

双折射率对双折射光纤环境轴向应变灵敏度的影响

江 莺^{1,2} 曾 捷¹ 梁大开¹ 倪晓宇² 周雅斌¹

(¹ 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016)
² 南京林业大学机械电子工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要 为了研究双折射率对双折射光纤环境轴向应变灵敏度的影响,选取双折射应变系数相同,双折射率不同的双折射光纤,通过数值模拟得到轴向应变灵敏度随双折射率变化的趋势。模拟结果表明轴向应变灵敏度随着双折射率增加而减小。实验选取不同双折射率光纤构建光纤环境轴向应变传感器,进行应变灵敏度对比实验,将获取的双折射率、轴向应变灵敏度数据进行曲线拟合,实验拟合曲线与仿真曲线呈现良好的一致性。结果表明,选择双折射率较小的双折射光纤作为敏感元件可以提高双折射光纤环境轴向应变灵敏度,但是双折射率存在一定下限,否则将产生微弱的干涉光谱而无法进行轴向应变测量。

关键词 光纤光学; 光纤环境; 轴向应变; 灵敏度; 干涉光谱

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1106001

Influence of Birefringence on Axial Strain Sensitivity of Birefringence Fiber Loop Mirror

Jiang Ying^{1,2} Zeng Jie¹ Liang Dakai¹ Ni Xiaoyu² Zhou Yabin¹

¹ State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China
² Institute of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University,
Nanjing, Jiangsu 210037, China

Abstract To investigate influence of birefringence on axial strain sensitivity of birefringence fiber loop mirror, change of axial strain sensitivity with birefringence is drawn by numerical simulation for the same strain dependent birefringence coefficient and different birefringences fibers. The simulation result shows that the axial sensitivity reduces with the increase of birefringence. The axial strain sensitivities of different birefringence fiber loop mirrors are compared by experiment. The curve of birefringence versus the axial strain sensitivity is fitted. The experimental fitting curve is in agreement with the simulation one. The result shows that the axial strain sensitivity can be improved by choosing a low birefringence fiber, but the birefringence can not be too low to measure axial strain because of generating weak interference spectrum.

Key words fiber optics; fiber loop mirror; axial strain; sensitivity; interference spectrum

OCIS codes 060.2370; 060.2300; 120.3180

1 引言

双折射光纤(又叫保偏光纤,PMF)环境具有制

作简单、灵敏度高、成本低、偏振无关等优势^[1-2],在应变^[3]、温度^[4]、位移^[5]、弯曲^[6]等传感测量领域得

收稿日期: 2013-02-23; 收到修改稿日期: 2013-04-05

基金项目: 国家自然科学基金(51275239)、国家自然科学基金项目国际交流(51161120326)、江苏省科技支撑计划项目(BE20111814)、航空科学基金项目(20125652055)、高等学校博士学科点专项科研基金(20123218110003)、江苏高校优势学科建设工程资助项目、国家自然科学基金青年科学基金(51005124)

作者简介: 江 莺(1976—),女,博士研究生,讲师,主要从事光纤传感器与结构健康监测等方面的研究。

E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn

导师简介: 梁大开(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事智能材料与结构、自诊断、光纤传感系统等方面的研究。

E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn(通信联系人)

到广泛的应用。灵敏度是传感器的重要指标之一，一直受到学者的关注^[7-8]。Sun 等^[2-3]提出利用高双折射光纤构建具有高灵敏度光纤环境传感器，Shen 等^[9-10]提出利用低双折射光纤构建具有高灵敏度光纤环境传感器。为进一步研究双折射率如何影响光纤环境轴向应变灵敏度，作者曾研究高双折射光纤长度、作为敏感元件的传感长度与传感灵敏度关系^[11]，曾研究监测点波长对高双折射光纤环境轴向应变灵敏度的影响^[12]。

本文基于轴向应变灵敏度理论公式，通过数值模拟得到轴向应变灵敏度随双折射率变化的趋势。实验选取三种不同双折射率光纤构建光纤环境轴向应变传感器，进行应变灵敏度对比实验，将双折射率、轴向应变灵敏度数据进行曲线拟合，并将实验拟合曲线与仿真曲线比对，以验证理论分析。本文研究对提高双折射光纤环境轴向应变、温度、位移、弯曲等灵敏度具有指导意义。

2 理论分析

双折射光纤环境原理图如图 1 所示，宽带光源经端口 1 输入 3 dB 光纤耦合器，3 dB 光纤耦合器将输入的光源 1:1 分成顺时针传输的光束 3 和逆时针传输的光束 4，当两束光经过双折射光纤时，光出现相位延迟，两束反方向传输的光在端口 2 相遇形成干涉光谱。

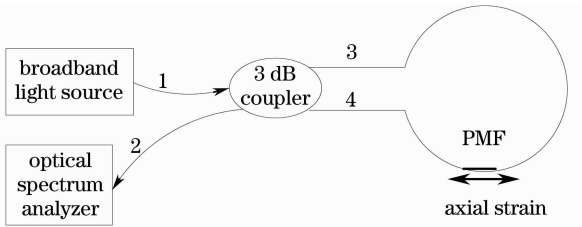


图 1 双折射光纤环境原理图

Fig. 1 Schematic of birefringence fiber loop mirror
端口 2 干涉光谱为^[13]

$$T(\lambda) = \sin^2(\theta_1 - \theta_2) \frac{1 + \cos\left(\frac{2\pi LB}{\lambda}\right)}{2} = \sin^2(\theta_1 - \theta_2) \frac{1 + \cos\theta}{2}, \quad (1)$$

式中 $\theta = \frac{2\pi LB}{\lambda}$ ， B 是双折射光纤双折射率， L 是双折射光纤长度。 λ 为干涉光谱波长， θ_1 为光束 3 初始偏振角， θ_2 为光束 4 初始偏振角。

双折射光纤受轴向应变后长度和双折射率均发生改变，导致相角 θ 改变，从而导致干涉光谱平移。

$T(\lambda)$ 为未受应变时的干涉光谱，设 $T(\lambda)$ 右移 $\Delta\lambda$ ，即 $T(\lambda - \Delta\lambda)$ 为应变后的干涉光谱，根据平移理论，由(1)式可得

$$T(\lambda - \Delta\lambda) = \sin^2(\theta_1 - \theta_2) \frac{1 + \cos\left(\frac{2\pi LB}{\lambda - \Delta\lambda}\right)}{2}. \quad (2)$$

双折射光纤受轴向应变后相角改变成 $\theta + \Delta\theta$ ，应变后干涉光谱 $T(\lambda - \Delta\lambda)$ 也可表示为^[12]

$$T(\lambda - \Delta\lambda) = \sin^2(\theta_1 - \theta_2) \frac{1 + \cos(\theta + \Delta\theta)}{2} = \sin^2(\theta_1 - \theta_2) \frac{1 + \cos\left[\frac{2\pi LB}{\lambda} + \frac{2\pi L}{\lambda}(B \times 10^{-6} + k)\epsilon_z\right]}{2}, \quad (3)$$

式中 $\Delta\theta$ 为相角变化量； k 是双折射应变系数，是由光纤材料和光纤几何特性决定的常数； $\epsilon_z = \frac{\Delta L}{L} \times 10^6 \mu\epsilon$ ，为双折射光纤轴向微应变。

由(2)式和(3)式可解出

$$\Delta\lambda = \lambda \left[1 - \frac{1}{1 + \left(10^{-6} + \frac{k}{B}\right)\epsilon_z} \right]. \quad (4)$$

当 $\epsilon_z = 1 \mu\epsilon$ 时，由(4)式可得灵敏度

$$S(\lambda) = \Delta\lambda = \lambda \left[1 - \frac{1}{1 + \left(10^{-6} + \frac{k}{B}\right)} \right], \quad (5)$$

由(5)式可知，双折射光纤环境轴向应变灵敏度与监测点波长 λ 、双折射应变系数 k 和双折射率 B 有关。

3 结果与讨论

3.1 模拟仿真结果

假设双折射光纤长度为 20 cm，双折射率 $B = 5.536 \times 10^{-4}$ ，双折射应变系数 $k = 7.3 \times 10^{-9} (\mu\epsilon)^{-1}$ ，初始偏振角 $\theta_1 - \theta_2 = \pi/4$ ，基于(3)式， $0 \mu\epsilon$ 和 $200 \mu\epsilon$ 的干涉光谱如图 2 所示，选择波峰 A 为监测点。从图中可以看出，波峰 A 的波长随着应变增加而增加，即向着长波长方向平移。基于(4)式，波峰 A 在 $0 \sim 500 \mu\epsilon$ 应变范围，波长变化 $\Delta\lambda$ 与应变的关系如图 3 所示。从图中直线可以看出，波长变化与应变呈线性关系，因此(5)式的灵敏度公式在其他应变时仍成立。

双折射光纤环境轴向应变灵敏度随监测点波长增加而增加^[12]，为了忽略监测点波长对应变灵敏度的影响，假设监测点波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 。由于高双折射光纤双折射率 B 可达 10^{-3} 量级^[9]，因此仿真选择

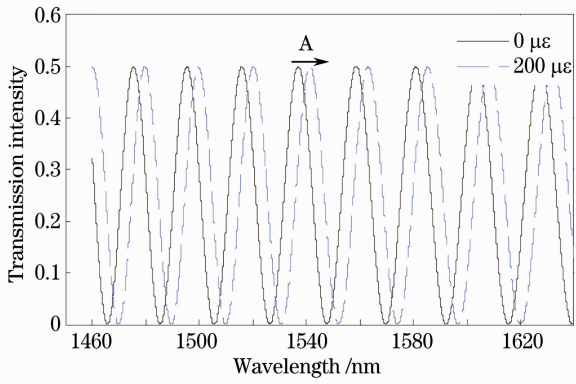


图 2 0 με 和 200 με 的干涉光谱

Fig. 2 Interference spectra when 0 με and 200 με

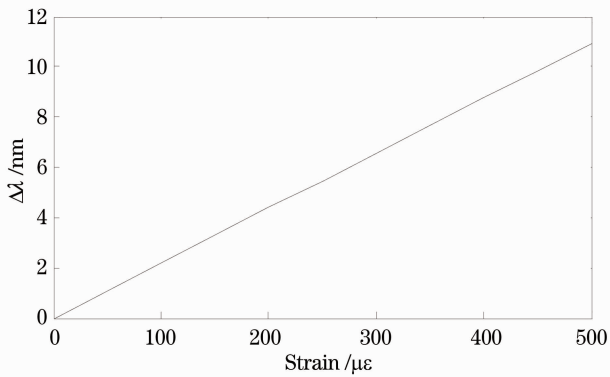


图 3 波峰 A 波长变化与应变的关系

Fig. 3 Relationship between the wavelength and the axial strain for peak A

双折射率 B 的上限为 $B=3 \times 10^{-3}$ 。根据实验,选择双折射率 $B=2.64 \times 10^{-4}$ 光纤构建双折射光纤环境,只能产生微弱的干涉光谱,以致不能进行应变测量,因此仿真选择双折射率 B 的下限为 $B=2.6 \times 10^{-4}$ 。仿真选择双折射率 B 的变化范围为 $2.6 \times 10^{-4} < B < 30 \times 10^{-4}$,基于(5)式,双折射应变系数分别为 $8.49 \times 10^{-9} (\mu\epsilon)^{-1}$ 和 $7.3 \times 10^{-9} (\mu\epsilon)^{-1}$ 的轴向应变灵敏度随双折射率变化的关系如图 4 所示。从图中可以看出,轴向应变灵敏度与双折射率 B 成反比,即应变灵敏度随着双折射率 B 增加而减小。在双折射率 B 较小区域,曲线变化趋势陡峭,在双折射率 B 较大区域,曲线变化较为缓慢。从图中 $k=8.49 \times 10^{-9} (\mu\epsilon)^{-1}$ 和 $k=7.3 \times 10^{-9} (\mu\epsilon)^{-1}$ 的两条曲线可以看出,对于相同的双折射率光纤,轴向应变灵敏度随着双折射应变系数 k 增加而增加。

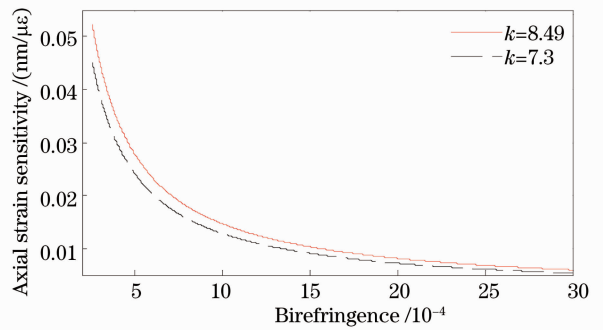


图 4 轴向应变灵敏度随双折射率变化的仿真图

Fig. 4 Relationship between the axial strain sensitivity and birefringence by simulation

3.2 实验结果

实验系统如图 1 所示,选择中心波长为 1550 nm, 3 dB 带宽为 52 nm 的 Aglient83437A 宽带光源作为入射光源,干涉光谱波形输出到型号为 AQ6317C 的光谱仪,选取光谱仪分辨率为 0.1 nm。在测试部件上粘贴双折射率 B 分别为 4.482×10^{-4} , 5.536×10^{-4} , 6.458×10^{-4} 的双折射光纤作为应变敏感元件,进行轴向应变灵敏度对比实验。为了忽略监测点波长对应变灵敏度的影响,实验选取 0 με 时波长约为 1550 nm 的波峰点为监测点。每增加 50 με,通过光谱仪读取对应监测点波长,实验测量轴向应变范围为 0~500 με,共获取 11 组数据。对不同双折射率光纤波长变化 $\Delta\lambda$ 与应变的关系线性回归拟合一次曲线,如图 5 所示。不同双折射率光纤对应的线性拟合方程、拟合度、轴向应变灵敏度如表 1 所示,根据表中实验数据计算得到对应双折射应变系数 k 。

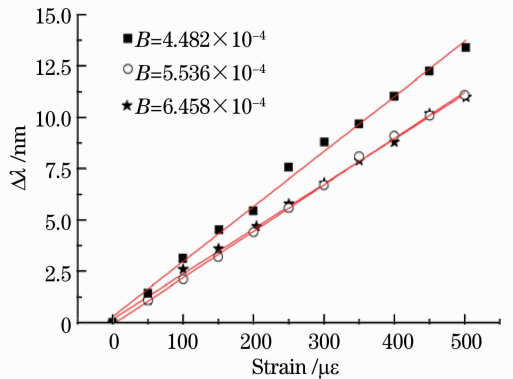


图 5 不同双折射率光纤波长变化与应变的关系

Fig. 5 Relationship between the wavelength and the axial strain for different birefringences fibers

表 1 不同双折射率光纤对应的拟合方程、线性拟合度、轴向应变灵敏度和双折射应变系数 k Table 1 Fitting equation, fitting degree, strain sensitivity and strain dependent birefringence coefficient k for different birefringences fibers loop mirrors

Birefringence	Fitting equation	Fitting degree	Strain sensitivity	$k / [10^{-9}(\mu\epsilon)^{-1}]$
4.482	$y=0.0268x+0.31226$	0.99516	0.0268	7.30
5.536	$y=0.02265x-0.07273$	0.99897	0.02265	7.54
6.458	$y=0.02192x+0.18969$	0.99801	0.02192	8.49

从表中可以看出,双折射率 $B=4.482 \times 10^{-4}$ 的光纤双折射应变系数比双折射率 $B=6.458 \times 10^{-4}$ 的光纤双折射应变系数小,基于前述轴向应变灵敏度随着双折射应变系数 k 增加而增加的理论,双折射率 $B=4.482 \times 10^{-4}$ 的轴向应变灵敏度应该小于双折射率 $B=6.458 \times 10^{-4}$ 的轴向应变灵敏度,但双折射率 $B=4.482 \times 10^{-4}$ 的轴向应变灵敏度比双折射率 $B=6.458 \times 10^{-4}$ 的轴向应变灵敏度提高了 22.26%。轴向应变灵敏度的提高应归功于双折射率的减小。双折射率 $B=4.482 \times 10^{-4}$ 的光纤,因双折射率的减小大大提高了轴向应变灵敏度,补偿了因双折射应变系数减小而引起的轴向应变负增长,同时还有很大余量,表现为其轴向应变灵敏度比双折射率 $B=6.458 \times 10^{-4}$ 的轴向应变灵敏度提高了 22.26%。

忽略双折射应变系数的影响,将三种不同双折射率光纤对应的双折射率、轴向应变灵敏度进行多项式二次曲线拟合如图 6 所示。从图中可以看出,轴向应变灵敏度随着双折射率 B 增加而减小。在双折射率 B 较小区域,应变灵敏度变化趋势陡峭,在双折射率 B 较大区域,应变灵敏度变化较为缓慢。图 6 轴向应变灵敏度随双折射率变化的关系曲线与图 4 呈现良好的一致性。其结果验证了图 4 所示的轴向应变灵敏度随双折射率变化的趋势。因此,可以选择双折射率 B 较小的双折射光纤作为敏

感元件以提高双折射光纤环境轴向应变灵敏度。但是双折射率 B 又不能太小,如果双折射率 B 太小,只能产生微弱的干涉光谱,以致无法进行轴向应变测量。实验选取双折射率 $B=2.64 \times 10^{-4}$ 的双折射光纤构建双折射光纤环境,发现此光纤环境产生微弱的干涉光谱,不能进行应变测量。由于实验条件限制,还没有找到既有极高的灵敏度,又能进行应变测量的最优的双折射率 B 。

4 结 论

基于轴向应变灵敏度理论公式,选取双折射应变系数相同、双折射率不同的双折光纤,通过数值模拟得到轴向应变灵敏度随双折射率变化的趋势,发现轴向应变灵敏度随双折射率 B 增加而减小,在双折射率 B 较小区域,应变灵敏度变化趋势陡峭,在双折射率 B 较大区域,应变灵敏度变化较为缓慢。实验选取双折射率 B 分别为 4.482×10^{-4} , 5.536×10^{-4} , 6.458×10^{-4} 的光纤作为应变敏感元件,进行光纤环境轴向应变灵敏度对比实验。将双折射率、轴向应变灵敏度数据进行二次多项式曲线拟合,实验拟合曲线与仿真曲线呈现良好的一致性。结果表明,选择双折射率 B 较小的双折射光纤作为敏感元件可以提高双折射光纤环境轴向应变灵敏度,但是双折射率 B 又不能太小,如果双折射率 B 太小,只能产生微弱的干涉光谱,以致无法进行轴向应变测量。为了寻找既有极高的灵敏度,又能进行应变测量的最优双折射率 B ,还需要进行更多的深入研究。

参 考 文 献

- 1 D H Kim, J U Kang. Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity[J]. Opt Express, 2004, 12(19): 4490-4495.
- 2 G Y Sun, H J Tang, Y H Hu, *et al.*. Strain and temperature discrimination using high birefringence fiber Sagnac interferometer with enhanced sensitivities[J]. IEEE Photonic Technol Lett, 2012, 24(7): 587-589.
- 3 X Y Dong, H Y Tam, P Shum. Temperature-insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer[J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(15): 151113.

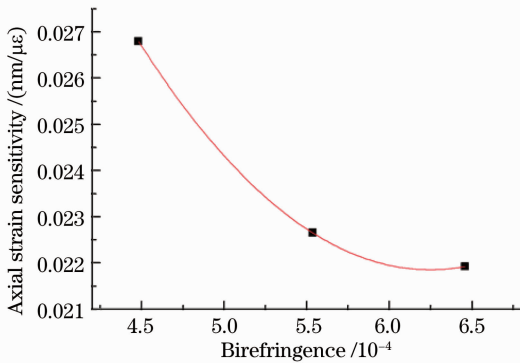


图 6 轴向应变灵敏度随双折射率变化实验拟合图

Fig. 6 Relationship between the axial strain sensitivity and birefringence by experiment

- 4 A N Starodumov, L A Zenteno, D Monzon, *et al.*. Fiber Sagnac interferometer temperature sensor[J]. *Appl Phys Lett*, 1997, 70(1): 19–21.
- 5 Y Liu, B Liu, X H Feng, *et al.*. High-birefringence fiber loop mirrors and their applications as sensors[J]. *Appl Opt*, 2005, 44(12): 2382–2390.
- 6 R M Silva, M S Ferreira, O Frazão. Temperature independent torsion sensor using a high-birefringent sagnac loop interferometer[J]. *Opt Commun*, 2012, 285(6): 1167–1170.
- 7 Kang Chong, Liu Furong, Huang Zongjun, *et al.*. The influence of spectrum width of optical source on the sensitivity of Fabry Perot optical fiber sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(3): 337–340.
康 崇, 刘芙蓉, 黄宗军, 等. 光源谱宽对法布里珀罗干涉式光纤传感器工作灵敏度的影响[J]. *光学学报*, 2004, 24(3): 337–340.
- 8 Cheng Teng, Zhang Qingchuan, Gao Jie, *et al.*. Analysis of optical readout sensitivity for uncooled infrared imaging based on optical readout[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0204002.
程 腾, 张青川, 高 杰, 等. 光学读出非制冷红外成像技术的光学灵敏度分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0204002.
- 9 C Y Shen, C Zhong, J L Chu, *et al.*. Temperature-insensitive strain sensor using a fiber loop mirror based on low-birefringence polarization-maintaining fibers[J]. *Opt Commun*, 2013, 287: 31–34.
- 10 H P Gong, C C Chan, P Zu, *et al.*. Curvature measurement by using low-birefringence photonic crystal fiber based Sagnac loop [J]. *Opt Commun*, 2010, 283(16): 3142–3144.
- 11 Jiang Ying, Liang Dakai, Zeng Jie, *et al.*. Research on axial strain sensitivity of high-birefringence fiber loop mirror [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(12): 3367–3371.
江 莺, 梁大开, 曾 捷, 等. 高双折射光纤环境轴向应变灵敏度研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(12): 3367–3371.
- 12 Jiang Ying, Liang Dakai, Zeng Jie, *et al.*. Influence of monitoring point wavelength on axial strain sensitivity of high-birefringence fiber loop mirror[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(6): 064216.
江 莺, 梁大开, 曾 捷, 等. 监测点波长对高双折射光纤环境轴向应变灵敏度的影响[J]. *物理学报*, 2013, 62(6): 064216.
- 13 W W Qian, C L Zhao, S L He, *et al.*. High-sensitivity temperature sensor based on an alcohol-filled photonic crystal fiber loop mirror[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(9): 1548–1550.

栏目编辑：王晓琰