

doi:10.3788/gzxb20134203.0307

# 基于 Bitaper-LPFG-Bitaper 结构的全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的温度传感特性

张琪,周骏,陈金平,谭晓玲

(宁波大学 理学院 光电子技术研究所, 浙江 宁波 315211)

**摘 要:**提出并制作出一种基于锥体光纤-长周期光纤光栅-锥体光纤结构的全光纤 Mach-Zehnder (M-Z) 干涉仪传感器,并对其温度传感特性进行了研究.实验结果表明,固定光纤锥体和长周期光纤光栅的结构,仅改变两个光纤锥体之间的距离,对应不同的 M-Z 干涉谐振峰呈现出不同的温度传感特性:随着两个光纤锥体之间的距离增加,位于短波长处的谐振峰,传感器的温度灵敏度减小,而位于长波长处的谐振峰,传感器的温度灵敏度增加.当传感器长度为 16.5 cm 时,在 1 680 nm 附近的温度灵敏度达到 0.102 06 nm/°C.实验结果对于锥体光纤-长周期光纤光栅组合型温度传感器的优化设计具有重要参考价值.

**关键词:**锥结构;长周期光纤光栅;Mach-Zehnder 干涉仪;温度传感

**中图分类号:**TN253

**文献标识码:**A

**文章编号:**1004-4213(2013)03-0307-4

## Temperature Sensing Characteristics of All-fiber Mach-Zehnder Interferometer Based on Bitaper-LPFG-Bitaper Structure

ZHANG Qi, ZHOU Jun, CHEN Jin-ping, TAN Xiao-ling

(Faculty of Science, Institute of Photonics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

**Abstract:** An all-fiber Mach-Zehnder interferometer sensor based on Bitaper-LPFG-Bitaper structure is proposed and fabricated, and the temperature sensing characteristic of the sensor is analyzed. The experimental results show that the sensor presents different characteristics at the different resonance wavelengths by changing the distance between the two bitapers, for the fixed structures parameters of the two bitapers and LPFG. The sensitivity of the sensor reduces with the increasing distance between the two bitapers at the shorter resonance wavelength, but increases at the longer resonance wavelength. When the length of the sensor is 16.5 cm, its sensitivity reaches 0.102 06 nm/°C around 1 680 nm. The research work is important for the optimization design of temperature sensor consisting of bitaper and LPFG.

**Key words:** Bitaper; Long period fiber grating; Mach-Zehnder interferometer; Temperature sensing

## 0 引言

光纤传感器因具有抗电磁干扰、体积小、质量轻、灵敏度高,能在恶劣环境中使用等优点而引起广泛关注.长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG)把满足相位匹配条件的纤芯模的

能量耦合到同向传输的包层模中且有很好的传输谱特性,因其具有插入损耗低、对外界环境的变化反应灵敏度高等优点,在光纤传感方面发挥越来越重要的作用.Mach-Zehnder(M-Z)干涉仪是一种重要的光纤传感类型,具有结构简单、灵敏度高、成本低等优点,广泛应用于温度、应变、湿度、折射率等的物理

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos. 60977048, 61275153)、浙江省自然科学基金(No. LY12A04002)、宁波市自然科学基金(Nos. 2011A61090, 2012A610107)和宁波大学王宽城幸福基金资助

**第一作者:**张琪(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤光栅传感技术与光子器件设计制备. Email: zhangqi\_05@126.com

**通讯作者:**周骏(1958-),男,教授,博导,主要研究方向为光电子材料与器件制备技术. Email: zhoujun@nbu.edu.cn

**收稿日期:**2012-08-27; **录用日期:**2012-09-29

参量的测量. 另一方面, 锥结构光纤<sup>[1-2]</sup>也具有把纤芯模的能量耦合到包层模的作用, 并可以通过锥结构光纤结构参量实现纤芯模和包层模耦合能量比的调节, 可以大大提高 M-Z 干涉仪光纤传感器的灵敏度. 近年来, 人们设计了多种类型基于 M-Z 干涉仪的光纤传感器结构, 例如, 光栅结构<sup>[3]</sup>、错位结构<sup>[4]</sup>、单模-多模-单模结构<sup>[5]</sup>、细芯光纤结构<sup>[6]</sup>和光子晶体光纤结构<sup>[7]</sup>等. 此外, 也发展了多种制作光纤传感器的技术方法, 如 CO<sub>2</sub> 激光照射法<sup>[8]</sup>、飞秒激光制作微米孔洞<sup>[9-10]</sup>、手动熔接<sup>[11]</sup>等.

本文结合 LPFG 和 bitaper 光纤结构, 应用 M-Z 干涉原理和光纤熔接技术, 制作出一种基于锥体光纤-长周期光纤光栅-锥体光纤 (Bitaper-LPFG-Bitaper, BLB) 结构的全光纤 M-Z 干涉仪传感器, 并对其温度传感特性进行了实验测量和理论分析.

## 1 传感模型及原理

图 1 为基于 BLB 结构的全光纤 M-Z 干涉仪示意图. 当入射光到达第一个 bitaper 结构时, 一部分光在纤芯中以纤芯模式传输, 而另一部分光被耦合到包层中以包层模式传输, 纤芯模经过中间的一段长周期光纤光栅时又被激发出多个包层模, 这些被

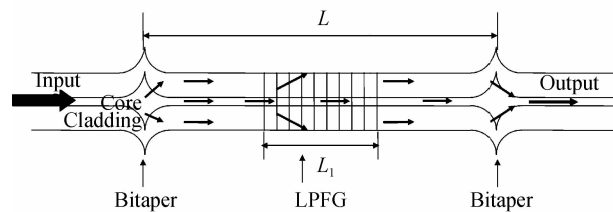


图 1 基于 BLB 结构的全光纤 M-Z 干涉仪

Fig. 1 Schematic diagram of all-fiber Mach-Zehnder interferometer based on BLB structure

激发出的包层模在第二个 bitaper 结构处重新耦合到纤芯并和纤芯模形成干涉, 其纤芯模和包层模之间的相位差可以表示为<sup>[11]</sup>

$$\varphi_m = \frac{2\pi\Delta P}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} [(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}})(L - L_1) + (n_{\text{eff,LPFG}}^{\text{co}} - n_{\text{eff,LPFG}}^{\text{cl}})L_1] \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  为真空光波长,  $L$  为干涉仪的长度 (即两个 bitaper 之间的距离),  $L_1$  为 LPFG 的长度,  $\Delta P$  为纤芯模和包层模之间的光程差,  $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  为纤芯模的有效折射率,  $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$  为包层模的有效折射率,  $n_{\text{eff,LPFG}}^{\text{co}}$  为 LPFG 中纤芯模的有效折射率,  $n_{\text{eff,LPFG}}^{\text{cl}}$  为 LPFG 中包层模的有效折射率. 当纤芯模和包层模之间的相位差满足以下条件时干涉光强达到最小, 即

$$\varphi_m = (2k + 1)\pi \quad (2)$$

式中,  $k$  为 M-Z 干涉级次.

令光纤的纤芯模与包层模的有效折射率差  $A = n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ , 长周期光纤光栅中的纤芯模与包层模的有效折射率差  $B = n_{\text{eff,LPFG}}^{\text{co}} - n_{\text{eff,LPFG}}^{\text{cl}}$ , 由式 (1) 和 (2) 可以得到

$$\lambda_k = \frac{2}{2k+1} [A(L - L_1) + BL_1] \quad (3)$$

$$\Delta\lambda_k = \lambda_{k-1} - \lambda_k = \frac{4(A(L - L_1) + BL_1)}{(2k-1)(2k+1)} \quad (4)$$

式中,  $\lambda_k$  为干涉峰波谷对应的波长,  $\Delta\lambda_k$  为两个相邻干涉峰波谷之间的间隔.

由以上分析得知, 当外界温度的变化引起式 (3) 中  $A$  和  $B$  的改变时, 相应透射谱中的干涉峰发生变化, 可以应用于温度传感测量. 将式 (3) 对温度求导, 则基于 BLB 结构的全光纤 M-Z 干涉仪的温度灵敏度为

$$S = \frac{\partial\lambda_k}{\partial T} = \frac{2}{2k+1} \left[ (L - L_1) \frac{\partial A}{\partial T} + L_1 \frac{\partial B}{\partial T} - \lambda_k \frac{\partial k}{\partial T} \right] \quad (5)$$

## 2 实验与分析

### 2.1 全光纤 M-Z 干涉仪的制作

根据图 1 所示全光纤 M-Z 干涉仪的 BLB 结构, 首先采用点对点写入法, 用高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲在标准单模光纤上制作周期为 600  $\mu\text{m}$ 、长度  $L_1$  为 3 cm 的长周期光纤光栅; 然后再按照文献<sup>[11]</sup>的方法, 通过商用熔接机的手动模式制作两个如图 2 所示的 bitaper 结构, 其束腰直径  $d$  为 210  $\mu\text{m}$ , 长度  $l$  为 185  $\mu\text{m}$ ; 最后, 用熔接机将两个 bitaper 光纤结构和长周期光纤光栅熔接在一起组成基于 BLB 结构的全光纤 M-Z 干涉仪.

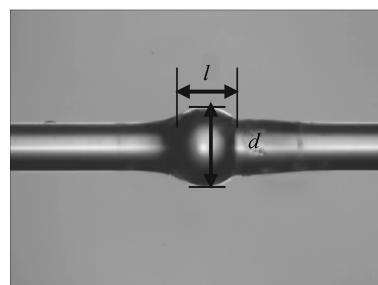


图 2 Bitaper 光纤结构的显微图片

Fig. 2 Microscope photograph of the bitaper structure

在制作过程中, 测量得到的各种光纤结构的透射光谱如图 3 所示, 其中, 点划线为 LPFG 的透射光谱, 点线为在 LPFG 一端熔接一个 bitaper 结构的透射光谱, 实线为在 LPFG 两端各熔接一个 bitaper 结构 (其中两个 bitaper 结构之间的距离为 16.5 cm) 的透射光谱.

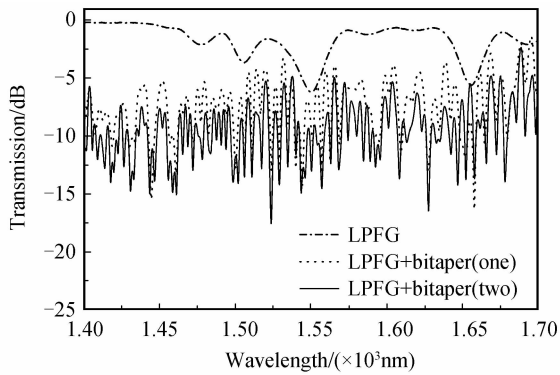


图 3 长周期光纤光栅和干涉仪结构的透射光谱  
Fig. 3 Transmission spectra of LPFG and Mach-Zehnder interferometer

## 2.2 传感实验与测量结果

图 4 所示为传感测量实验装置,将 BLB 结构全光纤 M-Z 干涉仪置于数控电热板(furnace)上,用光纤夹持器固定其输入输出端,使光纤保持拉直状态,以避免弯曲和应力的影响,从而提高传感器的稳定性;将 SLED 宽带光源(light source)发出的光耦合进入 BLB 结构光纤中,输出光信号通过单模光纤连接进入光谱仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA).

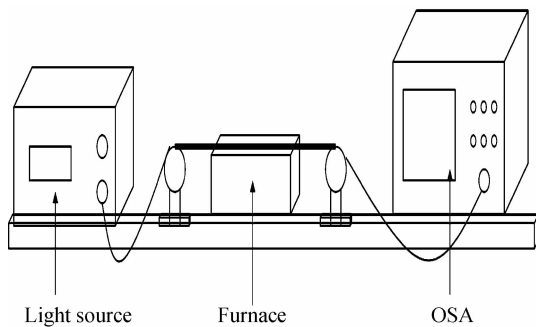


图 4 光谱测量实验装置

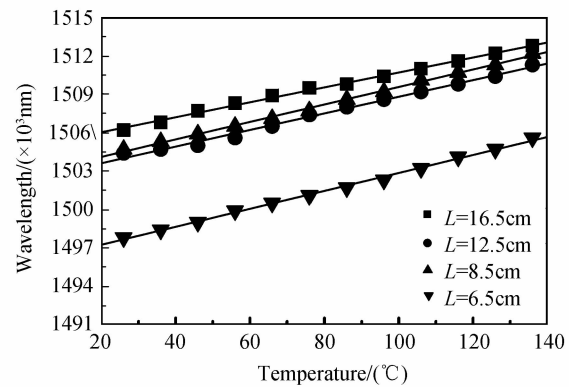
Fig. 4 Schematic configuration of the experimental setup which is used to measure the spectra

测量实验中,控制数控电热板的温度从  $26^{\circ}\text{C}$  升高到  $136^{\circ}\text{C}$ , BLB 结构全光纤 M-Z 干涉仪的温度传感特性如图 5(a)和(b). 从图中可以看出,随着温度的升高,在测量的透射谱的  $1500\text{ nm}$  和  $1680\text{ nm}$  附近,各自对应干涉峰的波长都会发生红移,且实验数据拟合表明,红移量与温度表现出很好的线性关系,但是它们相应的温度传感特性不同.

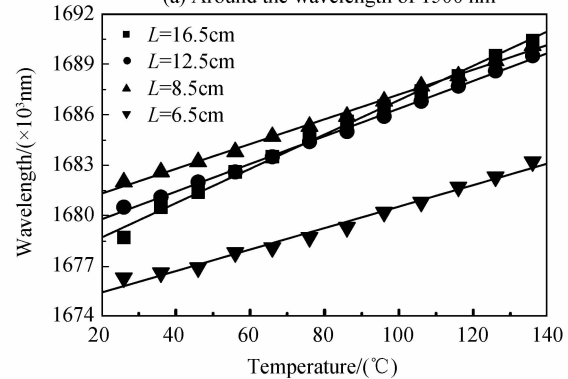
图 5(a)中, M-Z 干涉仪长度分别为  $6.5\text{ cm}$ 、 $8.5\text{ cm}$ 、 $12.5\text{ cm}$  和  $16.5\text{ cm}$  时,该结构在  $1500\text{ nm}$  附近对应的温度灵敏度分别为  $0.07017$ 、 $0.06829$ 、 $0.06493$  和  $0.05832\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ . 由图可知,随着干涉仪长度的增加,其温度灵敏度逐渐减小.

如图 5(b)中,干涉仪长度分别为  $6.5\text{ cm}$ 、 $8.5\text{ cm}$ 、 $12.5\text{ cm}$  和  $16.5\text{ cm}$  时,该结构在  $1680\text{ nm}$  附近的温度灵敏度分别为  $0.06388$ 、 $0.07364$ 、 $0.08224$  和  $0.10206\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ .

可以看出,随着干涉仪长度的增加,温度灵敏度逐渐增大.



(a) Around the wavelength of  $1500\text{ nm}$



(b) Around the wavelength of  $1680\text{ nm}$

图 5 在  $1500\text{ nm}$  和  $1680\text{ nm}$  附近, M-Z 干涉仪的温度传感特性

Fig. 5 Temperature sensitivity of the Mach-Zehnder interferometer around the wavelength of  $1500\text{ nm}$  and  $1680\text{ nm}$ , respectively

另外,温度从高降到低时,这种传感器的干涉峰波长都会发生蓝移,与温度从低升到高时对应的干涉峰波长的位置保持一致. 可见,这种传感器具有很好的稳定性.

## 2.3 实验结果分析

从实验结果可见,对于同一长度的 BLB 结构全光纤 M-Z 干涉仪,在谐振波长  $1680\text{ nm}$  附近呈现出很高的灵敏度,而在  $1500\text{ nm}$  和  $1680\text{ nm}$  附近,其各自的温度灵敏度与干涉仪长度呈现相反的特性. 本文以干涉仪长度  $L$  分别为  $6.5\text{ cm}$  和  $16.5\text{ cm}$  的两种情况对上述特性进行分析.

当  $L=6.5\text{ cm}$  时,在测量的透射谱中选择两个对应的干涉峰波长  $\lambda_{k_1}=1497.8\text{ nm}$  和  $\lambda_{k_2}=1676.3\text{ nm}$ , 对应的相邻干涉峰之间的间隔  $\Delta\lambda_{k_1}=11.7\text{ nm}$ ,  $\Delta\lambda_{k_2}=11.7\text{ nm}$ , 由式(3)和式(4)计算得到  $k_1=129$ ,  $k_2=144$ .

同样,当  $L=16.5\text{ cm}$  时,选择  $\lambda_{k_3}=1506.2\text{ nm}$  和  $\lambda_{k_4}=1678.7\text{ nm}$ , 其各自相邻干涉峰之间的间隔  $\Delta\lambda_{k_3}=5.1\text{ nm}$  和  $\Delta\lambda_{k_4}=7.2\text{ nm}$ , 则由式(3)和式(4)计算得到  $k_3=296$ ,  $k_4=234$ .

以上计算表明,当干涉仪长度  $L$  从 6.5 cm 增加到 16.5 cm 时,在 1 500 nm 附近,  $k$  从 129 增加到 296,变化量为 167;而在 1 680 nm 附近,  $k$  从 144 增加到 234,变化量为 90.可见,在 1 500 nm 附近的干涉峰的级次变化比 1 680 nm 附近的干涉峰的级次变化大.

在这两种情况下,式(3)中光纤的  $A$  和  $B$  随外界温度的改变产生的变化量相同,则由式(5)可知,温度灵敏度  $S$  与  $k$  成反比.所以,当干涉仪长度  $L$  的变化量相同时,在 1 500 nm 附近的温度灵敏度随干涉仪长度的增加而减小,在 1 680 nm 附近的温度灵敏度随干涉仪长度的增加而增加.

### 3 结论

本文应用 M-Z 干涉原理和光纤熔接技术,制作出一种基于 BLB 结构的全光纤 M-Z 干涉仪传感器,并对其在不同谐振波长附近的温度传感特性进行了实验测量和理论分析.结果表明,该结构在谐振波长 1 680 nm 附近呈现出高达 0.102 06 nm/°C 的灵敏度,并且随着干涉仪长度的增加,温度灵敏度随之增大;而在谐振波长 1 500 nm 附近,该结构的温度灵敏度随着干涉仪长度的增加而减小.这些特性对设计和制造新型全光纤 M-Z 干涉仪传感器具有重要的参考价值.

#### 参考文献

- [1] TIAN Z, YAM S S, BARNES J, *et al.* Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single mode fiber tapers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(8): 626-628.
- [2] GENG You-fu, LI Xue-jin, TAN Xiao-ling, *et al.* High-sensitivity Mach-Zehnder interferometric temperature fiber sensor based on a waist-enlarged fusion bitaper [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, **11**(11): 2891-2894.
- [3] ALLSOP T, REEVES R, WEBB D J, *et al.* A high sensitivity refractometer based upon a long period grating Mach-Zehnder interferometer [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, **73**(4): 1702-1705.
- [4] TIAN Z, YAM S S H, LOOCK H P. Single-mode fiber refractive index sensor based on core-offset attenuators [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(16): 1387-1389.
- [5] WU Qiang, SEMENOVA Y, WANG Peng-fei, *et al.* High sensitivity SMS fiber structure based refractometer - analysis and experiment [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(9): 7937-7944.
- [6] XIA Tian-hao, ZHANG A. Ping, GU Bo-bo, *et al.* Fiber-optic refractive-index sensors based on transmissive and reflective thin-core fiber modal interferometers [J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(10): 2136-2139.
- [7] GENG Y, LI X, TAN X, *et al.* A cascaded photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer formed by extra electric arc discharges [J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2010, **102**(3): 595-599.
- [8] WEI Tao, LAN Xin-wei, XIAO Hai. Fiber inline core-cladding-mode Mach-Zehnder interferometer fabricated by two-point CO<sub>2</sub> laser irradiations [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(10): 669-671.
- [9] JIANG L, YANG J, WANG S, *et al.* Fiber Mach-Zehnder interferometer based on microcavities for high-temperature sensing with high sensitivity [J]. *Optics Express*, 2011, **36**(19): 3753-3755.
- [10] LU Ping, CHEN Qi-ying. Femtosecond laser microfabricated fiber Mach-Zehnder interferometer for sensing applications [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(2): 268-270.
- [11] WU Di, ZHU Tao, CHIANG K S, *et al.* All single-mode fiber Mach-Zehnder interferometer based on two peanut-shape structures [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(5): 805-810.