

基于光纤光栅斯托克斯参量的压力传感测量研究

叶振兴 苏 洋 朱 勇 彭 晖 张启业

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要 利用光纤光栅的偏振特性感知外界参量变化是光纤光栅传感的新研究热点。提出利用光纤光栅第一斯托克斯参量 s_1 感知外界压力的新方法。推导了光纤光栅压力所致线双折射和 s_1 参量的关系,建立了压力、线双折射和 s_1 参量三者之间的关系模型,分析了线偏振光入射角度对 s_1 参量的影响。仿真表明,偏振光入射角度影响 s_1 曲线的基准值,同时也影响左右波长测量点的对称性和线性度。利用光纤光栅和高速在线检偏器搭建了实时压力测量系统,测量了不同偏振光入射角度下 s_1 参量受压力所致线双折射的影响曲线,验证了理论仿真结果。

关键词 光栅; 光纤光栅; 偏振态; 线双折射; 斯托克斯参量

中图分类号 TN913.7 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0605003

Study on the Pressure Sensing Measurement Based on Stokes Parameters of Fiber Gratings

Ye Zhenxing Su Yang Zhu Yong Peng Hui Zhang Qiye

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract Polarization properties of gratings become a research hotspot of fiber Bragg grating based sensors. A new pressure measurement method based on the first normalized Stokes parameter s_1 is analyzed. The relationship between s_1 parameter and linear birefringence is studied and the causal model of s_1 parameter, linear birefringence and pressure is given. The effects on s_1 parameter of incident angles of linearly polarized light are researched. The results show that the base value and linearity of s_1 parameter are affected by the incident angles of linearly polarized light. A real-time pressure measurement system with fiber Bragg gratings and in-line polarimeter is set up. The curves of s_1 parameter with different pressure values are measured and the feasibility of the theory is proved.

Key words gratings; fiber grating; state of polarization; linear birefringence; Stokes parameter

OCIS codes 050.2770; 060.2370; 060.2380

1 引 言

关于压力传感的方法很多,基于压阻式传感、基于光纤压力的传感和基于光纤光栅波长偏移的传感等^[1,2]。压阻式传感法一般利用压力敏感器件把压力转换成电阻率或弹性器件位移,由于受到电路的限制,响应速度过慢,不能实现实时测量。基于光纤光栅波长偏移的传感法具有明显的交叉敏感问题,温度和应力都会引起波长的偏移,会影响压力的检测结果。

近年来,许多人开始利用偏振信息进行传感研

究^[3-5],本课题组提出了基于光纤光栅斯托克斯参量的压力传感方法。仿真结果表明,在一定的波长范围内,第一斯托克斯参量 s_1 和压力所致线双折射存在线性比例关系,而压力所致线双折射和压力也成正比关系。因此,通过测量一定波长范围内的 s_1 参量便能知道光栅的受力情况,这种方法较好地克服了压力和温度的交叉敏感问题。

本文主要对基于光纤光栅 s_1 参量的压力传感方法进行定性分析,确定该方法的可行性,以便下一步进行更深入的研究。推导了压力、压力所致线双

收稿日期: 2012-02-14; 收到修改稿日期: 2012-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(60871075)资助课题。

作者简介: 叶振兴(1987—),男,硕士研究生,主要从事光传感技术方面的研究。E-mail: yezhen18@sohu.com

导师简介: 朱 勇(1971—),男,教授,硕士生导师,主要从事光信息技术方面的研究。E-mail: jlzhuy@163.com

折射和 s_1 参量的关系,介绍了光栅物理参量对 s_1 参量的影响,分析了线偏振光入射角度为 $\pi/6, \pi/4$ 和 $\pi/3$ 时 s_1 参量的测量性能。利用 General Photonics (GP)公司生产的高速在线检偏器搭建了压力实时测量系统,测量了不同偏振光入射角度下 s_1 参量受压力所致线双折射影响的曲线,验证了理论仿真结果。

2 基础理论

2.1 光纤光栅压力所致线双折射效应

理想单模光纤的纤芯是规则的圆,光的电场矢量在各个方向上的传播速率相同。当对光纤施加一定的压力时,其纤芯就近似成为一个椭圆。光的电场矢量在长轴方向上的传播速度较慢,称为慢轴;在短轴方向上速度较快,称为快轴,这就是光纤的线双折射效应。

受力沿着光纤光栅传播方向的分量称为应力,垂直于传播方向的分量称为压力。压力影响光纤光栅是由于光栅周期的伸缩和弹光效应引起的,当光纤光栅受到横向均匀分布的压力时,由于光纤的形变导致折射率发生变化,快慢轴方向上的折射率变化会因为光弹系数的不同而有所差异。研究表明,光栅压力和快慢轴折射率差可表示为^[6]

$$F = \frac{1}{(K_x - K_y)} LD \Delta n, \quad (1)$$

式中 F 为光纤光栅上的压力, D 为光纤直径,普通单模光纤直径约为 $125 \mu\text{m}$, L 为布拉格光栅受力长度,快慢轴上常数 $K_x = 7.73 \times 10^{-12} \text{ Pa}$, $K_y = -1.54 \times 10^{-12} \text{ Pa}$ 。

2.2 偏振态的斯托克斯参量表示

描述光偏振态的方法很多,常见的有三角函数法、琼斯矩阵法和斯托克斯参量法。其中斯托克斯参量法是最常见的方法,它能表示部分偏振光、完全偏振光和自然光,定义为^[7]

$$S_0 = |E_{ox}|^2 + |E_{oy}|^2, S_1 = |E_{ox}|^2 - |E_{oy}|^2, \\ S_2 = 2\text{Re}(E_{ox}E_{oy}), S_3 = 2\text{Im}(E_{ox}E_{oy}), \quad (2)$$

式中 S_0 表示偏振光的总光强; S_1 给出了 x 分量和 y 分量的强度差,根据该光波是 x 线偏振占优势或 y 线偏振占优势还是大小均衡,其值分别记为正、负或零; S_2 表示 $+\pi/4(-\pi/4)$ 线偏振分量的强度差,若 $+\pi/4$ 线偏振占优势,则其值为正, $-\pi/4$ 线偏振占优势,其值为负,若这两个线偏振分量相等,则其值为 0; S_3 的正、负、零值分别表示波的右旋偏振态、左旋偏振态或线偏振态。把 S_1, S_2 和 S_3 除以 S_0 就可以

得到归一化斯托克斯参量 s_1, s_2 和 s_3 。

2.3 光栅中线双折射的基本理论

当光纤光栅中存在线双折射时,两个本征模折射率之间就存在 Δn 的差值。从光栅的布拉格波长计算式 $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$ 可以看出,折射率影响着谐振波长,在双折射情况下复传输系数 t 就会演变成两个传输系数 t_x 和 t_y ^[8,9],结合光栅的耦合模理论和斯托克斯参量的定义,得到 s_1 参量的表达式为^[10,11]

$$s_1 = \frac{S_1}{S_0} = \frac{T_x(\lambda) |\cos \varphi|^2 - T_y(\lambda) |\sin \varphi|^2}{T_x(\lambda) |\cos \varphi|^2 + T_y(\lambda) |\sin \varphi|^2}. \quad (3)$$

取入射起偏角为 $\pi/4$ 为例,取中心波长为 1549.36 nm ,折射率调制系数 $\delta_n = 0.72 \times 10^{-4}$,光栅长度 $L = 8 \times 10^{-3} \text{ m}$,光纤有效折射率 $n = 1.448$,仿真了 s_1 参量在线双折射改变量分别为 $0, 2 \times 10^{-5}, 4 \times 10^{-5}$ 和 6×10^{-5} 时的变化曲线如图 1 所示。

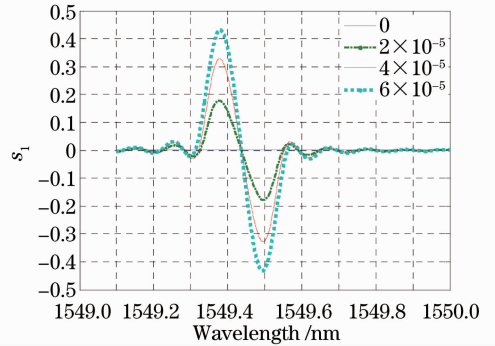


图 1 s_1 在不同线双折射时的波长相关曲线

Fig. 1 s_1 curves for different linear birefringences

当线双折射为 0 时, s_1 波长相关曲线为直线;而在一定的线双折射下, s_1 类似于正弦曲线。当线双折射大小改变时, s_1 曲线幅度随着双折射的增大而增大,并且在 s_1 峰值处线性关系最明显,因此,可以通过测量 s_1 峰值来得到线双折射的大小。从图 2 可

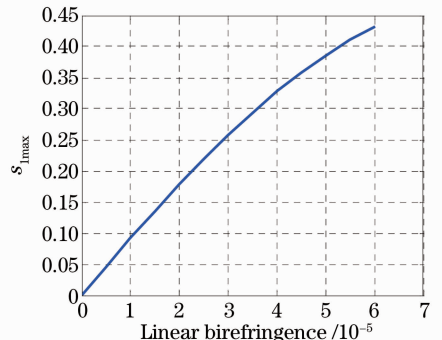


图 2 s_1 峰值随线双折射的变化

Fig. 2 Peak value of s_1 versus linear birefringence

知 s_1 峰值和线双折射关系曲线的斜率 $\kappa = \Delta s_{1\max} / \Delta n \approx 9 \times 10^3$, 结合(1)式, 便能得到压力和 s_1 参量的关系式近似为

$$F = \frac{1}{K_x - K_y} LD \frac{\Delta s_{1\max}}{\kappa}. \quad (4)$$

3 光栅物理参量和偏振光入射角度对 s_1 的影响

在光纤光栅斯托克斯参量的压力传感研究中, 光栅的物理参量(光栅的长度和折射率调制系数)和偏振光入射角度对 s_1 参量测量性能的影响很大。

为了制作具有较好测量性能的光栅, 必须选取合适的光栅长度和折射率调制系数。前期已对此做

了一定的仿真研究: 随着光栅长度的增加, s_1 曲线的幅度加大, 宽度减小, 其峰值波长测量点向中心波长处移动, 并且 s_1 峰值和线双折射的曲线线性度变差。同时, 光栅长度和 s_1 峰值的测量灵敏度成正比, 和测量范围成反比; 随着折射率调制系数的增大, s_1 曲线幅度增大, 宽度减小, 其峰值波长测量点向长波长方向移动, 并且 s_1 峰值的测量灵敏度不断增加, 测量范围不断减小。因此, 在制作光栅时, 应根据仿真结果, 选择合适的光栅长度和折射率调制系数。

除了光栅长度和折射率调制系数, 偏振光入射角度对 s_1 参量也有影响。在其他条件不变的情况下, 分别仿真了偏振光入射角为 $\pi/6, \pi/4$ 和 $\pi/3$ 时的 s_1 参量曲线, 如图 3 所示。

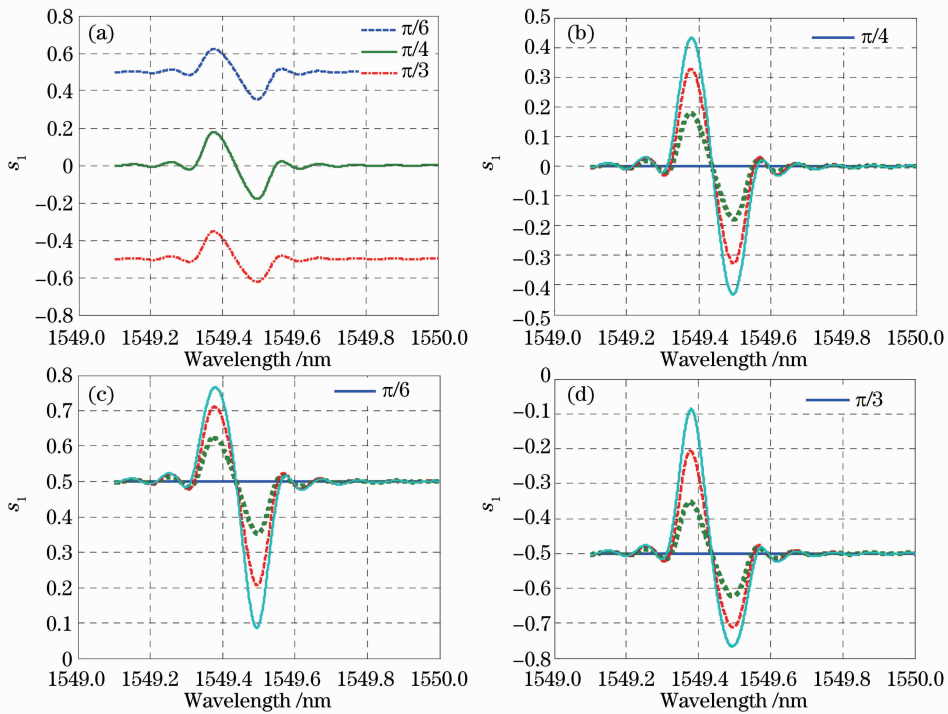


图 3 不同偏振光入射角度时 s_1 曲线

Fig. 3 s_1 for different incident angles of linearly polarized light

如图 3(a) 所示, 在其他条件不变的情况下, 偏振光入射角为 $\pi/6, \pi/4$ 和 $\pi/3$ 时 s_1 曲线的形状基本一致, 只是波形变化的基准点不同, 分别围绕 0.5, 0 和 -0.5 变化。如图 3(b) 所示, 当入射角度为 $\pi/4$, 不同线双折射时, s_1 曲线左右对称, 左右波长测量点对应的峰值变化情况相同; 如图 3(c) 所示, 当入射角度为 $\pi/6$ 时, 其左波长测量点峰值变化量越来越小, 而右波长测量点能保持比较好的线性度; 相反, 如图 3(d) 所示, 当入射角度为 $\pi/3$ 时, 其右波长测量点峰值变化量越来越小, 而左波长测量点能保持比较好的线性度。因此, 在实际的测量系统中, 偏

振光入射角度为 $\pi/4$ 时系统的测量性能最好。

4 光纤光栅压力传感系统

4.1 测量系统的搭建

根据上面的仿真结果, 利用实验室现有条件, 搭建了基于光纤光栅偏振效应的压力传感系统, 其系统框图和实物图如图 4 所示。

利用普通单模光纤制作了中心波长在 1549.36 nm, 长度为 8×10^{-3} m, 深度为 -5 dB, 折射率调制系数 $\delta_n = 0.72 \times 10^{-4}$ 的均匀光纤光栅作为调整线双折射的压力感应器件。利用可调谐激光器

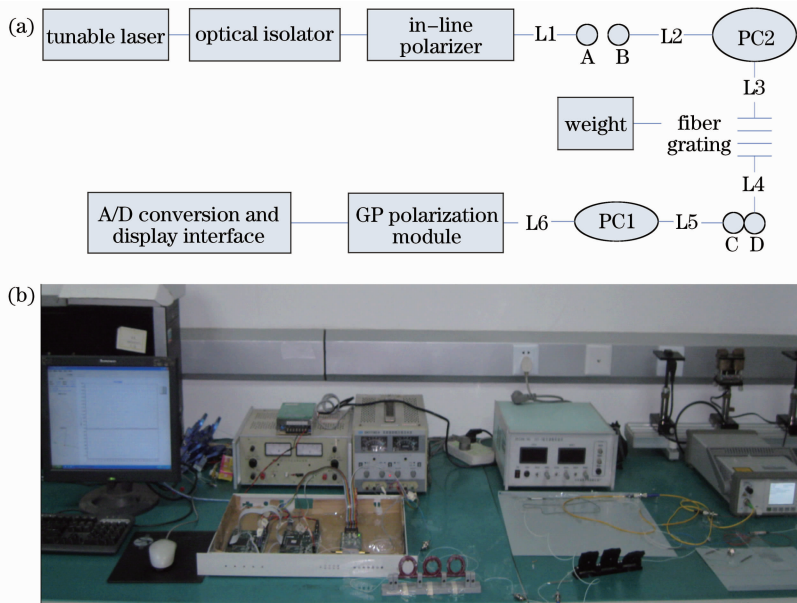


图 4 光纤光栅压力测量系统。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 4 Pressure measurement system based on fiber gratings. (a) Diagram; (b) actual picture

发出所需波长的激光,进入工作波长为 1550 nm 的在线起偏器。在线起偏器输出为一线偏振光,当线偏振光进入光纤光栅后,利用不同重量的砝码在光栅上施加压力引入不同大小的线双折射,从而造成 x 分量和 y 分量间的折射率差,引起 s_1 偏振参量的改变。

GP 高速在线检偏器是为低成本、高速度、外形小巧的偏振分析仪设计的,它把斯托克斯参量检测光路及所需电路集成在一起,无需切断数据流,输出四路模拟电压信号。通过模/数(A/D)转换,把四路模拟电压信号转换成数字信号,利用实验室自制的数据采集系统,采集四路数字电压信号,并利用 GP 模块所提供的 1550 nm 处的校正矩阵,就能实时检测出偏振信息,最终显示在用 C++ 编写的实时偏振检测显示软件界面上。

光路中的光隔离器用来隔离并减少光纤光栅和各光器件接头上的反射信号的影响。偏振控制器(PC)用来调节普通单模光纤(L2,L3,L4,L5,L6)所带来的相位差,如果不把相位差调零,则会对光栅中的线双折射变化造成一定的影响,增大实验的难度和误差。

4.2 s_1 参量测量数据分析

利用上面搭建的测量系统,把所制作的光纤光栅固定在水平的平台上,通过向光纤光栅施加不同重量的砝码(50~500 g)来改变光栅的线双折射,并通过调节在线起偏器和光纤光栅输入接口的角度来改变偏振光的输入角度。分别测量了在不同偏振光入射角度($\pi/6, \pi/4, \pi/3$)下左右波长测量点的 s_1 参量值,数据记录如表 1 所示。

表 1 不同偏振光入射角度时左右波长测量点的 s_1 参量

Table 1 Values of s_1 parameter for different incident angles of linearly polarized light

Pressure /g	Incident angle					
	Left measurement point (1549.38 nm)			Right measurement point (1549.50 nm)		
	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$
0	0.501	0	-0.502	0.501	0	-0.502
50	0.575	0.073	-0.449	0.454	-0.075	-0.579
100	0.628	0.126	-0.393	0.391	-0.128	-0.634
150	0.676	0.168	-0.352	0.356	-0.172	-0.673
200	0.693	0.209	-0.308	0.312	-0.213	-0.712
250	0.734	0.258	-0.269	0.274	-0.262	-0.732
300	0.762	0.306	-0.239	0.242	-0.302	-0.768
350	0.789	0.354	-0.195	0.193	-0.351	-0.782
400	0.792	0.389	-0.176	0.177	-0.393	-0.791
500	0.793	0.431	-0.119	0.121	-0.426	-0.793

利用 Matlab 软件对上面数据进行描点并拟合处理,得到图 5。

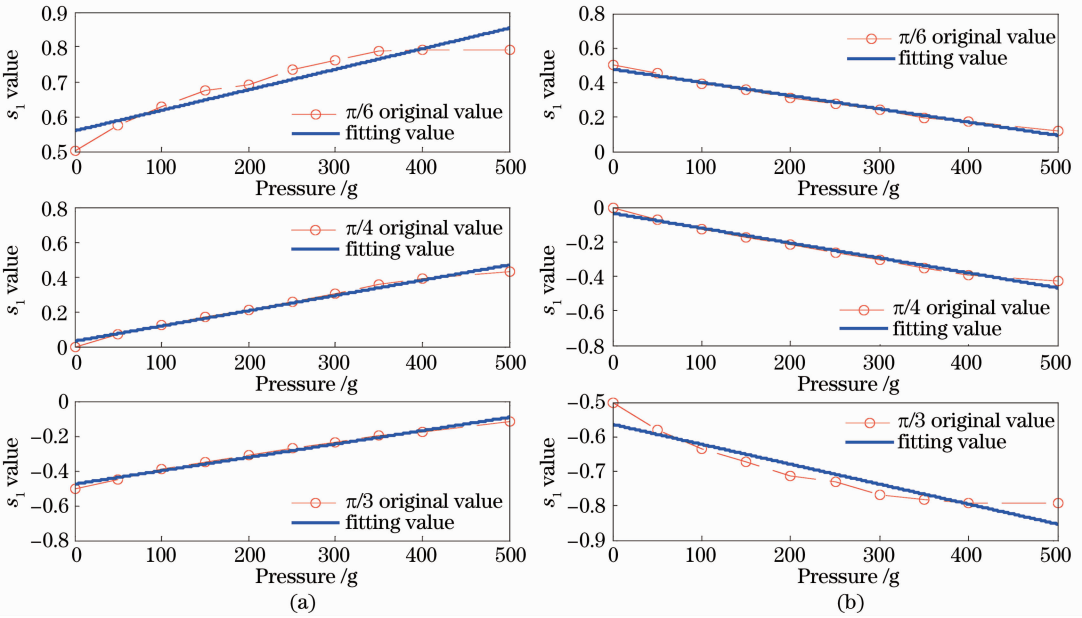


图 5 不同入射角度的(a)左、(b)右波长测量点 s_1 峰值

Fig. 5 s_1 for different incident angles of linearly polarized light at (a) left and (b) right measurement points

如图 5 所示,通过测量不同偏振光入射角度下左右波长测量点的 s_1 峰值,得到如下结果:当偏振光入射角度为 $\pi/4$ 时, s_1 峰值从基准点 0 开始变化,左右波长测量点 s_1 参量的变化趋势一致, s_1 测量值的绝对值和砝码的重量成正比,且线性度非常好;当偏振光入射角度为 $\pi/6$ 时, s_1 峰值从基准点 0.5 开始变化,左右波长测量点 s_1 参量的变化趋势不对称,在左波长测量点, s_1 峰值的变化率越来越小直至饱和,在右波长测量点, s_1 峰值能保持比较好的线性变化;当偏振光入射角度为 $\pi/3$ 时, s_1 峰值从基准点 -0.5 开始变化,在左波长测量点, s_1 峰值能保持比较好的线性增长,而在右波长测量点, s_1 峰值的变化率也越来越小直至饱和,实验现象与第 3 节中的仿真吻合。

因此,通过该实验,证实了在一定波长范围内 s_1 参量和压力具有线性关系。可以利用光纤光栅作为传感头,通过测量 s_1 参量值达到实时测量压力的目的。在测量过程中,偏振光的入射角度对测量结果有很大的影响,只有入射角度为 $\pi/4$ 时,在 s_1 参量的左右波长测量点都能达到测量目的。而如果入射角度小于 $\pi/4$ 时,为了具有比较好的线性度,则要选择 s_1 参量的右波长测量点;入射角度大于 $\pi/4$ 时,则需选择 s_1 参量的左波长测量点。

上述实验直观地证明了压力和 s_1 峰值的线性关系,但在仿真程序中是利用线双折射作为中间参量。为了进一步验证实验和仿真的吻合度,做了如

下分析:根据 2.3 节的(4)式,单模光纤直径 D 取 $125 \mu\text{m}$,布拉格光栅受力长度 L 为 $8 \times 10^{-3} \text{ m}$,仿真结果显示斜率 κ 近似为 9×10^3 ,经计算该实验中压力和 s_1 参量的关系为 $\Delta s_{1\text{max}} = 0.08343 F$ 。当施加 500 g (4.9 N) 砝码时, $s_{1\text{max}}$ 变化 0.4088 ,与图 5 中 s_1 参量峰值的实际改变量 0.42 非常接近,但还存在 0.01 左右的误差,这是由实验过程中的误差引起的,将在下一步的定量分析中减小这些误差因素。

5 结 论

根据现有压力传感器的缺点,提出了基于光纤光栅偏振效应的新型压力传感方法。深入分析了偏振态在光纤光栅中的变化过程以及第一斯托克斯参量 s_1 压力的线性关系,仿真了不同偏振光入射角度时 s_1 参量和线双折射的关系。制作了合适的光纤光栅,搭建了 s_1 参量实时测量系统。结果表明,在一定波长范围内, s_1 参量和压力具有良好的线性关系,并且在偏振光入射角度为 $\pi/4$ 时 s_1 参量的测量性能最好,仿真和测量结果相吻合。这为新型光栅传感技术的研究提供了一定的理论基础和实现方案。

参 考 文 献

- Li Zhizhong, Yang Huayong, Liu Yang *et al.*. Research on the pressure sensing mechanism of fiber Bragg grating[J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, **26**(3): 16~19
- 李智忠, 杨华勇, 刘 阳 等. 光纤 Bragg 光栅压力传感机理研究[J]. *应用光学*, 2005, **26**(3): 16~19

- 2 Yu Xianlun, Zhao Weiwei, Cheng Wei *et al.*. Research of high-pressure photonic crystal fibers sensors[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2057~2063
余先伦, 赵威威, 程伟等. 高压光子晶体光纤传感器系统的研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2057~2063
- 3 Feng Kui, Zhu Yong, Su Yang *et al.*. Analysis of magnetic field sensor with phase-shifted grating based on the polarization properties[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 763~768
冯奎, 朱勇, 苏洋等. 基于偏振特性的相移光栅磁场传感方法分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 763~768
- 4 Peng Hui, Su Yang, Li Yuquan *et al.*. Measurement for magnetic field with fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1717~1722
彭晖, 苏洋, 李玉权等. 基于光纤光栅的磁场测量新方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1717~1722
- 5 Feng Kui, Zhu Yong, Su Yang *et al.*. Analysis of the cross sensitivity of magnetic field sensor with phase-shift grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1020~1025
冯奎, 朱勇, 苏洋等. 相移光栅磁场传感方案交叉敏感分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1020~1025
- 6 Peng Hui. Research on Magnetic Field Measurement Based on Polarization Properties of Fiber Bragg Grating[D]. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2009. 70~74
彭晖. 基于光纤光栅偏振效应的磁场传感方法研究[D]. 南京: 解放军理工大学, 2009. 70~74
- 7 Qin Zhaoyu, Cheng Zhaogu, Zhang Zhiping *et al.*. High-speed and real-time measurement of Stokes parameters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 659~662
覃兆宇, 程兆谷, 张志平等. 偏振光斯托克斯参量的高速实时测量技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 659~662
- 8 Su Yang, Xu Junhua, Zhang Baofu *et al.*. Polarization states of transmitted light in linear birefringence gratings[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, **32**(3): 512~517
苏洋, 徐俊华, 张宝富等. 线双折射传感光栅中的传输光偏振态分析[J]. *应用光学*, 2011, **32**(3): 512~517
- 9 S. Bette, C. Caucheteur, Marc Wuilpart *et al.*. Theoretical and experimental study of differential group delay and polarization dependent loss of Bragg gratings written in birefringent fiber[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **269**(2): 331~337
- 10 C. Caucheteur, S. Bette, R. Garcia-Olcina *et al.*. Transverse force sensor exploiting the birefringence effect in uniform fibre Bragg gratings[C]. *SPIE*, 2007, **6585**: 65850C
- 11 C. Caucheteur, S. Bette, R. Garcia-Olcina. Transverse strain measurements using the birefringence effect in fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(13): 966~968

栏目编辑:何卓铭