

双折射光纤布拉格光栅的飞秒激光制备与传感性能

孟爱华¹, 崔丁元¹, 张轩宇¹, 陈超², 于永森¹

¹吉林大学电子科学与工程学院集成光电子学国家重点实验室, 吉林 长春 130012;

²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 应用飞秒激光直写技术刻写了熊猫型双折射光纤布拉格光栅(PF-FBG)。飞秒激光直写技术是将激光焦点聚集到光纤纤芯位置,曝光过程中匀速移动光纤,最终得到周期性的折射率调制区域。PF-FBG具有双折射特性,在波长为1550 nm附近可以得到具有双峰的反射谱结构,因此可用于多传感参数的监控。研究了PF-FBG的温度和轴向应力的传感特性。PF-FBG兼具飞秒激光诱导光栅结构的高温稳定性,在苛刻环境下化学、物理传感方面具有潜在的应用价值。

关键词 激光光学; 飞秒激光加工; 光纤布拉格光栅; 传感器; 双折射光纤; 灵敏度

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.061406

Femtosecond Laser Fabrication and Sensing Performance of Birefringence Fiber Bragg Gratings

Meng Aihua¹, Cui Dingyuan¹, Zhang Xuanyu¹, Chen Chao², Yu Yongsen¹

¹ State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China;

² State Key Laboratory of Optical and Application, Changchun Institute of Optical, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract A panda-type birefringence fiber Bragg grating (PF-FBG) is fabricated by femtosecond laser direct writing technique. To get the grating, the femtosecond laser is focused into optical fiber core. During the process of exposure, the optical fiber is moved at a constant speed. Finally, a periodic refractive index modulation area is obtained. Because of the birefringence characteristics of PF-FBG, the reflection spectrum with two peaks is generated at 1550 nm wavelength. As a result, it can be used in multi-parameter sensing monitoring. The sensing properties of temperature and axial stress of the PF-FBG are studied. Besides, the femtosecond laser induced grating shows a good stability in high temperature, and shows potential applications in chemical and physical sensing under harsh circumstances.

Key words laser optics; femtosecond laser process; fiber Bragg grating; sensors; birefringent fiber; sensitivity

OCIS codes 140.3510; 060.2310; 320.2250; 230.2285

1 引言

熊猫型双折射光纤布拉格光栅(PF-FBG)是在双折射光纤上写入的光纤光栅。由于应力区的存在,熊猫型双折射光纤两个方向的折射率不相等。在双折射光纤的纤芯位置刻写一个光栅,可引起两个方向上纤芯模式之间的耦合,实验中可得到有两个反射峰的特殊反射谱,峰值所对应的波长分别为两个方向上的谐振

收稿日期: 2017-01-21; 收到修改稿日期: 2017-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(61505206)、吉林省科技发展计划(20150520089JH)

作者简介: 孟爱华(1990—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感及激光微纳加工光学器件等方面的研究。

E-mail: jlumah2012@163.com

导师简介: 于永森(1974—),男,博士,教授,主要从事光纤传感、光纤光栅和特种光纤等方面的研究。

E-mail: yuys@jlu.edu.cn(通信联系人)

中心波长^[1-2]。跟踪检测双峰的波长变化情况可实现传感测量。

双折射光纤是保偏光纤的一种,在光纤陀螺等相关偏振光器件中得到了广泛使用。应用高双折射光纤制备的环形镜,在可调谐锁模光纤激光器及可变波长(1~2 GHz)输出掺铒光纤激光器中可起到关键作用^[3-4]。利用光脉冲在非线性光纤中传播时所满足的波动方程,推导出激光脉冲在双折射光纤中传输时所满足的耦合模方程,通过双折射光纤的快轴对线偏振光进行抽运,进而改变增益谱^[5]。徐宏杰等^[6]基于双折射光纤提出了一种波长调制的光纤拍长测试方法,采用相位补偿手段保证较高的检测灵敏度。美国电报电话公司的研究人员通过实验证明,沿两个光纤轴的孤波子通过大于1 THz的频移来补偿高达90 ps/km的偏振色散,并且可对双折射产生补偿作用^[7]。对于双折射光纤的偏振特性,武建芬等^[8]利用琼斯矩阵对基于高双折射光纤萨奈克环的反射光谱特性进行了理论分析,得出了偏振控制器、耦合比、高双折射光纤长度和折射率差及入射光偏振方向对反射谱线的影响,计算结果与已报道的实验数据相符合。以上研究大多是关于双折射光纤的相关理论研究以及偏振在工程中的应用。本文对飞秒激光加工双折射型光栅进行研究。对于掺镱的光敏性光纤,采用传统的紫外线曝光方法写入光纤布拉格光栅^[9]。但由于紫外线刻写得到的光栅结构容易被擦除,不利于长时间保存,因此采用飞秒激光进行光栅的刻写。通过改变分子间结构,使光栅结构得到永久保存^[10]。

用飞秒激光直写技术在熊猫型双折射光纤中实现了光纤布拉格光栅的刻写。将激光焦点聚焦于光纤纤芯区域,将光纤沿轴向匀速移动,逐点曝光以得到具有一定周期的光栅,形成的光栅结构具有飞秒激光诱导折射率变化的典型高温稳定性,在高温条件下不易被擦除。制备的单一PF-FBG器件在1550 nm波长附近可以观察到双峰反射谱,并对其温度和轴向应力的传感特性进行了研究。

2 基本原理

2.1 双折射光纤布拉格光栅的模式耦合理论

采用模式耦合理论分析双折射光纤布拉格光栅的光学传输特性。模式耦合理论基于麦克斯韦方程组,将无微扰光波导中得到的微扰正反向传输模式用几个耦合方程关联起来,得到受微扰情况下的各本征模式^[11]。模式间发生耦合的根本原因为光纤介质受激光作用发生了几何形变或者折射率调制,原本在光纤介质中传输且相互正交的本征模式的正交性遭到破坏,两个模式之间不再互不干扰,而是发生耦合^[12]。

对于光纤光栅而言,其导模的有效折射率 n_{eff} 的变化 δn_{eff} 可表示为

$$\delta n_{\text{eff}} = \bar{\delta} n_{\text{eff}} \left\{ 1 + s \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \varphi(z) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中 s 为折射率调制条纹的可见度; Λ 为光栅周期; $\varphi(z)$ 为光栅啁啾,即周期分布不均匀的光栅; $\bar{\delta} n_{\text{eff}}$ 为直流有效折射率的变化。对于曝光均匀的光纤光栅而言,纤芯折射率的变化量为 $\delta n_{\text{co}}(z)$ 。 $\delta n_{\text{eff}} \approx \phi n_{\text{eff}}$,其中 ϕ 为某个模式在纤芯中的限制因子。这种对光纤纤芯的折射率调制必然会影响光在纤芯中的传播。在耦合模式理论中,不同传播模式的耦合方程可用来描述周期折射率调制对光传播的微扰^[13]。

2.2 PF-FBG的传感特性

从PF-FBG的结构入手,采用同时测量双反射峰的方法测试传感。利用双折射光纤布拉格光栅的两个反射峰,在温度和轴向应力分别变化的情况下测试反射谱,得到反射谱中特征波长的变化量。为确定温度的改变量 ΔT 和轴向应力的改变量 ΔP ,需要求解矩阵方程组^[13-14]:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{P1} & K_{T1} \\ K_{P2} & K_{T2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta T \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\Delta\lambda_1$ 、 $\Delta\lambda_2$ 为两个反射峰对应的波长变化量, K_{P1} 、 K_{P2} 、 K_{T1} 、 K_{T2} 为系数。对于已经得到双反射峰的光栅结构,(2)式中的4个系数均为可通过测量而定的常数,只需再测量 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$,便可以得到温度和轴向应力的改变量。

由于快慢轴的有效折射率不同,根据 $\lambda_d = 2n_{\text{eff}}\Lambda$,可得到两个不一样的布拉格波长,体现在反射谱中即为两个距离比较近的反射峰。根据上述理论,利用这两个峰就可以实现双参量的同时测量^[15]。PF-FBG的优势在于:采用不同结构的光纤,无需将光栅加工工艺复杂化,便可解决传统单模光纤存在的问题。

3 实验结果

3.1 熊猫型双折射光纤的结构

实验选择了熊猫型双折射光纤 PM1017-C,其横截面显微镜照片和示意图如图 1 所示。

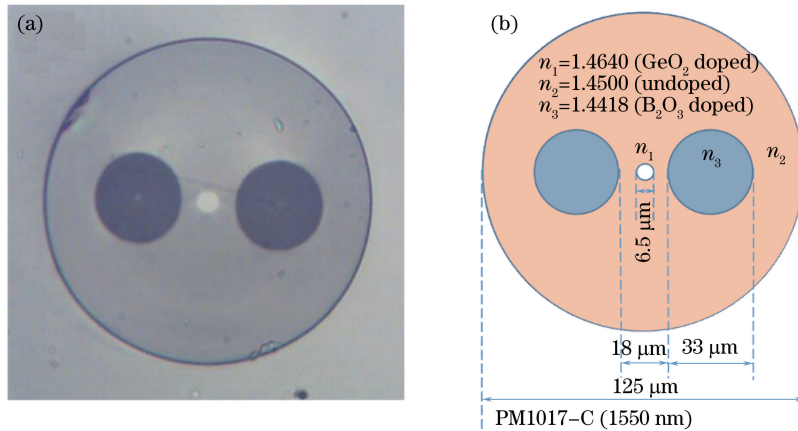


图 1 熊猫型双折射光纤的 (a)横截面显微镜照片和(b)示意图

Fig. 1 (a) Photomicrograph picture of cross section and (b) diagram of panda-type birefringence fiber

熊猫型双折射光纤是双折射光纤的一种典型结构,属于应力致变折射率调制型光纤,利用的基础原理为弹光效应。即在包层区域光纤纤芯周围对称引入一个应力区,在应力区周围产生一个热应力,从而改变周围材料的有效折射率,应力区和纤芯的具体尺寸与普通单模光纤有所不同^[16]。通常光纤纤芯为掺二氧化锗(GeO_2)的石英,而应力区为掺氧化硼(B_2O_3)的石英,包层为没有任何掺杂的纯净石英,纤芯折射率最高,应力区折射率最低。应力区为高浓度的硼掺杂,其热膨胀系数比石英材料大,在拉制光纤时的冷却工艺流程中,冷却后的应力区周围会由于热胀冷缩产生一个热应力,使得光纤拥有分布不均匀的折射率,即产生了所谓的双折射^[17]。

3.2 PF-FBG 的制备

传统的光纤光栅的加工方法是利用光纤的光敏感特性,其原理是:光纤对紫外光比较敏感,当光纤长时间被紫外激光照射时,光纤折射率会发生改变。只要利用紫外激光沿光纤轴向对光纤进行周期性的折射率调制,就可以形成布拉格光栅。随着激光器的发展,在激光加工领域,飞秒激光加工越来越引起重视。飞秒激光加工光栅的原理与传统方法完全不同,其典型特点就是具有极短的脉冲宽度和极高的峰值功率,在加工过程中,飞秒激光的高能量破坏了石英材料的晶格,从而产生了永久性的折射率调制区域。

飞秒激光经物镜聚焦后,焦点功率密度非常大,可达 $10^{14} \sim 10^{15} \text{ W/cm}^2$,与透明电介质相互作用时呈现强烈的高非线性效应。出现这种现象的原因主要是飞秒脉冲可以在短于晶格热扩散时间(皮秒量级)的尺度内将能量聚集在聚焦区域,当原子核外电子被剥离,价带电子在超短时间(飞秒量级)内迅速吸收光子能量而跃迁到导带的更高能级。飞秒激光与光纤材料的相互作用,可以使光纤材料发生各种特殊的光学性质变化,例如折射率变化、光子吸收以及荧光等。

实验中,采用飞秒激光逐点刻写的方法加工光纤布拉格光栅,其原理如图 2(a)所示。选用蓝宝石再生放大激光系统进行光栅刻写,其工作波长 $\lambda = 800 \text{ nm}$,脉冲宽度为 100 fs 。在重复频率为 100 Hz 时,脉冲能量为 50 nJ 的激光光束通过物镜(60 倍)聚焦后,将焦点控制在光纤纤芯范围内。打开光路中的光闸,曝光开始,光纤沿着光纤轴向以一定速度匀速移动,光纤纤芯区域形成了一个周期性折射率调制区域,实现了光纤布拉格光栅的制备,两个相邻曝光位置间的距离就是光纤光栅的周期。实验通过 5 维气动控制平台调整光纤与激光聚焦点之间的相对位置,控制光纤以一个恒定的速度移动,制备的光栅周期 $\Delta \approx 1 \mu\text{m}$ 。在光学显微镜下对所得光栅结构进行观察,如图 2(b)所示。

为设定光纤光栅的周期,实际操作需要控制两个变量,即激光脉冲重复频率 f 和光纤移动速度 v ,二者与光栅周期的关系为 $\Delta = v/f$ 。设计光栅周期的依据是布拉格光栅的相位匹配条件 $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Delta$ (λ_B 为光纤

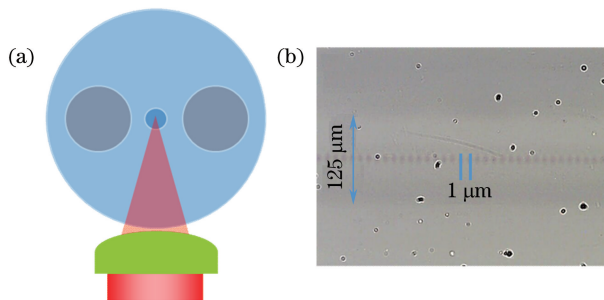


图2 (a)逐点刻写法制备布拉格光栅的示意图;(b)光栅的显微镜图

Fig. 2 (a) Schematic of Bragg grating fabricated by point to point writing method; (b) photomicrograph of grating

布拉格光栅的中心波长), 在得到设计的光栅周期后, 可以推导出光纤移动速度为

$$v = \Delta f = \lambda_B f / (2n_{\text{eff}}). \quad (3)$$

设置好 v 和 f , 将激光的焦点聚焦于光纤纤芯中, 便可以进行光栅的加工。

3.3 PF-FBG 的光谱分析

设计光谱的中心波长为 1550 nm。根据上述理论分析, 实验得到含有两个反射峰的反射谱, 两个峰对应的谐振波长在 1550 nm 附近, 分别为快、慢轴对应的谐振波长。如果能够得到良好的双峰结构, 就说明已经成功地在双折射光纤上刻写了布拉格光栅。实验得到的反射谱如图 3 所示, 其中两个峰的位置分别为 A 峰 (1549.6949 nm) 和 B 峰 (1550.1552 nm)。

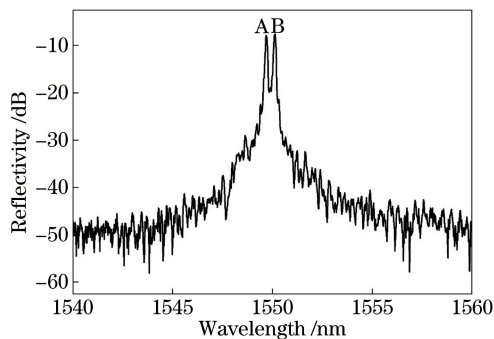


图3 PF-FBG 的反射谱

Fig. 3 Reflection spectrum of PF-FBG

4 分析与讨论

4.1 PF-FBG 的传感测试系统

图 4 所示为对制备的 PF-FBG 的反射光谱进行测量的系统, 包括超连续谱光源 (Superk Compact, NTK Photonics, 丹麦)、光谱分析仪 (AQ6370B, Yokogawa, 日本) 以及耦合器。

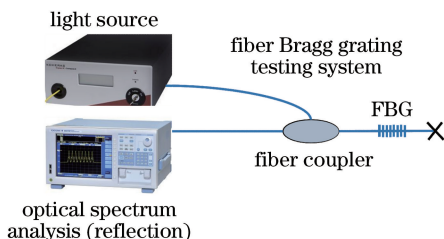


图4 PF-FBG 测试系统示意图

Fig. 4 Schematic of PF-FBG testing system

4.2 PF-FBG 的温度传感性能测试

温度传感性能测试主要是测量光纤布拉格光栅在不同温度下的反射谱变化。先记录在室温下的稳定反

射谱,并将其作为实验的对比图谱。将制备好的光栅放置在加热台上,尽可能做好保护和覆盖措施。PF-FBG 温度特性如图 5 所示,开始设置温度在 50~100 °C 范围内,每隔 10 °C 测量一次当前温度下的稳定反射谱。用 Origin 软件对数据进行处理,反射谱峰值随着温度的增加发生明显红移。

图 6 所示为在每一个温度测量点下记录双峰对应的中心波长。将这些数据与温度进行线性拟合,得到灵敏度,A 峰的温度灵敏度为 13.15 pm/°C,B 峰的温度灵敏度为 12.18 pm/°C。

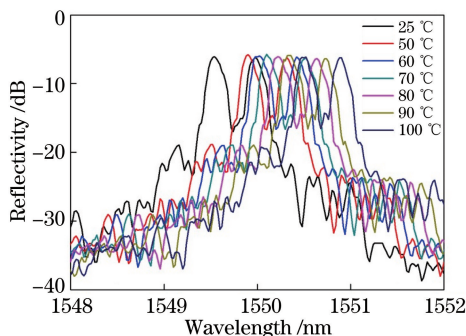


图 5 PF-FBG 温度特性

Fig. 5 Temperature characteristics of PF-FBG

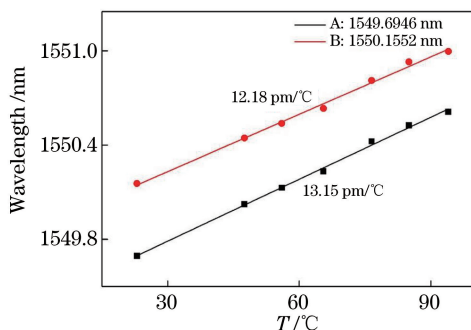


图 6 PF-FBG 温度传感性能

Fig. 6 Temperature sensing performance of PF-FBG

4.3 PF-FBG 的轴向应力传感性能测试

轴向应力传感性能测试即测量光纤布拉格光栅在不同轴向应力下的反射谱变化。首先,将制备的布拉格光栅的两端固定在轴向应力测试仪的夹具上,以保证光栅在夹具中间。然后将传感器示数清零。先记录在不受力作用下的稳定反射谱,并将其作为实验的对比图谱。不断增大轴向应力,在 0~1 N 范围内,每隔 0.1 N 记录一次当前轴向应力条件下的稳定反射谱,如图 7 所示,用 Origin 软件对得到的数据进行处理。可以看出,随着轴向应力的增大,反射谱发生明显红移。

在每个轴向应力测量点下记录反射图谱中的双峰所对应的中心波长。如图 8 所示,将这些数据与轴向应力测量点进行线性拟合,得到其灵敏度。拟合得到 A 峰的轴向应力灵敏度为 1.5281 nm/N,B 峰的轴向应力灵敏度为 1.5402 nm/N。

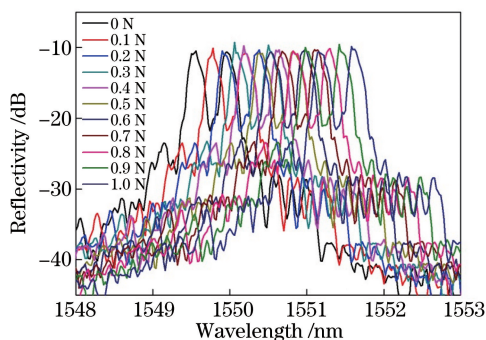


图 7 PF-FBG 的轴向应力特性

Fig. 7 Axial stress characteristics of PF-FBG

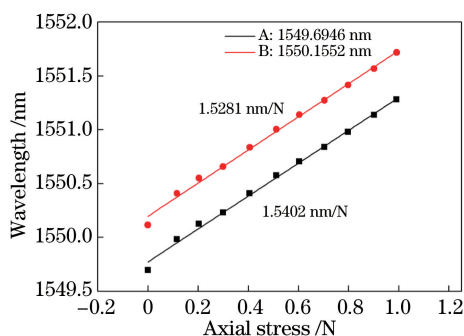


图 8 PF-FBG 的轴向应力传感性能

Fig. 8 Axial stress sensing performance of PF-FBG

4.4 PF-FBG 的传感性能分析

根据上述理论分析,采用双峰结构传感测试,实验所得的灵敏度即为方程中的 4 个系数。在传感应用中,只要知道反射谱中特征波长的变化量,通过解矩阵方程组就可以确定温度和轴向应力的改变量。将灵敏度数据代入矩阵公式中,可得矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.5281 & 0.01315 \\ 1.5402 & 0.01218 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta T \end{bmatrix}. \quad (4)$$

有双反射峰结构的光纤布拉格光栅的优势在于:仅采用不同结构的光纤,并没有将光栅加工的工艺复杂化,解决了传统单模光纤存在的加工工艺复杂的问题。

5 结 论

从布拉格光栅的光学传输特性分析入手,阐述了光纤布拉格光栅的模式耦合理论,并对光纤布拉格光栅传感器进行了说明。为了解决传统单模光纤中单一光栅器件不能进行多参数同时测量的问题,引入双折射光纤,并对 PF-FBG 的特点、制备及传感特性进行了详细分析,着重说明了 PF-FBG 反射谱的典型双峰结构。对所制备的 PF-FBG 进行了传感性能测试,拟合得到 A 峰的温度灵敏度为 13.15 pm/°C, B 峰的温度灵敏度为 12.18 pm/°C; A 峰的轴向应力传感性能的灵敏度为 1.5281 nm/N; B 峰的轴向应力传感性能的灵敏度为 1.5402 nm/N。

参 考 文 献

- [1] Bi Weihong, Li Caili, Wang Xiaoyu, *et al.* Birefringence and electro-optic properties of graphene covered microfiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026013.
毕卫红, 李彩丽, 王晓愚, 等. 覆石墨烯微纳光纤双折射与电光调控特性[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1026013.
- [2] Jiang Nuan, Li Zhizhong, Yang Huayong, *et al.* Birefringence analysis of polarization maintaining fiber and research on characteristic of all-fiber beat-length experimental systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0706003.
姜 暖, 李智忠, 杨华勇, 等. 保偏光纤双折射分析及全光纤拍长测试方法比对研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0706003.
- [3] Yang Shiquan, Li Zhaohui, Ding Lei, *et al.* Tunable actively mode-locked fiber ring laser by using a F-P LD modulator and a HiBi fiber loop mirror[J]. *Chinese J Lasers*, 2003, 30(2): 105-108.
杨石泉, 李朝晖, 丁 镭, 等. 由 LD 和高双折射光纤环境构成的可调谐锁模光纤激光器[J]. *中国激光*, 2003, 30(2): 105-108.
- [4] Yang Shiquan, Meng Hongyun, Yuan Shuzhong, *et al.* Wavelength changeable L-band Er-doped fiber laser using a high-birefringence fiber loop mirror[J]. *Chinese J Lasers*, 2002, 29(10): 868-870.
杨石泉, 蒙红云, 袁树忠, 等. 由高双折射光纤环境构成的可变波长输出的 L-波段掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2002, 29(10): 868-870.
- [5] Han Feng, Jia Weiguo, Chai Hongyu, *et al.* Raman effect on gain spectrum in low-birefringence fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0729002.
韩 凤, 贾维国, 柴宏宇, 等. 低双折射光纤中拉曼效应对增益谱的影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0729002.
- [6] Xu Hongjie, Feng Yu. Measurement of beat-length for low-birefringence fibers based on wavelength modulation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(3): 030601.
徐宏杰, 冯 宇. 基于波长调制的低双折射光纤拍长测试[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(3): 030601.
- [7] 从征. 在双折射光纤中陷获的孤波子[J]. *激光与光电子学进展*, 1989, 26(12): 38-39.
- [8] Wu Jianfen, Chen Genxiang. Analysis on reflection characteristic of HiBi fiber Sagnac rings by JONES matrix[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(9): 63-66.
武建芬, 陈根祥. 高双折射光纤 Sagnac 环反射特性的 JONES 矩阵分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(9): 63-66.
- [9] Wang Zhi, Li Xinbei, Wang Jingjing. Properties of uniform fiber Bragg grating in high birefringent photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(9): 1325-1328.
王 智, 李欣蓓, 王晶晶. 高双折射光子晶体光纤中均匀布拉格光栅的特性[J]. *光学学报*, 2006, 26(9): 1325-1328.
- [10] Liu Feifei, Zhang Xinping. Sensors based on metallic photonic structures integrated onto end facets of fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(2): 020001.
刘飞飞, 张新平. 光纤端面集成金属光子结构传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(2): 020001.
- [11] Guan B O, Tam H Y, Tao X M, *et al.* Simultaneous strain and temperature measurement using a superstructure fiber Bragg grating[J]. *Photonics Technology Letters*, 2000, 12(6): 675-677.
- [12] Mizrahi V, Sipe J E. Optical properties of photosensitive fiber phase gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(10): 1513-1517.
- [13] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, *et al.* Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647-649.

- [14] Wei Ying. Study on the sensing techniques of polarization maintaining fiber Bragg grating[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.
魏 颖. 保偏光纤布拉格光栅传感技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [15] Chen Chao. Fabrication of robust fiber gratings by femtosecond laser and their applications[D]. Jilin: Jilin University, 2014.
陈 超. 耐高温光纤光栅的飞秒激光制备及其应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [16] Zhu Hai, Li Zhizhong, Cai Peng, *et al.* Theoretical and experimental research on temperature sensing characteristics of panda fiber gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(5): 860-864.
朱 海, 李智忠, 蔡 鹏, 等. 熊猫光纤光栅温度传感特性的理论和实验研究[J]. *光子学报*, 2008, 37(5): 860-864.
- [17] Li Zhizhong. Theoretical and experimental research on sensing characteristics of birefringent fiber gratings[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
李智忠. 双折射光纤光栅传感特性的理论和实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.