

基于混沌光纤激光的准分布式布拉格传感网络

王斐斐¹ 张丽¹ 杨玲珍^{1,2} 刘艳阳¹

(¹ 太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024
² 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要 提出了一种基于混沌光纤激光器的准分布式布拉格光纤光栅传感系统, 将波长可调谐的混沌光纤激光器作为传感光源, 全同弱反射布拉格光纤光栅作为传感元件。利用混沌光源具有 δ 函数的自相关特性, 将混沌源的参考光信号与从全同弱反射布拉格光纤光栅反射的光信号经光电探测器进行光电转换, 结合相关法对参考光和反射光进行相关运算, 根据相关峰的位置对传感器位置进行精确定位。利用混沌激光的可调谐性实现因应力作用而发生变化的全同弱反射光纤光栅的中心波长的解调, 从而实现准分布式的传感网络。实验结果表明利用混沌激光可在单路光纤上复用全同弱反射光纤光栅实现传感, 并有望实现密集型全同弱反射光纤光栅传感网络。

关键词 传感器; 布拉格光纤光栅; 混沌光纤激光器; 可调谐光纤光栅; 准分布式

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0806006

Quasi-Distributed Fiber Bragg Grating Sensing Network Based on Fiber Chaotic Laser

Wang Feifei¹ Zhang Li¹ Yang Lingzhen^{1,2} Liu Yanyang¹

¹ Physics and Optoelectronic Engineering College, Taiyuan University of Technology,
Taiyuan, Shanxi 030024, China

² Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education,
Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract A novel type of quasi-distributed fiber Bragg grating sensing system based on fiber chaotic laser is demonstrated. The light source is the wavelength tunable chaotic fiber laser. The identical weak fiber Bragg gratings are utilized as the sensors. According to delta function characteristics of the correlation of chaotic light sources, the correlation peaks of the cross-correlation between the reflected light from sensors and reference light from chaotic fiber laser can locate the positions of the sensors. The center wavelength of the identical weak fiber Bragg grating with stress can be demodulated by using tunable optical fiber grating filter and the quasi-distributed fiber Bragg grating sensing system is realized. The experimental results show that the single fiber link of the identical fiber Bragg grating sensor using the tunable chaotic fiber laser is realized and it is expected to achieve the intensive weak fiber grating sensing network.

Key words sensors; fiber Bragg grating; fiber chaotic laser; tunable fiber grating; quasi-distributed

OCIS codes 130.6010; 060.3735; 140.1540

1 引言

布拉格光纤光栅(FBG)作为新型传感元件受到越来越多的关注,并被广泛应用于光学传感和光学通信等领域^[1-4]。与传统的电传感元件和普通光纤

传感器相比,FBG具有灵敏度高、质量轻、体积小、制作简单、抗电磁干扰、易于实现多路复用等优点^[3,5-7]。因此FBG传感器在大型复合材料、混凝土的结构检测,航空航天的安全检测,石油天然气储

收稿日期: 2014-03-07; **收到修改稿日期**: 2014-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(61107033)、山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划(2012lfyj05)

作者简介: 王斐斐(1990—),女,硕士研究生,主要从事基于混沌光纤激光的布拉格光栅传感实验方面的研究。

E-mail: wfflkl@163.com

导师简介: 杨玲珍(1973—),女,博士,教授,主要从事激光技术与应用等方面的研究。E-mail: office-science@tyut.edu.cn

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

层检测,输电线路的负载、温度等的检测以及医学应用中温度、超声波等的检测中得到了广泛的应用^[8-12]。

随着 FBG 传感技术的不断成熟和应用需求的不断提高,FBG 传感器的复用技术也日趋增多。最早提出的也是应用最广泛的复用技术即波分复用技术,该方法是用宽带光源作为传感光源,并在同一根光纤上串联不同中心波长的光纤光栅。该方法在一定程度上提高了传感器的复用能力,但是由于受传感光源带宽的影响,使其复用能力受到了很大的限制^[13-14]。其次是基于脉冲光源的时分复用技术,该复用技术在时域上提高了 FBG 传感器的复用能力,然而受传输损耗的影响,传感器的复用能力随之降低^[15]。相继地,码分多址和空分复用技术也被提出,但码分多址复用技术需用伪随机二进制序列对光源进行调制,这必然会增加应用的成本和操作的复杂度,空分复用技术则对光源带宽和功率的利用率比较低^[16-17]。2012 年,Zhang 等^[18]提出基于一定重复频率的脉冲序列和相同弱反射型 FBG 的准分布式布拉格温度传感系统,通过分析反射的传感信号相对输入信号的时间延迟来确定传感器的位置。随着光学技术的不断发展,光纤激光器和波长可调谐的混沌光纤激光器逐渐成为扩展混沌通信容量的研究方法之一,且混沌光纤激光器已经用于断点检测和测距等应用中^[19-21]。

本文提出的传感解调系统实现了 FBG 传感器的复用,并对传感器进行精确定位从而实现准分布

式光纤传感。

2 主要研究内容与结果

2.1 实验原理及装置

应力、温度等性能的变化会引起 FBG 周期及有效折射率的变化,导致 FBG 的中心波长发生相应的漂移^[22]。图 1 为 FBG 的结构图以及其透射和反射特性,中心波长和光栅周期的关系式可表示为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中 λ_B 为 FBG 反射谱的中心波长, n_{eff} 为导模的有效折射率, Λ 为 Bragg 光栅周期。

FBG 受到应力作用时,光纤的弹光效应和弹性形变导致 FBG 的有效折射率及周期发生改变,折射率或周期的变化都会导致 FBG 的中心波长发生漂移。中心波长的变化和轴向应力之间的线性关系可表示为

$$\Delta\lambda_s = (1 - P_e)\lambda_B\epsilon = -(1 - P_e)\lambda_B\sigma/E, \quad (2)$$

式中 $\Delta\lambda_s$ 为中心波长的漂移量, P_e 为有效光弹系数, ϵ 为施加在 FBG 上的应变, σ 为轴向应力, E 为光纤光栅的弹性模量(在熔融石英中, $E = 7.0 \times 10^{10}$ Pa)。有效光弹系数和光学应力张量分量的关系可表示为

$$P_e = \frac{1}{2}n_{\text{eff}}^2[P_{12} - \nu(P_{11} - P_{12})], \quad (3)$$

式中 P_{11} 、 P_{12} 为光学应力张量分量, ν 为纤芯材料的泊松系数^[23]。在熔融石英中, $P_{11} = 0.121$, $P_{12} = 0.270$, $n_{\text{eff}} = 1.456$, $\nu = 0.17$ ^[24]。

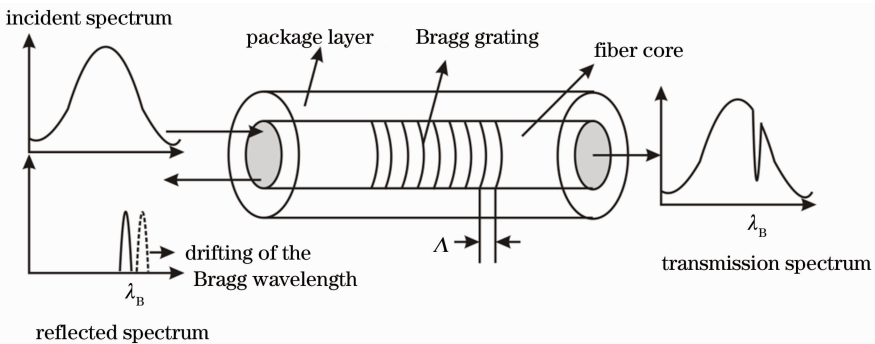


图 1 布拉格光纤光栅的结构及透射和反射特性

Fig. 1 Structure, transmission and reflection characteristics of fiber Bragg grating

本实验装置包括三个部分:混沌光纤激光器、传感检测系统和数字处理系统。如图 2 所示的环形腔为混沌光纤激光器,980 nm 的半导体激光器作为抽运源,经波分复用器(WDM)耦合到 8 m 长的掺铒光纤(EDF)中。单模光纤(SMF)长度约为 3 km,光纤激光器总腔长约为 3010 m。可调谐光纤光栅

(TFBG,滤波范围:1540.26~1571.86 nm,线宽:0.23 nm)作为窄带滤波器产生不同波长的混沌激光,经 90:10 的耦合器(OC-1)后输出 90% 的光在环形腔里传输,10% 的光用于输出探测。光隔离器(ISO)保证光的单向传输,偏振控制器(PC)用于控制光的偏振态。探测光通过 90:10 耦合器(OC-2),

输出 10% 的光作为参考信号, 90% 的光作为探测信号从环形器 1 端口进 2 端口出, 并传输到传感系统, 从全同弱反射光纤光栅传感器反射回来的信号经环形器 3 端口输出。传感检测系统由性能参数完全相同的弱反射光纤光栅 FBG_1 、 FBG_2 、 FBG_3 和 FBG_4 组成。把 FBG 固定在金属弹性片上, 通过金属弹片的形变实现对 FBG 应力的调节。FBG 的中心波长为 1563.252 nm, 线宽为 0.2 nm, 反射率为 10%。参考光信号与反射光信号分别由带宽为 1 GHz 的

两个光电探测器 (PD-1, PD-2) 进行光电转换, 并由实时示波器进行采集。对反射信号与参考信号作相关运算, 通过相关峰的位置确定传感器的位置。

图 3 依次为混沌光源输出的时序图、频谱图和自相关图。混沌信号在时序上呈现类噪声特性, 频谱带宽延伸至 1 GHz, 主要受实验中所用光电探测器带宽 (1 GHz) 的限制, 自相关曲线呈现类似于理想的“图钉”函数线型。

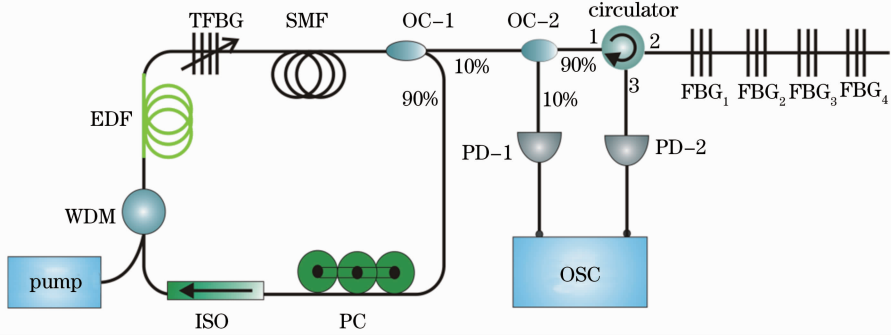


图 2 光纤光栅混沌传感实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of fiber Bragg grating sensing network based on chaotic laser

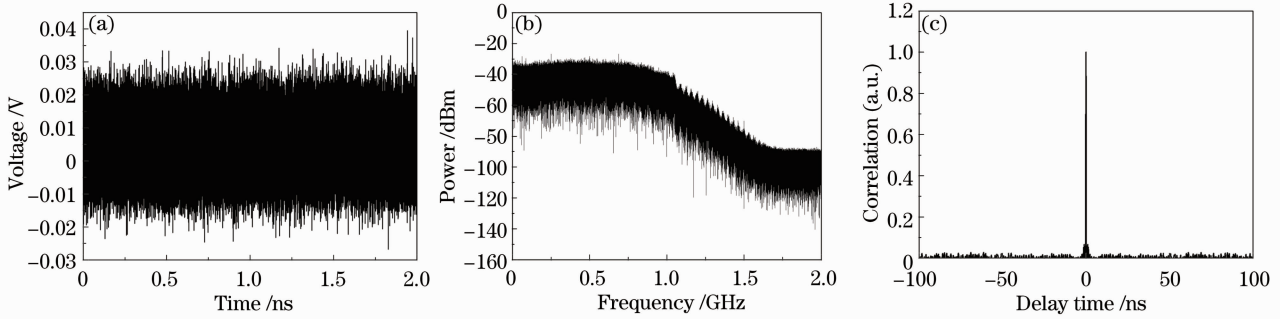


图 3 (a) 时序图; (b) 频谱图; (c) 自相关图

Fig. 3 (a) Time series; (b) spectrum; (c) autocorrelation

2.2 实验结果

实验中, 在同一链路上复用四个参数相同的 FBG, 当光经过每个光栅时有 10% 的光从 FBG 反射回来。调谐可调光纤光栅使激光器输出波长与未受应力的光纤光栅的中心波长 (1563.252 nm) 相一致, 通过数据采集系统采集反射信号和参考信号, 并对两信号作相关运算, 通过相关峰的位置定位每个光栅的位置。设参考信号的函数表达式为 $x(t)$, 反射信号的函数表达式为 $\kappa x(t+\tau)$, τ 为反射信号相对于参考信号的延迟时间, κ 为传输损耗系数。则互相关函数为

$$R(t) = x(t) \otimes \kappa x(t+\tau) \approx \kappa \delta(t), \quad (4)$$

式中 \otimes 为对两个函数作卷积运算。从 (4) 式可以看出, 参考信号与反射信号的互相关函数具有 δ 函数

线型, 通过观察相关峰的位置对传感器进行位置定位^[25-26]。图 4 为调谐可调光纤光栅与未施加应力

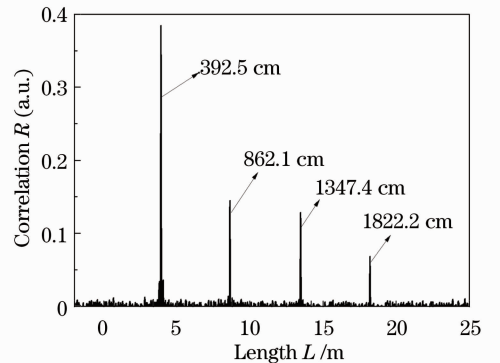


图 4 四个 FBG 的相关峰

Fig. 4 Correlation peaks of the four FBGs

的FBG中心波长相匹配时,参考光与信号光的相关峰,四个相关峰依次对应FBG₁、FBG₂、FBG₃和FBG₄,且每个光栅分别对应位置392.5,862.1,1347.4,1822.2 cm处。

当混沌的输出波长保持不变,而对FBG施加应力作用时,应力使得光纤光栅的周期及有效折射率改变,由(1)式可以得出FBG的中心波长会发生相应的漂移,此时对传感器反射的光信号与参考光信号作互相关运算,并观察相关峰的情况。实验结果表明在一定范围内,随着波长漂移量的增加相关系数逐渐降低,当波长漂移量为0.058 nm时相关系数为0.023,相关峰已湮没在基底噪声中无法分辨。

图5(a)为仅对FBG₁施加应力得出的相关图,此时因FBG₂、FBG₃、FBG₄波长与混沌源的波长保持一致,因此参考信号与反射信号进行相关出现相关峰。而对于FBG₁因其受应力的作用,FBG₁的中心波长发生了漂移,在FBG₁所在位置处相关峰消失。图5(b)为保持FBG₁的应力不变,对FBG₂施加应力,此时由FBG₂反射的信号光与参考光的相关峰也消失。保持FBG₁、FBG₂应力不变,同时对FBG₄施加应力后的结果如图5(c)所示。保持对FBG₁、FBG₂、FBG₄应力不变施加应力至FBG₃,得相关系数如图5(d)所示。

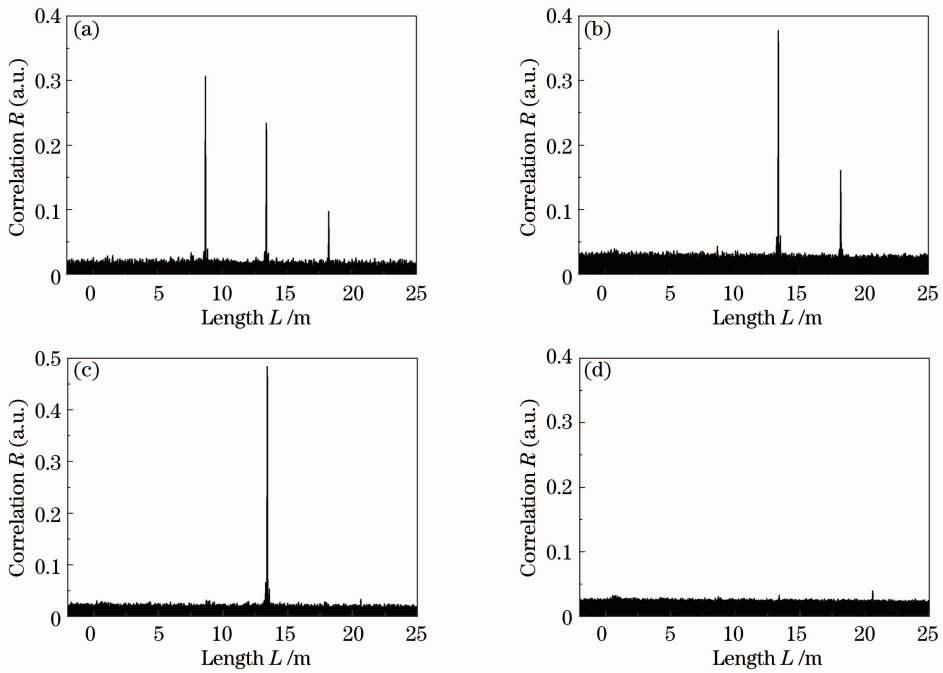


图5 应力作用到(a) FBG₁, (b) FBG₁、FBG₂, (c) FBG₁、FBG₂、FBG₄, (d) FBG₁、FBG₂、FBG₃、FBG₄时的相关曲线
 Fig. 5 Correlation coefficients when the pressure is applied on (a) FBG₁, (b) FBG₁, FBG₂, (c) FBG₁, FBG₂, FBG₄ and (d) FBG₁, FBG₂, FBG₃, FBG₄

调节混沌源中可调光纤光栅使激光器输出波长与传感器的中心波长相匹配,对应应力传感信息进行解调。如图6(a)所示,未施加应力时FBG的中心波长 $\lambda_0 = 1563.252$ nm,与混沌激光器输出的波长相一致。FBG₁、FBG₂、FBG₃、FBG₄施加应力后的中心波长,依次对应 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 。通过波长可调谐的光纤光栅结合信号的相关曲线,实现光纤光栅传感器的定位和解调。当混沌光源的波长调节到 $\lambda_1 = 1563.458$ nm,在FBG₁位置处得到相关峰如图6(b)红线所示,说明此时传感器FBG₁的中心波长因应力改变为1563.458 nm,漂移量为 $\Delta\lambda_1 =$

0.206 nm。调谐可调光纤光栅直至参考光与信号光作互相关后在FBG₂位置处出现相关峰,如图6(b)蓝线所示,记录此时激光器的输出中心波长为 $\lambda_2 = 1563.648$ nm。重复上述过程,直至激光器输出波长与各传感器的中心波长相匹配,并记录中心波长位置与相关峰位置。最终得到 $\lambda_3 = 1563.912$ nm, $\lambda_4 = 1563.805$ nm,对应于FBG₂、FBG₃、FBG₄的波长漂移量分别为 $\Delta\lambda_2 = 0.396$ nm, $\Delta\lambda_3 = 0.660$ nm和 $\Delta\lambda_4 = 0.553$ nm。通过(2)、(3)式计算可得施加在FBG₁、FBG₂、FBG₃、FBG₄的轴向应力大小分别为11.8, 22.6, 37.7, 31.6 MPa。

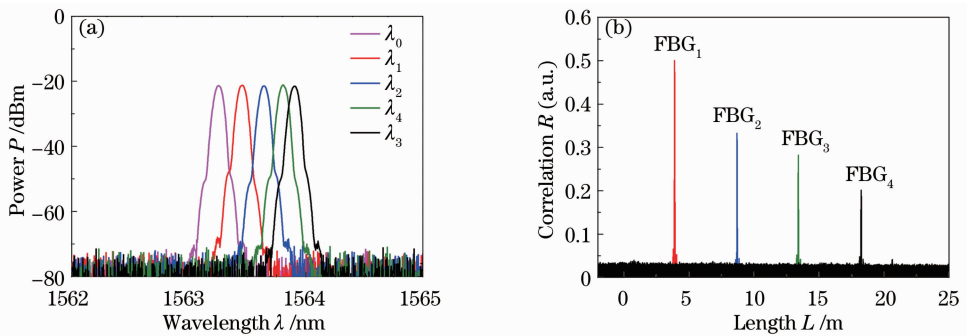


图 6 (a)施加应力前后的波长; (b)解调后每个 FBG 处的相关峰

Fig. 6 (a) Wavelengths before and after exerting pressure; (b) correlation peaks of every FBG after the demodulation

3 结 论

基于混沌光纤激光器的准分布式布拉格传感系统,利用混沌作为类噪声具有良好的自相关特性对传感器进行精确定位,结合可调谐的光纤光栅滤波器对混沌光源进行调节,使激光器输出波长匹配各传感器的中心波长,实现对应力的传感解调。并且混沌光源无须外部调制,使得基于混沌光纤激光器的准分布式布拉格传感系统应用前景更为广阔。

参 考 文 献

- 1 Ma Youchun, Wang Changjiang, Yang Yuanhong, *et al.*. High resolution and wide scale fiber Bragg grating sensor interrogation system [J]. *Opt Laser Technol*, 2013, 50: 107–111.
- 2 Zhang Ying, Liu Guozhi, Guo Zhuanyun, *et al.*. A high-sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(1): 89–91.
张颖, 刘志国, 郭转运, 等. 高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性的研究[J]. *光学学报*, 2002, 22(1): 89–91.
- 3 Liu Jiansheng, Zhang Jing, Li Xin, *et al.*. Study on multiplexing ability of identical fiber Bragg gratings in a single fiber [J]. *Chinese J Aeronautics*, 2011, 24(5): 607–612.
- 4 Song Zhiqiang, Qi Haifeng, Li Shujuan, *et al.*. Research on control technology of fiber grating wavelength by pulling force in grating fabrication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706009.
宋志强, 祁海峰, 李淑娟, 等. 光纤光栅制作中波长拉力控制技术的研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706009.
- 5 H Tsuda. Fiber Bragg grating vibration-sensing system, insensitive to Bragg wavelength and employing fiber ring laser [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(14): 2349–2351.
- 6 Luo Binbin, Zhao Mingfu, Zhou Xiaojun, *et al.*. Research on the refractive-index gradient sensor based on the structured fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0306004.
罗彬彬, 赵明富, 周晓军, 等. 基于结构化光纤 Bragg 光栅的折射率梯度传感器研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0306004.
- 7 Tong Zhengrong, Wang Jieyu, Yang Xiufeng, *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and strain based on core diameter mismatch and fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1206001.
童峥嵘, 王洁玉, 杨秀峰, 等. 基于纤芯失配和光纤布拉格光栅实现温度和应变同时测量[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1206001.
- 8 D L Gysling, F X Bostick III. Changing paradigms in oil and gas

- reservoir monitoring—the introduction and commercialization of in-well optical sensing systems [C]. *IEEE Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, 2002, 1: 43–46.
- 9 Y J Rao. Recent progress in applications of in-fiber Bragg grating sensors [J]. *Opt Lasers Eng*, 1999, 31(4): 297–324.
 - 10 D H C Wang, N Blenman, S Maunder, *et al.*. An optical fiber Bragg grating force sensor for monitoring sub-bandage pressure during compression therapy [J]. *Opt Express*, 2013, 21(17): 19799–19807.
 - 11 Tian Shizhu, Cao Changcheng, Wang Dapeng. Experimental study on fiber grating sensor monitoring the crack of concrete [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0114001.
田石柱, 曹长城, 王大鹏. 光纤光栅传感器监测混凝土筒支梁裂缝的实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0114001.
 - 12 R Willsch, W Ecke, H Bartelt. Optical fiber grating sensor networks and their application in electric power facilities, aerospace and geotechnical engineering [C]. *IEEE Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, 2002, 1: 49–54.
 - 13 Y Yu, L Lui, H Tam, *et al.*. Fiber-laser-based wavelength-division multiplexed fiber Bragg grating sensor system [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001, 13(7): 702–704.
 - 14 A Kersey. Multiplexed Bragg grating fiber sensors [C]. *IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting*, 1994, 2: 153–154.
 - 15 Dai Yongbo, Liu Yanju, Leng Jinsong, *et al.*. A novel time-division multiplexing fiber Bragg grating sensor interrogator for structural health monitoring [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(10): 1028–1033.
 - 16 W Li, Y J Zhang, H Q Wen. A multiple fiber grating sensor system using code division multiple access [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 765: 2444–2447.
 - 17 Y J Rao, K Kalli, G Brady, *et al.*. Spatially-multiplexed fibre-optic Bragg grating strain and temperature sensor system based on interferometric wavelength-shift detection [J]. *Electron Lett*, 1995, 31(12): 1009–1010.
 - 18 Zhang Manliang, Sun Qizhen, Wang Zi, *et al.*. A large capacity sensing network with identical weak fiber Bragg gratings multiplexing [J]. *Opt Commun*, 2012, 285(13-14): 3082–3087.
 - 19 Yang Rong, Zhang Li, Yang Lingzhen. Experimental investigation on multi-wavelength chaos of erbium-doped fiber ring laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0114001.
杨蓉, 张丽, 杨玲珍. 多波长混沌掺铒光纤环形激光器实验研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0114001.
 - 20 Yu Youlong, Tan Huayao, Wang Qi. Fiber laser based wavelength division multiplexed fiber Bragg grating sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(5): 592–595.
余有龙, 谭华耀, 王骥. 基于光纤激光器的波分复用光纤光栅

- 传感系统[J]. 光学学报, 2002, 22(5): 592—595.
- 21 K O Hill, G Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview [J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1263—1276.
- 22 Zhu Zhu, Liang Dakai, Sun Hongbing. Double-edged filter wavelength demodulation system for fiber Bragg gratings based on long period fiber grating [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0305001.
朱 珠, 梁大开, 孙红兵. 基于双长周期光纤光栅边缘滤波的光纤布拉格光栅解调系统[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0305001.
- 23 A D Kersey, M A Davis, H J Patrick, *et al.*. Fiber grating sensors [J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1442—1463.
- 24 Li Chuan, Li Yingna, Wan Zhou, *et al.*. Optical Fiber Sensor Technology [M]. Beijing: Science Press, 2012. 221.
李 川, 李英娜, 万 州, 等. 光纤传感器技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012. 221.
- 25 Wang Yuncai, Ma Jianyi, Han Xiaohong, *et al.*. Data acquisition and processing of correlation ranging system with chaotic laser [J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(3): 568—573.
王云才, 马建议, 韩晓红, 等. 混沌激光相关法测距系统的信号采集与处理[J]. 应用光学, 2011, 32(3): 568—573.
- 26 Zhang Xiangyuan, Yang Lingzhen. A fiber Bragg grating quasi-distributed sensing network with a wavelength-tunable chaotic fiber laser [J]. Systems Science & Control Engineering: an Open Access Journal, 2014, 2(1): 268—274.

栏目编辑: 王晓琰