

文章编号: 0253-2239(2010)03-0638-06

基于两端固定压杆的光纤布拉格光栅波长调谐

杨东周¹ 冯德军¹ 王 静² 姜明顺² 隋青美²

(¹ 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100; ² 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要 提出了一种基于两端固定压杆的新型光纤布拉格光栅(FBG)波长调谐方法。根据材料力学对基于两端固定压杆的光纤光栅波长调谐进行了理论推导, 仿真并重点分析了在调谐过程中谐振峰产生的原因。利用自行设计的调谐装置进行了 FBG 波长调谐实验, 波长调谐量与移动平台位移量成指数关系, 实现了 FBG 波长的双向准无啁啾调谐量 35 nm, 调谐过程中 3 dB 带宽的改变量小于 0.09 nm。调谐过程具有很好的重复性, 迟滞误差为 0.08%。

关键词 光纤布拉格光栅; 波长调谐; 两端固定压杆; 切趾; 谐振

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103003.0638

Wavelength Tuning of Optical Fiber Grating Based on Two-Fixed-End Elastic Compressive Bar

Yang Dongzhou¹ Feng Dejun^{1,3} Wang Jing² Jiang Mingshun² Sui Qingmei²

(¹ School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)
(² School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

Abstract A novel tunable wavelength filter is designed and demonstrated, which is realized by bending a fiber Bragg grating (FBG) mounted on a two-fixed-end elastic compressive bar. According to material mechanics, equations relating the wavelength tuning of FBG to the bending strain are derived. The resonant peaks during tuning process are simulated and analyzed in detail. FBG wavelength tuning experiments are carried out by using self-designed tuning apparatus. The wavelength change has a strictly exponential relation with the displacement of the translation stage. The experimental tuning range is greater than 35 nm and the 3 dB bandwidth change is less than 0.09 nm. The tuning has a repeatability with hysteresis of 0.08%.

Key words fiber Bragg grating (FBG); wavelength tuning; two-fixed-end elastic compressive bar; apodization; resonance

1 引 言

自 1989 年 G. Meltz 等^[1]采用相位掩膜法成功写入光纤布拉格光栅(FBG)以来, FBG 被广泛应用在光通信和光传感等领域。随着波分复用系统所使用的光波长范围的不断增加以及光传感领域各种物理量测量范围的不断扩大, 这就使得大范围可调谐的滤波器变得日益重要。FBG 波长的调谐方法主要分为温度调谐和应变调谐两大类。温度调谐是利用 FBG 外层镀膜、在 FBG 上涂覆温度敏感材料、把

光栅粘贴或埋入热膨胀系数较大的基底材料, 通过改变外层镀膜、涂层或者基底材料的温度实现调谐。H. G. Limberger 等^[2]在 FBG 外镀有良好导热性能的金, 通过控制金膜上的电流来控制温度, 在直流电压下获得 2.15 nm 的调谐范围。由于 FBG 的温度敏感性较低, 所以较难实现大范围的调谐。应变调谐常见的有使用压电陶瓷(PZT)、悬臂梁、电磁场和弹性梁。M. R. Mokatar 等^[3]利用弯曲梁对粘贴在其表面的 FBG 进行应力调谐, 获得了迄今见于

收稿日期: 2009-04-10; 收到修改稿日期: 2009-05-12

基金项目: 山东省自然科学基金(Q2007G03), 山东省优秀中青年科学家奖励基金(2006BS01001)资助课题

作者简介: 杨东周(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器和光纤光栅等方面的研究。

E-mail: ydz1034@163.com

导师简介: 冯德军(1973—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光学全息与光信息处理、光纤传感技术、光纤光栅研制和光纤激光器等方面的研究。E-mail: dejunfeng@sdu.edu.cn(中国光学学会会员号: S040420423M)

报导的最大的 110 nm 调谐范围^[4,5]。因此,应变调谐方法以其简单、可靠以及调谐范围大的优点获得了广泛的应用。

提出了一种基于两端固定压杆弯曲应变的新型 FBG 波长调谐方法。对 FBG 波长调谐的原理进行了理论推导;仿真分析了在调谐过程中影响谐振峰现象的因素。实验研究了光栅波长的调谐特性。

2 两端固定压杆对光纤光栅应变调谐的工作原理

调谐装置如图 1 所示,截面为矩形的扁平弹性杆的一端固定在固定平台上,另一端固定在移动平台上,当移动平台向固定平台移动时,弹性杆会被弯成类似高斯脉冲的形状。当 FBG 粘贴在弹性杆的上表面的中间位置时,FBG 处于拉应变调谐状态,当 FBG 粘贴在弹性杆的下表面的中间位置时,FBG 处于压应变调谐状态。

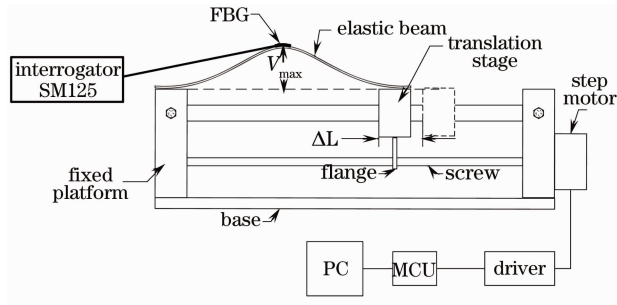


图 1 FBG 压杆调谐结构

Fig. 1 Schematic diagram of the tunable FBG based on a two-fixed-end elastic beam

温度保持不变时,单纯轴向应变引起的 FBG 布拉格波长的相对漂移量可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\epsilon, \quad (1)$$

式中 P_e 为光纤的有效弹光系数,对于石英系光纤 P_e 一般约为 0.22, ϵ 为考察点处轴向应变。

由材料力学知道^[6],弹性杆在弯曲时应变的大小可以表示为

$$\epsilon = \frac{y}{\rho}, \quad (2)$$

式中 ρ 为曲率半径, y 为光栅的粘贴面距离弹性杆中性层的距离。

两端固定压杆在弯曲变形以后沿杆任意位置 z 处的挠度可表示为

$$v(z) = \frac{V_{\max}}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi z}{L - \Delta L} \right), \quad (3)$$

式中 ΔL 为移动平台的移动距离, L 为弹性杆的长度, V_{\max} 为 ΔL 对应的挠度的最大值。

因为弹性杆在弯曲的过程中长度近似保持不变,所以对挠度的曲线积分就等于弹性杆的长度:

$$\int_0^{L-\Delta L} \sqrt{1 + \left(\frac{dv(z)}{dz} \right)^2} dz = L, \quad (4)$$

由(3),(4)式可得移动平台的移动距离 ΔL 与相应的最大挠度值 V_{\max} 的关系为

$$V_{\max} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\Delta L(L - \Delta L)}, \quad (5)$$

所以沿杆任意位置处的应变分布可以表示为

$$\epsilon = \frac{y}{\rho} = y \frac{d^2 v(z)}{dz^2} = y \frac{1}{\pi} \sqrt{\Delta L(L - \Delta L)} \left(\frac{2\pi}{L - \Delta L} \right)^2 \cos \frac{2\pi z}{L - \Delta L}, \quad (6)$$

把(6)式代入(1)式可得 FBG 波长调谐量的具体表达式为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - P_e) y \frac{1}{\pi} \sqrt{\Delta L(L - \Delta L)} \cdot \left(\frac{2\pi}{L - \Delta L} \right)^2 \cos \frac{2\pi z}{L - \Delta L}. \quad (7)$$

把 FBG 看作由多个子栅区组成^[7],每个子栅区位置 z_j 可看作常数,则(7)式可改写为

$$\Delta\lambda_{Bj} = k(z_j) \sqrt{\Delta L} \lambda_B, \quad (8)$$

k 是与 z_j 有关的常数,因此 FBG 波长调谐量与移动平台的移动距离 ΔL 成二次曲线关系。由于不同子栅区的波长移动量有差别,故会引起反射谱的展宽,FBG 的带宽展宽量 $\Delta\lambda_{BW}$ 可表示为最大谐振波长与最小谐振波长之差

$$\Delta\lambda_{BW} = \lambda_{B\max} - \lambda_{B\min} = 2n_{\text{eff}} \Delta (1 - p_e) (\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}). \quad (9)$$

光栅越短,其 ϵ_{\max} 和 ϵ_{\min} 的差别越小,带宽展宽也将越小。

3 仿真结果及分析

仿真计算所采用的弹性杆的长度 L 为 20 cm,厚度为 2 mm。图 2、图 3 分别为移动平台的移动距离 ΔL 为 0, 10, 20, 30 mm 时,沿弹性杆不同位置处的挠度值以及应变分布。图 3 是弹性杆下表面的应变分布,负号表示弹性杆在此位置产生压缩应力,正号表示拉伸应力。

从图 3 可以看出,弹性杆的中点压应变最大,从中点向两侧压应变逐渐减小且呈对称分布;如果光栅粘贴在中点位置将会出现两边对称分布的非线性啁啾。如果光栅的粘贴位置偏离中点,将会出现非

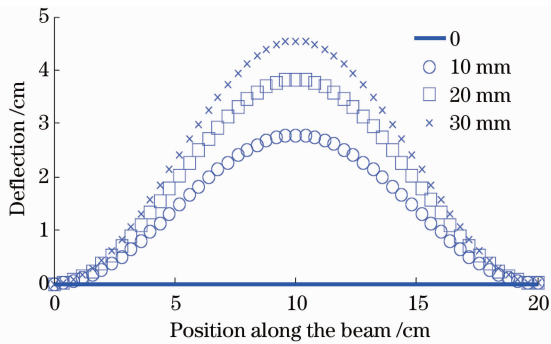


图 2 移动平台移动距离 ΔL 不同时沿弹性杆不同位置挠度分布

Fig. 2 Deflection distribution at the different position along the elastic beam with different displacement ΔL of translation stage

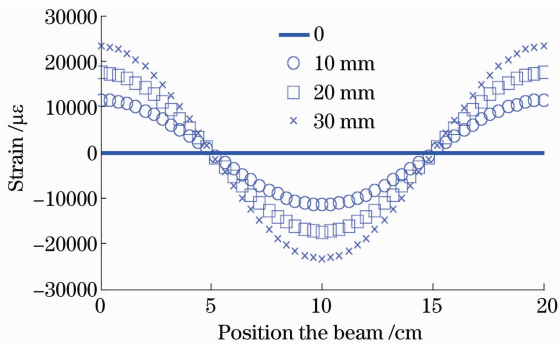


图 3 移动平台移动距离 ΔL 不同时沿弹性杆不同位置的压应变分布

Fig. 3 Compressive strain distribution at the different position along the elastic beam with different displacement ΔL of translation stage

线性啁啾。在弹性杆长度的 $1/4, 3/4$ 处是弹性杆应变的零点, 零应变点的两侧是大小相等的拉应变和压应变, 因此, 如果 FBG 居中粘贴在此两处时, 在调谐的过程中 FBG 的中心波长不会移动, 而只是由于光栅啁啾度做近似线性改变而引起带宽展宽或压窄, 可以实现 FBG 的啁啾化或者啁啾 FBG 的啁啾度调节^[8,9]。这在色散补偿方面有应用前景。

利用传输矩阵法^[10]对调谐过程中 FBG 的反射谱进行了仿真, 在仿真时选取的光纤光栅参数为: 长度为 10 mm, 周期为 534.48 nm, 有效折射率为 1.45, 折射率变化量为 4×10^{-4} , 切趾函数为高斯函数。图 4 是光栅处于自由状态和移动平台移动距离 ΔL 为 15 mm 时的反射谱。

从图 4 可以看到, 在压应变调谐的过程中, 反射波长移向短波长方向, 在反射谱的长波长方向出现了一系列的谐振峰。谐振峰产生的原因是, 处于压

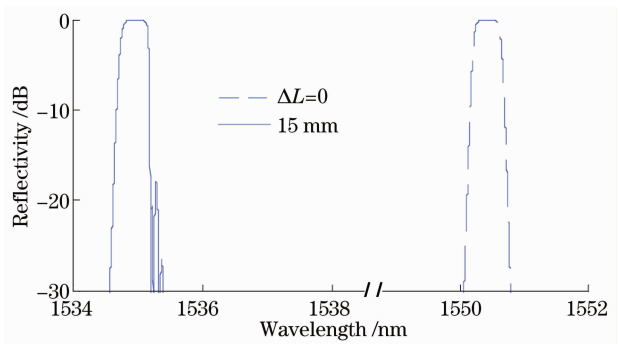


图 4 FBG 的反射谱

Fig. 4 Simulated reflection spectra of FBG

缩调谐状态时, FBG 中间压应变最大, 相应的周期改变量最大。从 FBG 的中间向两端压应变是成对称性不断减小的, 这样就出现了栅格周期沿着光栅是先减小后又增大的状况, 形成了对称分布的非线性啁啾。光从一端进入光栅后, 长波长端的光在光栅的起始端反射回去, 但由于其反射率不是 100%, 所以未被反射的一部分光继续往前传播并在光栅的另一端的对称部分被反射回来, 这两部分反射光就发生了长波长端的相干谐振。位于光栅反射谱中间和短波长部分的光, 由于光栅的对这部分光的反射率接近 100%, 所以不会存在相干谐振。仿真过程中还发现, FBG 处于拉应变调谐时, 谐振峰将出现在短波长方向。随着移动距离 ΔL 的增加, 谐振现象会越来越明显。

图 5 是在压缩调谐状态下, 移动平台的移动距离为 15 mm 时, 长度分别为 5, 10, 20 mm 的切趾 FBG 反射谱。可见, FBG 长度较小时, 反射带宽以外的光波不易产生谐振, 能很好的抑制调谐过程中的谐振峰现象的出现。因此在实验中须选用长度较短的切趾 FBG。

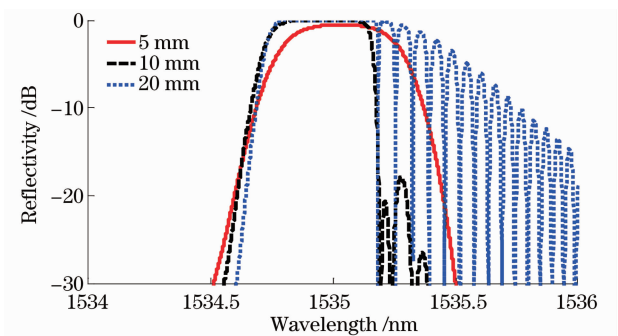


图 5 不同长度的 FBG 反射谱

Fig. 5 Simulated reflection spectra of FBGs with different grating lengths

4 实验结果

实验调谐装置(如图 1 所示)中的弹性杆为日本住友有机玻璃材料,其长度为 20 cm,宽度 5 mm,厚度为 1.5 mm。自行研制的 FBG 由 Ar⁺ 倍频激光器(244 nm)在载氢 Nufern GF1 光敏光纤中通过扫描相位模板技术刻写,长度为 5 mm,采用 Blackman 切趾,中心波长为 1557.38 nm,3 dB 带宽为 0.89 nm,反射率为 100 %。FBG 粘贴在弹性杆的中间,弹性杆的两端分别固定在固定平台和移动平台上,移动平台可以在步进电机的带动下在水平滑杆上无摆动地精密移动。通过计算机上自编的人机交互界面可随意设定其移动速度、移动距离和移动方向。步进电机驱动器具有细分选择功能,能够实现的步进电机的最小步进距离为 5 μm。调谐过程中的光谱变化由 FBG 传感解调仪(型号: Micron Optics SM125)测量,其自带扫描光源和光接收模块,波长范围为 1510~1590 nm,扫描频率为 1 Hz,波长探测精度为 1 pm。

由于 FBG 对压应变的承受能力是拉应变承受能

力的 23 倍^[11,12],所以光栅的较大范围波长调谐通常采用压应变调谐来实现。图 6(a)是移动平台位移量不同时,FBG 的反射谱。在拉应变调谐状态下,移动平台的位移量分别为 4,8 mm 时,FBG 的反射谱的中心波长分别移动到 1565.57,1568.37 nm。在压应变调谐状态下,移动平台的移动距离分别为 4,8,12,16,20,24,28,32,36,40 mm 时,对应的 FBG 反射谱的中心波长分别移动到 1550.34,1546.98,1544.50,1542.36,1540.47,1538.76,1537.18,1535.70,1534.29,1532.94 nm。因此,FBG 反射谱的中心波长的拉伸调谐量为 10.99 nm,压缩调谐量为 24.44 nm,几乎覆盖了整个 C 波段;出于保护光栅目的,没有继续增大调谐量。

为清晰计,抽出 FBG 在自由状态和在压缩调谐状态下移动平台的移动距离分别为 4,16,28,40 mm 时 FBG 的反射谱,如图 6(b)所示。可见,随着波长调谐量的增加,在反射谱的长波长方向出现谐振现象,而且谐振现象逐渐明显,这与前面理论仿真相吻合。

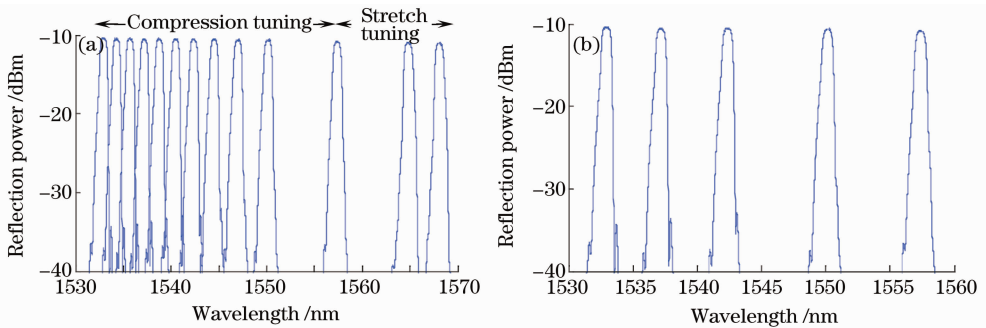


图 6 光纤光栅波长调谐反射谱图

Fig. 6 Measured reflection spectrum of wavelength tuning of fiber grating

图 7 分别为压缩调谐和拉伸调谐状态下(步进电机位移量步长均为 0.4 mm/step),移动平台的移

动距离与光栅波长改变量之间实验数据及拟合曲线。

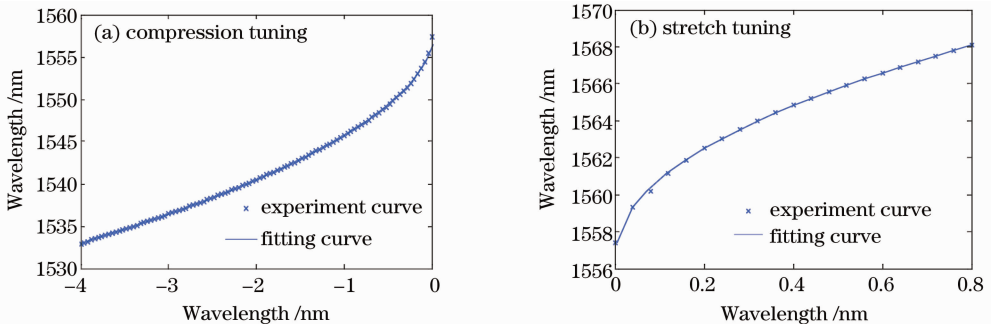


图 7 应变调谐过程中光纤光栅中心波长改变量与 ΔL 关系

Fig. 7 Central wavelength change of FBG against horizontal displacement ΔL

压缩调谐状态下拟合曲线为 $\lambda = 1557.3793 + e^{-15.8 \Delta L^{0.5353}}$, 拟合度为 $R^2 = 1$ 。拉伸调谐状态下拟合曲线为 $\lambda = 1557.3793 + e^{-15.584 \Delta L^{0.56896}}$, 拟合度为 $R^2 = 0.9999$ 。可见, 实验结果与(8)式基本吻合, ΔL 的指数上的微小差别主要来自理论推导中所作的近似处理; 另外, 光栅的粘贴质量和弹性杆的材料均匀性也可能对此有影响。

无论是拉伸调谐状态, 还是在压缩调谐状态, 波长调谐的灵敏度在开始阶段较高, 随着移动平台移动距离的增加, 波长调谐的灵敏度逐渐降低。因此, 这是一种非线性波长调谐方法, 经过定标之后, 可用于传感测量或者作为可调谐滤波器使用。另外, 定标后再通过计算机编程实现步进电机的非等步长推进, 即可实现光栅波长的等间距调谐。

实验还测量了压应变调谐状态下正反行程调谐的波长偏差和 3 dB 带宽改变量, 如图 8 所示。可见, 往返 4 cm 的移动距离调谐引起的最大波长偏移值小于 20 pm (1557.4 nm 处), 因此该调谐装置的迟滞误差为: $\delta_h = \frac{0.02}{24.4} \times 100\% = 0.08\%$, 表明调谐具有较好的可重复性。整个调谐范围内 3 dB 带宽的变化量均小于 0.09 nm。

对调谐装置的长期稳定性和机械疲劳性(主要是弹性梁的疲劳性)没有做系统的研究。另外, 文献[3]和[5]中所采用的机械调谐光纤光栅波长的方法引起的偏振相关损耗(PDL)和偏振模色散(PMD)均较低。本研究选用的弹性梁材料在调谐过程中由于应力变化肯定会一定程度上引起光纤的双折射, 但限于实验条件, 暂时没测量 PDL 和 PMD 等参量。

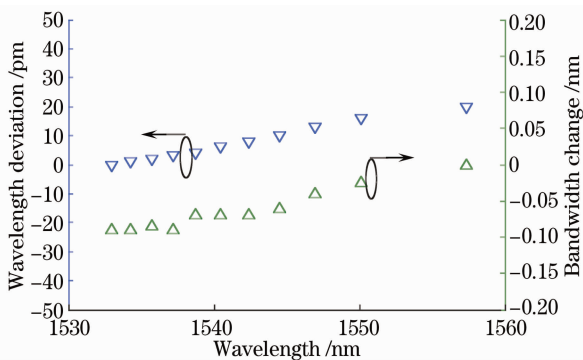


图 8 正反调谐波长偏差和 3 dB 带宽改变量

Fig. 8 Wavelength deviation and 3 dB bandwidth change during a round-trip tuning

5 结 论

提出了一种新的光纤光栅波长的非线性调谐方

法。推导出了 FBG 波长调谐量的具体表达式, 通过自行设计的计算机编程控制步进电机驱动的调谐装置进行了 FBG 波长调谐实验。验证并分析了调谐过程中出现的谐振峰现象, FBG 中心波长的双向准无啁啾调谐量大于 35 nm, 迟滞误差为 0.08%, 调谐过程中 3 dB 带宽的改变量小于 0.09 nm。该调谐方法通过定标后在位移传感^[13]、压力传感^[14]和可调谐激光器等方面将有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- 1 G. Meltz, W. W. Morey, W. H. Glenn. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(15): 823~825
- 2 H. G. Limberger, Nguyen Hong Ky. Efficient miniature fiber-optic tunable filter based on in intracore Bragg grating and electrically resistive coating[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(3): 361~363
- 3 M. R. Mokhtar, C. S. Goh, S. A. Butler *et al.*. Fiber Bragg grating compression-tuned over 110 nm[J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(6): 509~511
- 4 C. S. Goh, S. Y. Set, Kazuro Kikuchi. Widely tunable optical filters based on fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(9): 1306~1308
- 5 C. S. Goh, M. R. Mokhtar, S. A. Butler *et al.*. Wavelength tuning of fiber Bragg gratings over 90 nm using a simple tuning package[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(4): 557~559
- 6 Luo Yaogang, Gao Lingxia, Liu Guili *et al.*. Theory of Materials Mechanics[M]. Beijing: Science Press of China, 2004
罗跃纲, 高凌霞, 刘贵立等. 材料力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004
- 7 Guo Tuan, Liu Bo, Zhang Weigang *et al.*. Research on optical fiber grating chirp-sensing technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 828~834
郭 团, 刘 波, 张伟刚等. 光纤光栅啁啾化传感研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 828~834
- 8 Dong Xinyong, Liu Zhiguo, Kai Guiyun *et al.*. A novel method to chirp fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10): 1275~1277
董新永, 刘志国, 开桂云等. 一种新颖的光纤光栅带宽调谐方法[J]. *光学学报*, 2001, **21**(10): 1275~1277
- 9 Tu Qinchang, Zhang Weigang, Chen Jiangjun *et al.*. A novel high-sensitivity chirped tuning device of fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1153~1156
涂勤昌, 张伟刚, 陈建军等. 一种新颖的高灵敏度光纤光栅带宽调谐机构[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1153~1156
- 10 T. Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 11 G. A. Ball, W. W. Morey. Compression-tuned single-frequency Bragg grating fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(23): 1979~1981
- 12 A. Iocco, H. G. Limberger, R. P. Salathe *et al.*. Bragg grating fast tunable filter for wavelength division multiplexing[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(7): 1217~1221

- 13 Zhang Jinlong, Yu Chongxiu, Wang Kuiru *et al.*. Displacement sensor with temperature compensation based on chirp fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 779~782
张锦龙, 余重秀, 王葵如等. 基于啁啾光纤光栅的温度自补偿位移传感器[J]. 光学学报, 2008, **28**(4): 779~782

- 14 Li Zhizhong, Yang Huayong, Cheng Yusheng *et al.*. Pressure sensing characteristics of panda fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 157~162
李智忠, 杨华勇, 程玉胜等. 熊猫光纤光栅压力传感特性研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(1): 157~162

《中国激光》“新型光纤传感器件及网络技术”专题 征 稿 启 事

光纤传感是光传感领域的重大技术革命, 光纤传感以其独特的优越性, 已成为现代传感技术发展的主流方向。光纤传感是一门发展十分迅速的新兴技术科学, 所提出的新原理、新方法和新技术已取得了诸多辉煌的成就。同时, 伴随着网络技术的发展, 光纤传感对现代光传感技术的发展产生了不可估量的作用。《中国激光》计划于 2010 年 6 月推出“新型光纤传感器件及网络技术”专题栏目, 现特向国内外广大专家学者征集“新型光纤传感器件及网络技术”方面原创性的研究论文和综述, 旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 光纤传感及网络技术: 如基于光纤及光纤光栅的化学、生物、环境、物理、机械等传感器件、传感系统及传感网络技术等;
- 新型光纤传感及技术: 如光纤干涉及偏振传感技术、光子晶体光纤传感技术、微光纤传感技术等;
- 分布式光纤传感技术: 如以拉曼散射、布里渊散射等为基础的光纤传感技术;
- 光纤智能结构和材料: 包括结构设计、诊断方法、制作工艺、典型应用等;
- 用于光纤传感的无源及有源器件: 如光源\探测器等;
- 其他

特邀组稿专家:

徐安士 教授 北京大学

张伟刚 教授 南开大学

截稿日期: 2010 年 3 月 20 日

投稿方式以及格式: 可通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“新型光纤传感器件及网络技术”投稿), 详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>。本专题投稿文体不限, 中英文皆可, 其电子版请使用 MS-word 格式, 有任何问题请咨询马沂编辑, E-mail: CJL@siom.ac.cn; 电话: 021-69918427。

《中国激光》编辑部