量悬臂梁下挂不同重物时的透射精细谱, 实验系统示意图如图 8 所示。图 9 为新型 FBG 传感器在不同应变作用下传输谱精细结构变化情况, 与图 10 测量的普通

FBG 在相同应变作用下的反射谱相比,新型 FBG 传感器的传输谱在非均匀应变作用下产生的边沿斜率变化、谱分裂和特征波长漂移等变化情况与仿真结果一致,在被测应变增加时,透射光谱在展宽的同时在短波长边沿处产生新的分裂峰,特征波长位置向长波长偏移。不同应变下测量的传输谱斜率沿波长的变化情况如图 11 所示。经过优化选择,当  $E_0 = 178 \mu\epsilon$  时边沿斜率最大且是普通 FBG 边沿斜率的 1.26 倍,与理论仿真一致。图 12 是在应变作用下普通 FBG 的中心波长与新型 FBG 传感器的特征波长(图 9 中  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  点位置)随应变增加移动情况。实验结果表明,在相同应变作用下,新型 FBG 特征波长的移动量是普通 FBG 中心波长移动量的 1.5 倍。根据测量光谱,波长分别锁定于光谱线性区域中心处(新型 FBG 传感器:1551.406 nm,普通 FBG:1557.909 nm,传感器初始应变均为  $E_0 = 178 \mu\epsilon$ )光强度随应变的变化量如图 13 所示。从实验结果可得,在相同应变时新型 FBG 传感器光强度的变化量是普通 FBG 光强度变化量的 1.5 倍。实验结果与仿真结果相比,FBG 光谱边沿斜率变化量一致,因其由光谱形状决定;光强变化量与波长变化量的放大倍数较小,是由于在实际裂缝区域应力集中现象小于理论仿真,即  $n < 8$  或者应变分布与理论有些微差异,可通过基板结构设计和材料的选择进一步提高灵敏度。

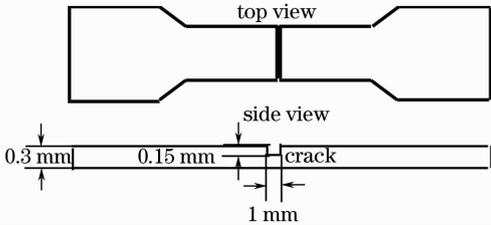


图 6 新型 FBG 应变传感器设计图

Fig. 6 Design model of new FBG strain sensor

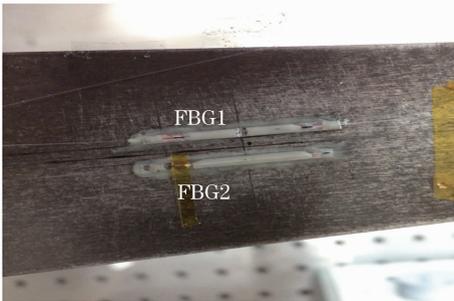


图 7 粘贴于等强度悬臂梁的普通 FBG 应变传感器(FBG2)和新型 FBG 应变传感器(FBG1)

Fig. 7 Normal FBG sensor (FBG2) and new FBG sensor (FBG1) on the equal strength cantilever beam

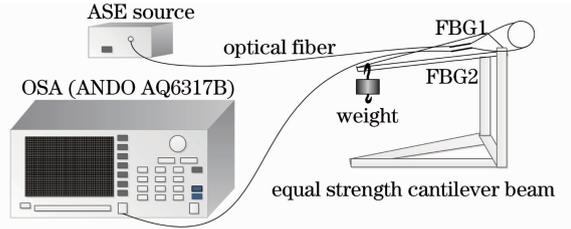


图 8 实验系统示意图

Fig. 8 Schematic of the experimental arrangement

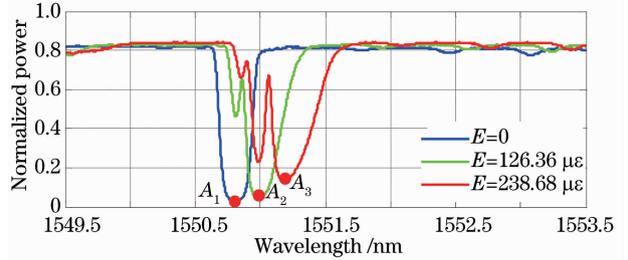


图 9 新型 FBG 传感器传输谱精细结构测量结果

Fig. 9 Experimental results of new FBG fine transmission spectra

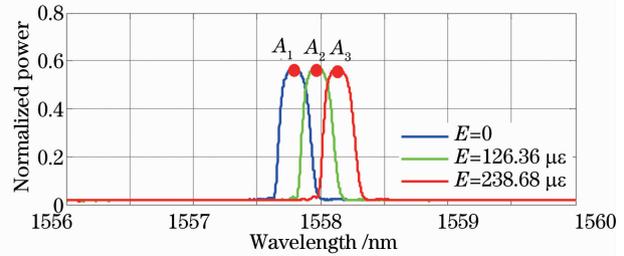


图 10 普通 FBG 传感器反射谱测量结果

Fig. 10 Experimental results of normal FBG fine reflection spectra

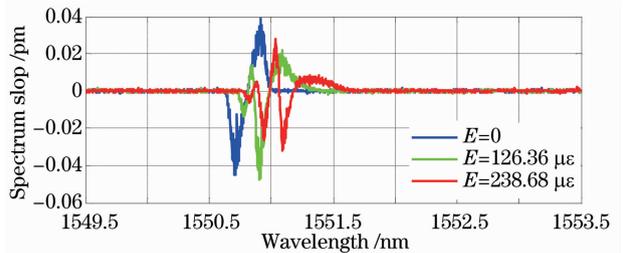


图 11 新型 FBG 传感器传输谱斜率在不同应变下测量结果

Fig. 11 Experimental results of the new FBG sensor spectrum slope under different strains

### 3 结 论

通过理论仿真和实验提出了一种可以小型化、将被测应变转化为 FBG 轴向非均匀应变从而改变 FBG 传输谱精细结构的结构,在提高传输谱曲线斜率的同时增加 FBG 轴向局部应变,使光谱的特征波

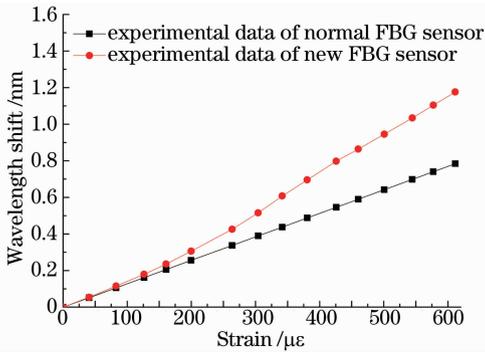


图 12 实验测量普通 FBG 中心波长和新型 FBG 传感器特征波长在应变作用下偏移量

Fig. 12 Experimental results of wavelength shifts of normal FBG and characteristic wavelength of new FBG sensor versus strain

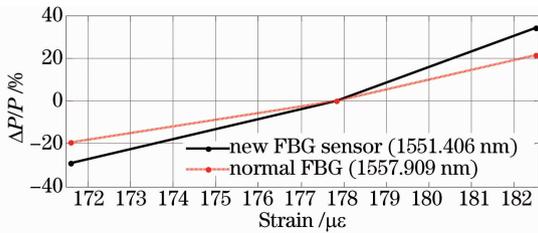


图 13 普通 FBG 和新型 FBG 传感器的  $\Delta P/P$  随应变变化测量结果 ( $E_0 = 178 \mu\epsilon$ )

Fig. 13 Experimental results of  $\Delta P/P$  of normal FBG and new FBG sensor versus strain ( $E_0 = 178 \mu\epsilon$ )

长随应变的移动量增加,提高了 FBG 对应变的响应灵敏度。通过传感器的材料选择和结构设计,如改变凹槽宽度、深度来改变作用在 FBG 上的平均应力,能够进一步优化、提高灵敏度。

### 参 考 文 献

1 Rao Yunjiang. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999, 31(4): 297-324.  
 2 López-Higuera J M, Cobo L R, Incera A Q, et al.. Fiber optic sensors in structural health monitoring[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(4): 587-608.

3 He Jun, Zhou Zhi, Dong Huijuan, et al.. Study on a new kind of surface sticking strain sensor with sensitivity enhanced based on FBG[C]. SPIE, 2007, 6595: 65953K.  
 4 He Jun, Zhou Zhi, Dong Huijuan, et al.. Design of coefficient-adjustable FBG strain sensors [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(11): 2339-2346.  
 何 俊, 周 智, 董惠娟, 等. 灵敏度系数可调布拉格光栅应变传感器的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(11): 2339-2346.  
 5 Ren Liang, Li Hongnan, Hu Zhiqiang, et al.. Development and application of FBG strain sensor with enhanced sensitivity in the model vibration experiment [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2008, 19(11): 1437-1441.  
 任 亮, 李宏男, 胡志强, 等. 一种增敏型光纤光栅应变传感器的开发及应用[J]. 光电子 • 激光, 2008, 19(11): 1437-1441.  
 6 Ren Liang, Chen Jianyun, Li Hongnan, et al.. Design and application of a fiber Bragg grating strain sensor with enhanced sensitivity in the small-scale dam model[J]. Smart Material and Structures, 2009, 18(3): 1-7.  
 7 Li Kuo, Zhou Zhen'an. A high sensitive fiber Bragg grating strain sensor with automatic temperature compensation[J]. Chin Opt Lett, 2009, 7(3): 191-193.  
 8 Wang Zhengfang, Wang Jing, Sui Qingmei, et al.. Research on the phase-shifted fiber grating spectrum characteristics in the inhomogeneous strain fields [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(7): 2003-2008.  
 王正方, 王 静, 隋青美, 等. 非均匀应变场下相移光栅光谱特性及其实验研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(7): 2003-2008.  
 9 Michel Studer, Kara Peters, John Botisis. Method for determination of crack bridging parameters using long optical fiber Bragg grating sensors [J]. Composites Part B: Engineering, 2003, 34(4): 347-359.  
 10 Philippe Giaccari, Gabriel R Dunkel, Laurent Humbert, et al.. On a direct determination of non-uniform internal strain fields using fibre Bragg gratings[J]. Smart Materials and Structures, 2005, 14(1): 127-136.  
 11 Peters K, Studer M, Botisis J, et al.. Embedded optical fiber Bragg grating sensor in a nonuniform strain field; measurements and simulations[J]. Experimental Mechanics, 2001, 41(1): 19-28.  
 12 Wang Jing, Wang Zhengfang, Sui Qingmei, et al.. Study of FBG strain distribution reconstruction based on improved genetic algorithm dual constraint [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0305004.  
 王 静, 王正方, 隋青美, 等. 基于改进遗传算法双重约束的 FBG 应变分布重构研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0305004.

栏目编辑: 史 敏