

doi:10.3788/gzxb20174610.1006002

失配型双芯长周期光纤光栅弯曲矢量传感

王标¹, 庞璐¹, 张伟刚², 梁小红¹, 宁鼎¹, 耿鹏程¹

(1 中国电子科技集团公司第四十六研究所, 天津 300220)

(2 南开大学 现代光学研究所, 天津 300071)

摘 要:利用高频 CO₂ 激光单侧曝光技术及双芯光纤的非对称性, 设计并制作了一种长周期光纤光栅弯曲矢量传感器。成栅机理分析表明, 光纤边缘处嵌入的纤芯极大地增强了包层中的残余应力, 在 CO₂ 激光脉冲曝光时, 残余应力释放作用增强, 光栅质量更高; 同时, 双芯光纤的非对称结构以及 CO₂ 激光单侧曝光使得光纤器件对偏振非常敏感, 写制的光纤光栅在 1 555.4 nm 谐振波长处的偏振相关损耗高达 20.8 dB。弯曲传感测试表明, 在 0~1.235 m⁻¹ 曲率范围内, 光纤光栅向 +y 方向弯曲时, 透射谱谐振峰波长向长波方向漂移, 灵敏度为 2.37 nm/m⁻¹; 光纤光栅向 -y 方向弯曲时, 谐振峰波长向短波方向漂移, 灵敏度为 1.80 nm/m⁻¹。该弯曲矢量传感器结构简单, 灵敏度高, 可广泛应用于道路、桥梁等建筑的安全检测。

关键词: 光纤光学; 长周期光纤光栅; CO₂ 激光; 双芯光纤; 偏振特性; 弯曲; 矢量传感

中图分类号: TN29

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)10-1006002-6

Bend Vector Sensor Based on Long Period Fiber Grating Inscribed in Mismatched Twin Core Fiber

WANG Biao¹, PANG Lu¹, ZHANG Wei-gang², LIANG Xiao-hong¹,
NING Ding¹, GENG Peng-cheng¹

(1 Electronics Technology Group Corporation No.46 Research Institute, Tianjin 300220, China)

(2 Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: A long period fiber grating bend sensor was fabricated in mismatched twin core fiber by CO₂ laser irradiation. Theoretical analysis indicate that the fiber core located at the edge of the cladding greatly enhances the residual stress. Under CO₂ laser exposure, the long period fiber grating experiences a high quality. Moreover, the fiber grating is sensitive to polarization property due to the asymmetrical structure, the polarization dependent loss value of the long period fiber grating is as high as 20.8dB at the resonant wavelength of 1 553.3 nm. Sensing experiment reveals that it can distinguish the orientation of the curvature by the resonant peak showing a red or blue shift. The fiber grating experiences significant sensitivities of 2.37 nm/m⁻¹ and 1.80 nm/m⁻¹ with the micro-bending range of 0~1.235 m⁻¹ for +y and -y axis directions. The proposed sensor has the advantages of simple structure and high sensitivity. It could be used in struction health monitoring applications including roads and bridges.

Key words: Fiber optics; Long period fiber gratings; CO₂ laser; Twin core fiber; Polarization property; Bend; Vector sensor

OCIS Codes: 060.2300; 060.2310; 060.2370; 060.2400; 060.3738; 060.3735

0 引言

长周期光纤光栅(Long Period Fiber Gratings, LPFG)因其灵敏度高、结构精巧、抗电磁干扰强等优势,

基金项目: 国家自然科学基金(No.61405179)资助

第一作者: 王标(1988-), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为光纤光栅传感技术. Email: biao_wang@126.com

通讯作者: 张伟刚(1959-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: zhangwg@nankai.edu.cn

收稿日期: 2016-12-07; 录用日期: 2017-03-06

<http://www.photon.ac.cn>

广泛应用于温度^[1-2]、弯曲^[3]、应力^[4]、折射率^[5]、扭转^[6]等的测量中.近年来,利用 LPFG 实现的矢量弯曲测量技术在道路、桥梁等建筑的安全检测中起到了至关重要的作用.为了获得可以同时测量弯曲大小和方向的光纤传感器,研究人员在非对称结构的光纤上写入了 LPFG.2000 年,Patrick H J 在偏芯光纤上写入了 LPFG,研制的矢量传感器在 $\pm 2.2 \text{ m}^{-1}$ 曲率范围内,谐振峰漂移 20 nm ^[7].2004 年,Allsop T^[8] 和 Zhao Donghui^[9] 等先后在 D 型光纤上写入 LPFG,均获得了性能良好的弯曲矢量传感器.但是,在小曲率范围 ($0 \sim 1 \text{ m}^{-1}$) 内,上述传感器对曲率变化的响应均不敏感.2014 年, Saffari P 等利用紫外曝光技术在多芯光纤上写入 LPFG,在 $0 \sim 1 \text{ m}^{-1}$ 曲率范围内,灵敏度达到 1.23 nm/m^{-1} ,在微弯测量中,实现了一种超高灵敏度的弯曲矢量传感器^[10].

本文设计并制作了一种基于失配型双芯光纤(Twin Core Fiber, TCF)的弯曲矢量传感器.利用高频 CO_2 激光单侧曝光技术写入的光栅,其结构可视为在两个纤芯上写入了相同周期、相同长度的 LPFG.该结构可实现纤芯模与包层模、以及两个纤芯模式之间的耦合.

1 失配型双芯光纤模式分析

实验所使用的 TCF 由我所自行研发,光纤横截面如图 1.同一个光纤包层中嵌入两个纤芯,分别记作纤芯 1(中间纤芯)和纤芯 2(外侧纤芯).光纤包层直径为 $125 \mu\text{m}$,纤芯 1 的直径为 $6 \mu\text{m}$,纤芯 2 的直径为 $9.6 \mu\text{m}$,两个纤芯之间的距离为 $35.3 \mu\text{m}$.在 1550 nm 波长处,纤芯的折射率 1.457 ,包层折射率为 1.444 .

在工作波长 1550 nm 处,可以计算出纤芯 1 的归一化频率 $V=2.366$,纤芯 1 仅可支持 LP_{01} 模.纤芯 2 的光纤归一化频率 $V=3.785$,可支持 (LP_{01} 模、 LP_{11} 模) 两个传输模式.

根据图 1 所示的光纤几何参数,利用全矢量有

限元法,计算光纤中典型的纤芯模式 (LP_{01-1} 、 LP_{01-2} 、 LP_{11-2}).图 2(a) 为典型纤芯模式的有效折射率随着波

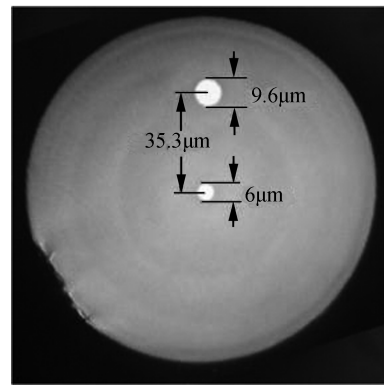
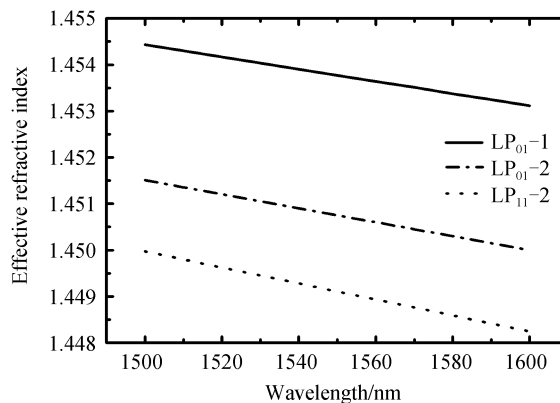
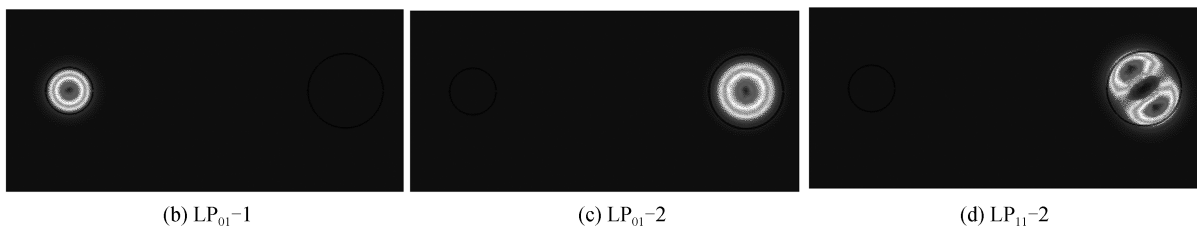


图 1 失配型双芯光纤截面图

Fig.1 Cross-section of the mismatched twin core fiber



(a) Calculated effective refractive index against wavelength for some typical core modes



(b) LP_{01-1}

(c) LP_{01-2}

(d) LP_{11-2}

图 2 双芯光纤的传导模式

Fig.2 Guided mode of the twin core fiber

长的变化曲线.在工作波长为 1550nm 处,纤芯 1 仅可支持基模 LP₀₁-1,纤芯 2 可支持基模 LP₀₁-2 以及高阶模式 LP₁₁-2.图 2(b)~(d)给出了各个纤芯模式(LP₀₁-1、LP₀₁-2、LP₁₁-2)的二维模场分布.

2 双芯长周期光纤光栅的制备

实验采用高频 CO₂ 激光打标技术写制 LPFG,实验装置如图 3.首先切取一段长度约为 4 cm 的双芯光纤.在光学显微镜的帮助下,观测其截面图,并标记好纤芯 1 和纤芯 2 的方向.然后剥去涂覆层,两端与单模光纤准直熔接.一端用光纤夹固定在三轴调节台上,另一端置于滑轮上,并在末端加上重量为 20 g 的砝码,以保证在曝光过程中光纤在轴向应力上保持恒定,整个光纤处于水平状态;CO₂ 激光通过透镜聚焦在光纤表面,聚焦后光斑直径约为 20 μm.利用软件 HANS LASER Marking System 可以控制脉冲激光的扫描轨迹.如图 3,CO₂ 激光首先沿着 x 轴方向扫描,然后沿着 y 方向偏移一个栅格周期,在计算机控制下,完成预先设定的栅格数目,这一过程称为一次循环打标.重复此循环过程,直到理想的 LPFG 谐振峰出现.实验中采用宽带光源(1 250~1 650 nm)作为输入光源,光谱仪进行输出信号的监测.

由于纤芯与包层的热膨胀系数不同,拉丝冷却后,光纤内部会存在一定的残余应力.实验中用到的失配型双芯光纤,包层边缘嵌入的一个纤芯,极大地增加了这一侧包层的残余应力.高频 CO₂ 激光单侧曝光使得纤芯 2 朝向激光曝光方向,残余应力释放作用增强,成栅质量更高.所制备的 TCF-LPFG 相当于是在两个相互平行的独立光波导(纤芯 1 与纤芯 2)上分别有一个栅格周期及栅格数目均相同的 LPFG,如图 4,分别记作 LPFG₁ 与 LPFG₂.光纤光栅耦合过程为:当光源的光经输入单模光纤耦合入双芯光纤中纤芯 1 时,在纤芯

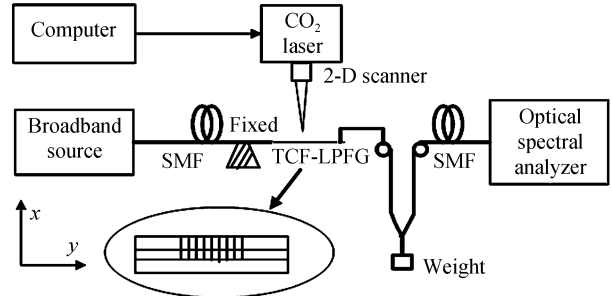


图 3 写制 TCF-LPFG 实验装置
Fig.3 Experiment setup of the fabricated TCF-LPFG

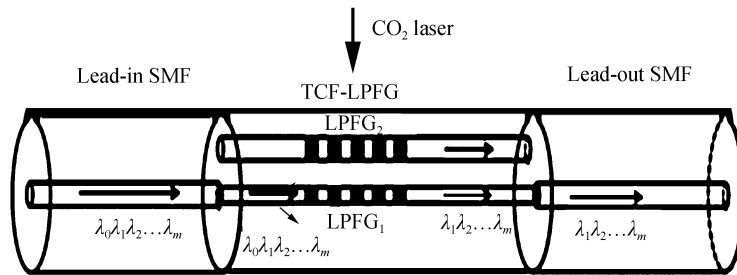


图 4 TCF-LPFG 的原理示意图
Fig.4 Schematic diagram of the TCF-LPFG

1 中以基模 LP₀₁-1 模形式传输,此时纤芯 2 中几乎没有光波传输.当传输光经过 LPFG₁ 时,纤芯 1 基模 LP₀₁-1 会耦合向高阶包层模;与此同时,包层模中携带的能量在 LPFG₂ 的作用下直接耦合到纤芯 2 中,并且以纤芯 2 中的基模 LP₀₁-2 形式传输.实验中输出的单模光纤与 TCF 的纤芯 1 准直熔接,光谱仪监测结果为纤芯 1 的透射谱,反应的是 LPFG₁ 的基模与包层模的耦合.

图 5 给出了写制 TCF-LPFG 过程中透射谱的变化.设定 LPFG 周期 Δ₀ 为 510 μm,由图中可以看出,随着打标次数的增加,LPFG 的谐振峰逐渐加深.五次打标以后,TCF-LPFG 引入的插入损耗约为 1.5 dB.最终,在透射谱上得到一系列分别位于波长

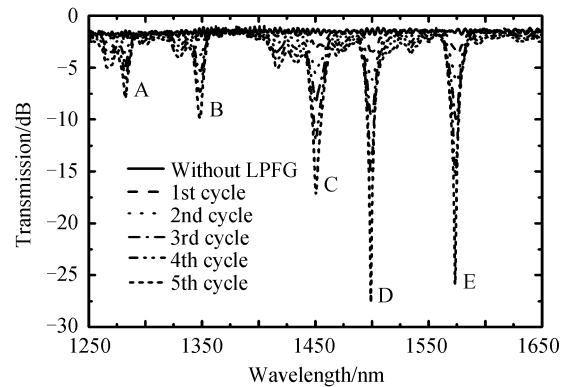


图 5 TCF-LPFG 随着打标次数透射谱的变化曲线
Fig.5 Evolution of the transmission spectra of the TCF-LPFG with the increase of scanning cycles

1 282.1 nm、1 348.3 nm、1 451.0 nm、1 499.5 nm、1 572.9 nm 的谐振峰,分别对应图 5 中的峰(A~E).谐振峰幅度最大处位于1 499.5 nm,约为-27.5 dB,3 dB带宽为2 nm.3 dB带宽的值远远小于采用相同写制方法在单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)^[11]、少模光纤^[12]以及光子晶体光纤^[13-14]写制的 LPFG,这主要是因为实验中用到的失配型双芯光纤,在包层中嵌入了一个纤芯,极大地增加了包层的残余应力,而高频 CO₂ 脉冲激光成栅机理是基于残余应力释放.当光纤受到CO₂ 激光曝光时,残余应力释放作用增强,增大了调制深

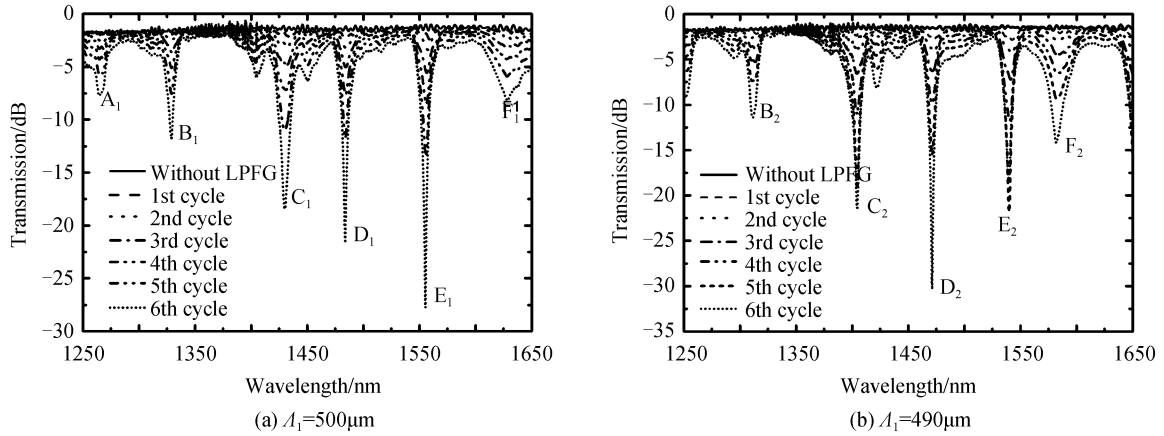


图 6 不同栅格周期的 TCF-LPFG 的透射谱随打标循环次数的变化

Fig.6 Evolution of the transmission spectra of the TCF-LPFG with the increase of scanning cycles at different periods

度,引起了 Δn_{eff} 的增加.由透射谱的 FWHM 带宽公式 $\Delta\lambda = \frac{0.8\lambda}{\Delta n_{\text{eff}}L}$ 可以看出, Δn_{eff} 越大,FWHM 带宽越窄,同理,3 dB 带宽也越窄,在传感实验中,较窄的谐振峰测量更精确.

然后,在相同的实验装置、相同的曝光方向下,写制栅格周期 Δ_1 、 Δ_2 分别为 500 μm 、490 μm 的 TCF-LPFG.TCF-LPFG 的透射谱随着打标次数的变化曲线如图 6.分别经过六次打标循环,得到了谐振峰最大强度超过 25 dB 的透射谱.图 7 为三个不同周期的 TCF-LPFG 透射谱的对比.从图中可以看出,谐振峰随着栅格周期的减小,透射谱中的谐振峰整体向短波方向移动.

3 传感性能

为了研究 TCF-LPFG 的偏振特性,取 LPFG 样品(栅格周期为 500 μm ,栅格数为 30),测量谐振峰 E₁(1 555.4 nm)处的偏振相关损耗(Polarization Dependent Loss, PDL)值.如图 8,谐振峰附近的 PDL 值高达 20.8 dB,远远高于单模光纤 PDL 值(~ 1.2 dB)^[15].这主要是由于 CO₂ 激光单侧曝光以及光纤结构的非对称性所引起的.

PDL 值越高,说明光纤截面上折射率分布非对称性越强,可以推测 TCF-LPFG 对弯曲响应快速,并具有较高灵敏度.因此,实验中对 TCF-LPFG 的弯曲响应进行了测量.弯曲装置如图 9,选取一个 LPFG(周期为 500 μm ,栅格数 30)样品用来做弯曲测试.弯曲的 LPFG 可视为一段圆弧.其曲率 C 可以表示为

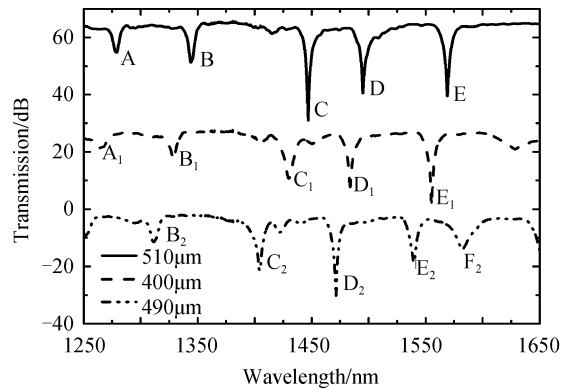


图 7 不同周期的 LPFG 透射谱

Fig.7 Transmission spectra of LPFG with different periods

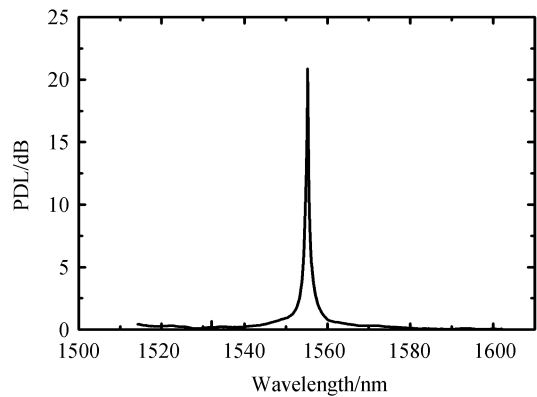


图 8 偏振相关损耗的测量

Fig.8 Polarization dependent loss of the TCF-LPFG

$$C=2h/(h^2+L^2)$$

式中, h 为弯曲位移, L 为两个狭缝的距离的 1/2, 在实验中设置为 45 mm.

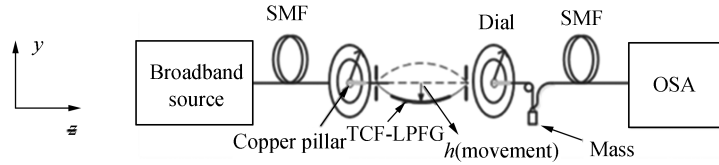


图 9 弯曲测量装置示意图

Fig.9 Schematic diagram of the experimental setup for bending measurement

在不同曲率下,记录透射谱数据,如图 10.从图中可以看出,当 TCF-LPFG 向 + y 方向弯曲时,谐振峰波长向长波方向漂移,同时振幅减小.当 TCF-LPFG 向 - y 方向弯曲时,谐振峰波长向短波方向漂移,同时振幅减小.如图 11(a),对波长的漂移进行线性拟合,在 $0\sim 1.235\text{ m}^{-1}$ 曲率范围内,其沿着 $\pm y$ 方向弯曲时,灵敏度分别为 2.37 nm/m^{-1} 和 1.80 nm/m^{-1} ,远高于利用紫外曝光方法在多芯光纤上写制的 LPFG^[10].拟合线性度分别为 0.996 和 0.988,波长漂移的线性变化也更方便实际测量应用.对谐振峰振幅的漂移进行二次曲线拟合,如图 11(b).得到其沿着 + y 和 - y 方向弯曲时,拟合曲线的二次项系数分别为 3.466 和 2.089,因此其弯曲灵

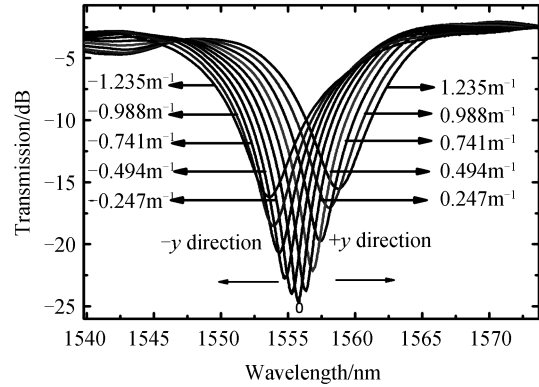


图 10 光栅透射谱随着曲率变化的漂移

Fig.10 Transmission spectra of the gratings under different curvatures

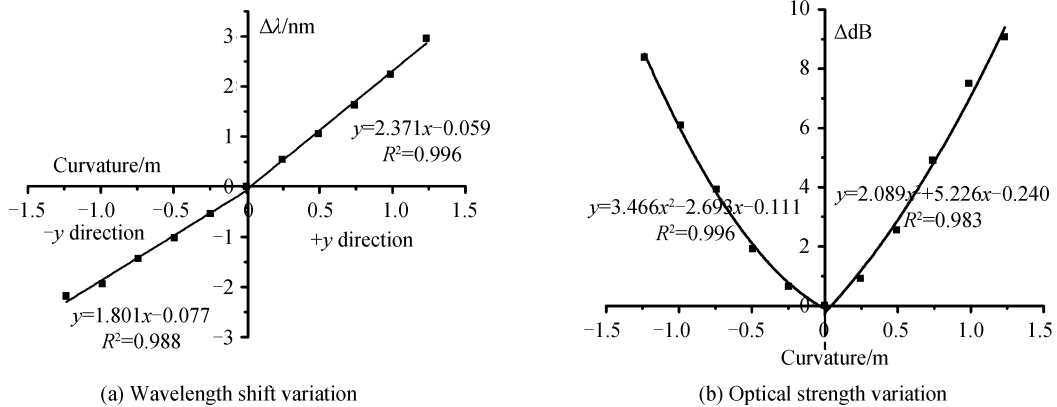


图 11 光栅透射谱随曲率变化的拟合曲线

Fig.11 Response of the transmission spectra of gratings as a function of curvatures

敏度可以表示为 6.932 dB/m^{-2} 和 4.178 dB/m^{-2} .在微弯测量范围 ($0\sim 1.235\text{ m}^{-1}$) 内,TCF-LPFG 表现出很高的灵敏度.其中波长解调可以辨别弯曲方向,谐振峰强度解调可以节约成本.

4 结论

采用高频 CO_2 激光脉冲的方法,在纯 SiO_2 包层的不匹配双芯光纤上写入 LPFG.由于双芯光纤的非对称性以及 CO_2 激光单侧曝光,光栅器件表现出良好的偏振特性.谐振峰 1555.4 nm 波长处,偏振相关损耗高达 20.8 dB .弯曲传感测试表明,该传感器在 $0\sim 1.235\text{ m}^{-1}$ 的曲率范围,向 $\pm y$ 方向弯曲时,谐振峰波长分别表现出红移、蓝移的特性,灵敏度为 2.37 nm/m^{-1} 、 1.80 nm/m^{-1} .

参考文献

- [1] URRUTIA A, GOICOECHEA J, RICCHIUTI A L, *et al.* Simultaneous measurement of humidity and temperature based on a partially coated optical fiber long period grating[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, **227**(2016): 135-141.

-
- [2] RAO Yun-jiang, RAN Zeng-ling, LIAO Xian, *et al.* Hybrid LPFG/MEFPI sensor for simultaneous measurement of high-temperature and strain[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(22): 14936-14941.
- [3] ZHONG Xing, GUAN Chun-ying, MAO Guo-pei, *et al.* Bending characteristics of a long-period fiber grating in a hollow eccentric optical fiber[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(26): 7879-7883.
- [4] HUANG Quan-dong, YU Yong-qin, RUAN Shuang-chen, *et al.* In-fiber grating fabricated by femtosecond laser direct writing for strain sensing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(11): 1216-1219.
- [5] YIN Guo-lu, WANG Yi-ping, LIAO Chang-rui, *et al.* Simultaneous refractive index and temperature measurement with LPFG and liquid-filled PCF[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(4): 375-378.
- [6] ZHOU Quan, ZHANG Wei-gang, CHEN Lei, *et al.* Bending vector sensor based on a sector-shaped long-period grating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(7): 713-716.
- [7] PATRICK H J. Self-aligning, bipolar bend transducer based on long period grating written in eccentric core fiber[J]. *Electronics Letters*, 2000, **36**(21): 1763-1764.
- [8] ALLSOP T, GILLOOLY A, MEZENTSEV V, *et al.* Bending and orientational characteristics of long period gratings written in D-shaped optical fiber[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2004, **53**(1): 130-135.
- [9] ZHAO Dong-hui, CHEN Xian-feng, ZHOU Kai-ming, *et al.* Bend sensors with direction recognition based on long-period gratings in D-shape fiber[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(29): 5425-5428.
- [10] POUNEH S, THOMAS A, ADEDOTUM A, *et al.* Long period grating in multicore optical fiber: an ultra-sensitive vector bending sensor for low curvatures[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(39): 3508-3511.
- [11] WANG Yi-ping, WANG D N, JIN W, *et al.* Asymmetric long period fiber gratings fabricated by use of CO₂ laser to carve periodic grooves on the optical fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(15): 151105.
- [12] WANG Biao, ZHANG Wei-gang, BAI Zhi-yong, *et al.* CO₂-laser-induced long period fiber gratings in few mode fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(2): 145-148.
- [13] LEE H W, CHIANG KS, CO₂ laser writing of long-period fiber grating in photonic crystal fiber under tension[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(6): 4533-4539.
- [14] WANG Yi-ping, WEI J, JIAN J, *et al.* Long period gratings in air-core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(4): 2784-2790.
- [15] BACHIM B L, GAYLORD T K. Polarization-dependent loss and birefringence in long-period fiber gratings[J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(34): 6816-6823.