

# 监测点波长对高双折射光纤环镜轴向应变灵敏度的影响\*

江莺<sup>1)2)</sup> 梁大开<sup>1)†</sup> 曾捷<sup>1)</sup> 倪晓宇<sup>2)</sup>

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, 南京 210016)

2) (南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037)

(2012年8月13日收到; 2012年9月12日收到修改稿)

研究了高双折射光纤环镜监测点波长对轴向应变灵敏度的影响. 经理论推导出高双折射光纤环镜轴向应变灵敏度公式. 结果表明: 当高双折射光纤材料选定后, 灵敏度随着监测点波长的增大而增大; 当监测点选定后, 监测点的灵敏度为常数, 波长变化与应变成线性关系. 实验选取不同波长的波峰进行应变灵敏度监测, 对各监测点进行数据拟合, 实验结果与理论分析一致. 研究结果对提高高双折射光纤环镜应变、温度等灵敏度具有指导意义.

**关键词:** 波长, 灵敏度, 监测点, 高双折射光纤环镜

**PACS:** 42.81.Pa, 07.60.Ly, 07.07.Df

**DOI:** 10.7498/aps.62.064216

## 1 引言

高双折射光纤环镜 (high-birefringence fiber loop mirror, Hi-Bi FLM) 在光通信和光纤传感领域的应用引起了学者的广泛关注<sup>[1]</sup>, Hi-Bi FLM 具有偏振无关、高消光比、抗外界环境干扰、制造简单、性能稳定、价格低廉等优良特性<sup>[1,2]</sup>, 主要应用于温度<sup>[3]</sup>、应变<sup>[4]</sup>、位移<sup>[5]</sup>、弯曲<sup>[6]</sup>等的测量.

灵敏度是 Hi-Bi FLM 传感器的重要性能之一, 一直受到学者的广泛关注<sup>[7-9]</sup>. 目前学者比较关注通过结构创新来改善 Hi-Bi FLM 传感灵敏度. Zhang 等<sup>[10]</sup> 通过在 Hi-Bi FLM 引入镀银探针来提高 Hi-Bi FLM 温度传感器的灵敏度; Lim 等<sup>[11]</sup> 利用两段高双折射光纤构成光纤环镜提高 Hi-Bi FLM 温度传感器的灵敏度; Sun 等<sup>[12]</sup> 利用五端高双折射光纤构成光纤环镜分别提高温度、应变的灵敏度. 这种结构创新方法, 在改善 Hi-Bi FLM 传感灵敏度同时也增加了系统的复杂性. 本文基于简单

Hi-Bi FLM 结构, 经理论推导出光纤环镜轴向应变灵敏度公式, 通过理论创新提出合理选取监测点提高 Hi-Bi FLM 测量灵敏度. 实验选取不同波长的波峰进行应变灵敏度监测, 给出灵敏度最大化的条件, 对提高 Hi-Bi FLM 应变、温度等灵敏度具有指导意义.

## 2 理论分析

Hi-Bi FLM 原理如图 1 所示. 系统由 3 dB 耦合器、光隔离器、偏振控制器和高双折射光纤组成. 隔离器保证光在环形腔内单向传输<sup>[13]</sup>, 端口 1 输入的光源经 3 dB 耦合器按 1:1 分成顺时针传输的光束 3 和逆时针传输的光束 4, 两束反方向传输的光在端口 2 形成干涉光谱.

端口 2 干涉光谱为<sup>[14]</sup>

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

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60907038, 51275239)、国家自然科学基金国际交流项目 (批准号: 51161120326)、江苏省科技支撑计划项目 (批准号: BE20111814)、航空科学基金项目 (批准号: 20125652055)、高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20123218110003) 和国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 51005124) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn

式中,  $\theta = \frac{2\pi LB}{\lambda}$ ,  $B$  是高双折射光纤双折射率,  $L$  是高双折射光纤长度,  $\lambda$  为干涉光谱波长,  $\theta_1$  为光束 3 初始偏振角,  $\theta_2$  为光束 4 初始偏振角.  $\theta_1, \theta_2$  的大小可以通过偏振控制器调节.

高双折射光纤受轴向应变后, 长度和双折射率均发生变化, 导致相角  $\theta$  改变, 由 (1) 式可得:

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{\lambda}(B\Delta L + L\Delta B), \quad (2)$$

式中,  $\Delta\theta$  为相角变化量,  $\Delta L$  为轴向长度变化量,  $\Delta B$  为双折射率变化量.

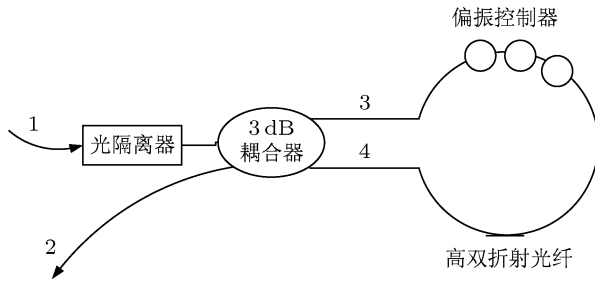


图 1 Hi-Bi FLM 原理图

高双折射光纤受到轴向应变时, 双折射率的变化  $\Delta B$  与轴向应变成正比<sup>[15]</sup>, 即

$$\Delta B = k\varepsilon_z, \quad (3)$$

式中,  $k$  是由光纤材料和光纤几何特性决定的常数,  $\varepsilon_z = \frac{\Delta L}{L} \times 10^6$ , 为高双折射光纤轴向微应变 ( $\mu\varepsilon$ ). 由 (2) 和 (3) 式可得:

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \frac{2\pi}{\lambda}(B\Delta L + Lk\varepsilon_z) \\ &= \frac{2\pi L}{\lambda}(B \times 10^{-6} + k)\varepsilon_z. \end{aligned} \quad (4)$$

高双折射光纤受轴向应变后相角改变成  $\theta + \Delta\theta$ , 干涉光谱平移. 设轴向应变前光谱  $T(\lambda)$  右移  $\Delta\lambda$  为应变后光谱  $T(\lambda - \Delta\lambda)$ , 由 (1) 式可得

$$T(\lambda - \Delta\lambda)$$

$$= \sin^2(\theta_1 - \theta_2) \frac{1 + \cos\left(\frac{2\pi LB}{\lambda - \Delta\lambda}\right)}{2}, \quad (5)$$

由 (4) 式可得

$$\begin{aligned} &T(\lambda - \Delta\lambda) \\ &= \sin^2(\theta_1 - \theta_2) \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{2\pi LB}{\lambda} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{2\pi L}{\lambda}(B \times 10^{-6} + k)\varepsilon_z \right] \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

由 (5), (6) 式可得

$$\Delta\lambda = \lambda \left[ 1 - \frac{1}{1 + \left(10^{-6} + \frac{k}{B}\right)\varepsilon_z} \right], \quad (7)$$

由 (7) 式可得灵敏度

$$S(\lambda) = \frac{\Delta\lambda}{\varepsilon_z} = \lambda \left[ 1 - \frac{1}{1 + \left(10^{-6} + \frac{k}{B}\right)} \right]. \quad (8)$$

由 (8) 式可知, 当高双折射光纤材料选定后,  $B, k$  为一确定值, 灵敏度随监测点  $\lambda$  的增大而增大. 当监测点选定后,  $\lambda$  近似为常数, 监测点的灵敏度为常数, 波长变化  $\Delta\lambda$  与应变  $\varepsilon_z$  成线性关系.

### 3 实验装置

Hi-Bi FLM 轴向应变灵敏度实验装置如图 2 所示. 该系统由宽带光源、Hi-Bi FLM、光谱仪、应变仪和四点弯曲实验台组成. 其中宽带光源 Aglient83437A 中心波长为 1550 nm, 3 dB 带宽为 52 nm, 光谱仪为 AQ6317C, 选取光谱仪分辨率为 0.1 nm. 应变仪用于标定应变大小, 分辨率为  $1 \mu\varepsilon$ . 高双折射光纤工作波长为 1550 nm, 双折射率为  $5.536 \times 10^{-4}$ .



图 2 实验装置图

### 4 实验结果与分析

通过实验架台旋转手柄施加弯曲载荷, 轴向应变约增加  $100 \mu\epsilon$ , 通过光谱仪监测光谱, 实验测量轴向应变范围为  $0 \mu\epsilon$ — $800 \mu\epsilon$ .  $0 \mu\epsilon$  光谱如图 3, 为了突出光谱能量, 图中纵坐标为光功率, 实验选取能量较大的波峰 A, B, C, D 为监测点.

$0 \mu\epsilon$ — $402 \mu\epsilon$  的干涉光谱如图 4. 从图中可以

看出, 波峰 A, B, C, D 的波长随着应变增加而增加, 即向着长波长方向平移.

对 A, B, C, D 监测点在  $0 \mu\epsilon$ — $800 \mu\epsilon$  的数据线性回归拟合一次曲线如图 5 所示. 将 Hi-Bi FLM 各监测点对应的线性拟合度、拟合曲线方程、灵敏度归纳如表 1 所示. 从表中可以看出, 随着监测点右移, 灵敏度增大, 波峰 D 的灵敏度比波峰 A 提高了 9.92%. 监测点选定后, 灵敏度为常数, 波长变化与应变成线性关系, 线性拟合度高达 0.99962.

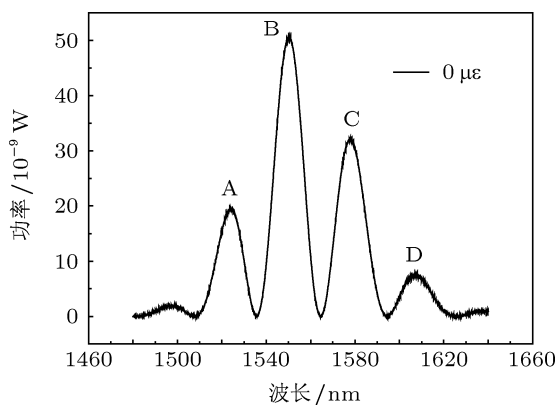


图 3  $0 \mu\epsilon$  干涉光谱能量图

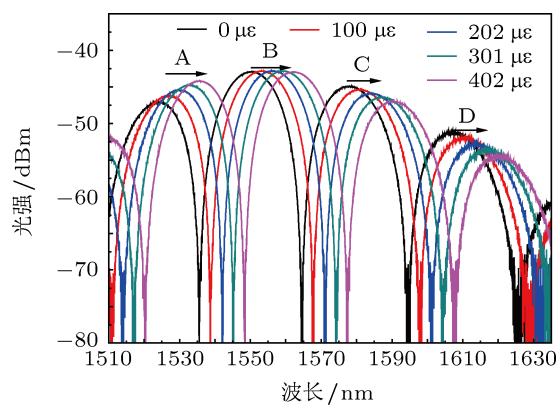


图 4 干涉光谱监测点平移图

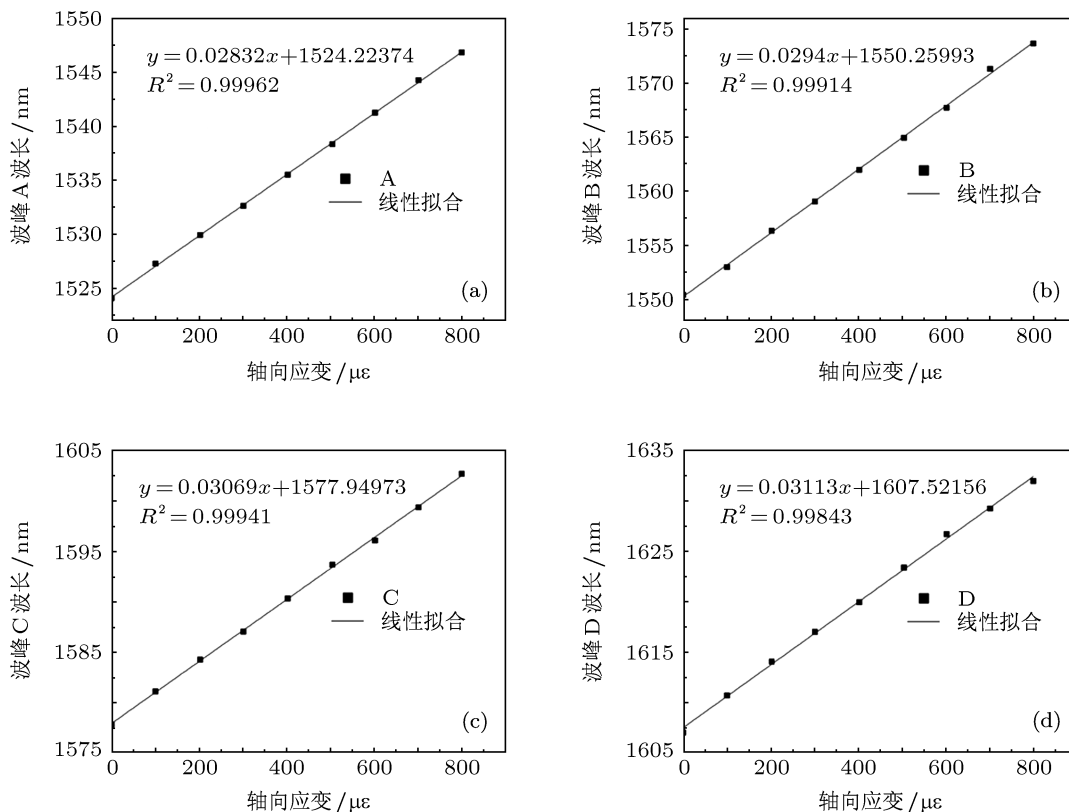


图 5 各监测点应变与波长拟合图 (a) 波峰 A; (b) 波峰 B; (c) 波峰 C; (d) 波峰 D

表1 各监测点线性拟合度、拟合曲线方程、灵敏度

监测点	线性拟合度	拟合曲线方程	应变灵敏度/nm· $\mu\text{e}^{-1}$
A	0.99962	$y = 0.02832x + 1524.22374$	0.02832
B	0.99914	$y = 0.0294x + 1550.25993$	0.0294
C	0.99941	$y = 0.03069x + 1577.94973$	0.03069
D	0.99843	$y = 0.03113x + 1607.52156$	0.03113

## 5 结论

本文从理论上推导得出光纤环镜轴向应变灵敏度的公式. 理论研究结果表明: 当高双折射光纤材料选定后, 灵敏度随着监测点波长的增大而增大; 当监测点选定后, 监测点的灵敏度为常数, 波长

变化与应变成线性关系. 实验选取不同波长的波峰进行监测, 对各监测点进行数据拟合, 实验结果与理论分析一致. 通过选取合理的监测点提高 Hi-Bi FLM 测量灵敏度, 可以减少系统的复杂性. 本文研究结果对提高 Hi-Bi FLM 温度等传感器的灵敏度同样具有指导意义.

- [1] Mortimore D B 1988 *J. Lightwave Technol.* **6** 1217
- [2] Qian W W, Zhao C L, Dong X Y, Zhang Z X, Jin S Z 2010 *J. Optoelectron. · Laser Sin.* **21** 1273 (in Chinese) [钱文文, 赵春柳, 董新永, 张在宣, 金尚忠 2010 光电子·激光 **21** 1273]
- [3] Frazão O, Egypto D, Bittencourt L A, Giraldi M T M R, Marques M B 2008 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **50** 3512
- [4] Dong X Y, Tam H Y, Shum P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 151113
- [5] Zhang H, Liu B, Wang Z, Luo J H, Wang S X, Jia C H, Ma X R 2010 *Opt. Appl.* **40** 209
- [6] Hwang K J, Kim G H, Lim S D, Lee K, Park J W, Lee S B 2011 *Jpn. J. Appl. Phys.* **50** 032202
- [7] Zhang F, Lit J W Y 1992 *Appl. Opt.* **32** 2213
- [8] Pang M, Xiao L M, Jin W 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 1422
- [9] Zhao Y, Song T T, Wu D, Wang Q 2012 *Sensor Actuat. A Phys.* **184** 22
- [10] Zhang J, Qiao X G, Guo T, Ma Y, Wang R H, Weng Y Y, Rong Q Z, Hu M L, Feng Z Y, Zhao P 2012 *IEEE Sens. J.* **12** 2077
- [11] Lim K S, Pua C H, Harun S W, Ahmad H 2010 *Opt. Laser Technol.* **42** 377
- [12] Sun G Y, Tang H J, Hu Y H, Zhou Y W 2012 *IEEE Photonic. Tech. L.* **24** 587
- [13] Wang J, Zheng K, Li J, Liu L S, Chen G X, Jian S S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7695 (in Chinese) [王静, 郑凯, 李坚, 刘利松, 陈根祥, 简水生 2009 物理学报 **58** 7695]
- [14] Fang W 2006 *M. S. Dissertation* (Tianjin: Tianjin University of Technology) (in Chinese) [方伟 2006 硕士学位论文 (天津: 天津理工大学)]
- [15] Varnham M P, Payne D N, Barlow A J, Birch R D 1983 *J. Lightwave Technol.* **19** 699

# Influence of monitoring point wavelength on axial strain sensitivity of high-birefringence fiber loop mirror\*

Jiang Ying<sup>1)2)</sup> Liang Da-Kai<sup>1)†</sup> Zeng Jie<sup>1)</sup> Ni Xiao-Yu<sup>2)</sup>

1) (State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016 China)

2) (School of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

(Received 13 August 2012; revised manuscript received 12 September 2012)

## Abstract

The influence of the monitoring point wavelength on the axial strain sensitivity of high-birefringence fiber loop mirror is investigated. The theoretical expression for the axial strain sensitivity of high-birefringence fiber loop mirror is developed. The results show that the sensitivity increases with the wavelength of the monitoring point increasing when the high-birefringence fiber material is certain, that the sensitivity is constant and the wavelength shift is linear versus strain for the certain monitoring point. The axial strain sensitivities of the different wave peaks are monitored in experiment. The experimental results of data fitting are in good agreement with the theoretical ones. The research results help to improve the strain sensitivity, the temperature sensitivity, etc. of high-birefringence fiber loop mirror.

**Keywords:** wavelength, sensitivity, monitoring point, high-birefringence fiber loop mirror

**PACS:** 42.81.Pa, 07.60.Ly, 07.07.Df

**DOI:** 10.7498/aps.62.064216

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60907038, 51275239), the Funds for International Cooperation and Exchange of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51161120326), the Science and Technology Program of Jiangsu Province, China (Grant No. BE20111814), the Aerospace Science Foundation of China (Grant No. 20125652055), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20123218110003) and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51005124).

† Corresponding author. E-mail: liangdk@nuaa.edu.cn