

# 基于模间干涉原理的全光纤马赫-曾德尔温度传感器

吕卫卫 徐峰 俞本立

安徽大学物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230601

**摘要** 根据模间干涉原理提出了一种基于细芯光敏光纤的全光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结构,并实验制作出纤芯错位的MZI。根据数值模拟对该模间干涉仪结构进行优化,获得了干涉仪的干涉谱消光比超过20 dB。通过对该传感器进行温度响应实验,分析并讨论了干涉长度及弯曲特性对其温度灵敏度的影响,最终获得的温度灵敏度达到116 pm/°C。

**关键词** 光纤传感;细芯光敏光纤;纤芯错位;温度测量

中图分类号 O433 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.050605

## All-Fiber Mach-Zehnder Temperature Sensor Based on Inter-Modal Interference

Lü Weiwei Xu Feng Yu Benli

*School of Physics and Materials Science, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China*

**Abstract** An all-fiber Mach-Zehnder interferometer (MZI) temperature sensor based on the inter-modal interference principle is proposed and experimentally demonstrated. According to the simulation results of the MZI based on core-offset, we optimized the structural parameters of such an MZI sensor. The MZI sensor based on core-offset with the extinction ratio of more than 20 dB is obtained successfully. The performance of sensing temperature of such MZI sensors is tested. The influence of the interference length and bending structure of such MZI sensors on the temperature response are also investigated in detail. The temperature sensitivity is improved and reaches to 116 pm/°C.

**Key words** fiber sensor; thin-core photo-sensitive fiber; core-offset; temperature measurement

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 060.2400

### 1 引言

全光纤结构马赫-曾德尔干涉仪(MZI)由于结构简单,灵敏度高,容易制作且成本低,不易受电磁干涉等优点而被广泛应用于温度、应变等参量的测量。全光纤结构的温度传感器可采用光纤布拉格光栅(FBG)<sup>[1-3]</sup>、法布里-珀罗(FP)腔<sup>[4]</sup>等结构实现。基于FBG结构实现的温度传感器灵敏度较低(约10pm/°C),并且光栅制作复杂,成本高,限制了它的实际应用<sup>[5-6]</sup>。此外,光纤光栅在高温下易被擦除,也限制了它的温度应用范围。而基于FP腔结构的全光纤传感器,通常需要采用激光加工或高精度光纤加工技术实现FP微腔,难以满足批量制作要求<sup>[7]</sup>。已有的基于多模光纤实现的MZI传感器,具有较低的温度灵敏度(8.7 pm/°C和14.7 pm/°C)<sup>[8-9]</sup>。基于模间干涉的原理,通过耦合模数值模拟分析方法,对偏芯结构MZI进行理论分析,提出一种基于细芯光敏光纤(TCPSF)的MZI。对该MZI结构的干涉谱与错位量、光敏光纤长度,以及细芯光纤弯曲度之间的关系进行了详细实验,并对其温度传感特性进行了研究。

收稿日期: 2013-12-19; 收到修改稿日期: 2013-12-23; 网络出版日期: 2014-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(61108076)、国家红外物理实验室开放基金(201007)、安徽省教育厅重点研究项目(KJ2011A009)

作者简介: 吕卫卫(1983—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 306073623@qq.com

导师简介: 徐峰(1977—),男,博士,教授,主要从事光纤光栅及传感,集成光电子器件等方面的研究。

E-mail: fengx@ahu.edu.cn(通信联系人)

## 2 基于细芯光敏光纤的 MZI 的理论及实验

基于细芯光敏光纤的 MZI 是将一段 TCPSF 分别与单模光纤 (SMF) 熔接, 在一端的熔接点处, 细芯光纤和单模光纤的纤芯存在错位, 如图 1(a) 所示。所用 SMF 和 TCPSF 分别是长飞公司生产的 G652B 和 PS1017-D 两种光纤。当 SMF 光纤中的传播光束经错位熔接点 [图 1(b) 为错位熔接点实物图], 在 TCPSF 中激发出包层模, 包层模和纤芯模在细芯光纤中传输一段距离后, 将经过第二个熔接点重新耦合到 SMF 纤芯中, 纤芯模和包层模发生干涉。

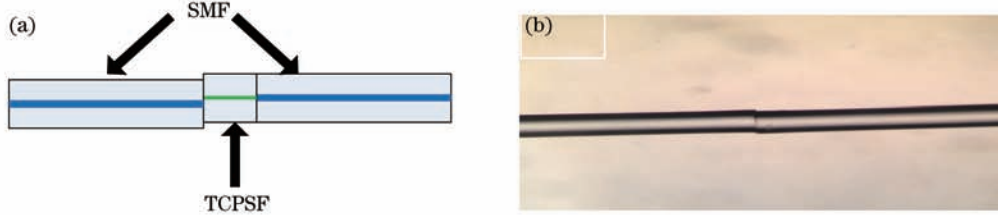


图 1 (a) MZI 干涉仪的结构示意图; (b) 错位熔接图

Fig.1 (a) Schematic configuration of MZI; (b) image of fiber splicing point

根据耦合模理论对该 MZI 结构的透射光谱进行数值模拟<sup>[10]</sup>。图 2 为模拟获得不同错位量下 MZI 的干涉谱。当 TCPSF 和 SMF 纤芯无错位时, 由于 TCPSF 和 SMF 纤芯模场失配, 产生了弱的模间干涉。当逐步增大错位量为 5、7、10  $\mu\text{m}$  时, 两光纤纤芯错位, 使传播光束在细芯光纤激发起更强的包层模式, 形成了更强的模间干涉。

MZI 的自由波谱范围公式近似表示为<sup>[11]</sup>

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta n_{\text{eff}}^m L}, \quad (1)$$

式中  $\Delta n_{\text{eff}}^m$  为纤芯基模和第  $m$  阶包层模的有效折射率差,  $L$  为干涉长度,  $\lambda$  为中心波长。

在实验中, 分别制作了 1.5、8、16 mm 三种不同 TCPSF 的 MZI 传感器 (错位量为 7 m), 使用 Agilent 8164A 测量系统分别测得它们的干涉谱, 如图 3 所示。

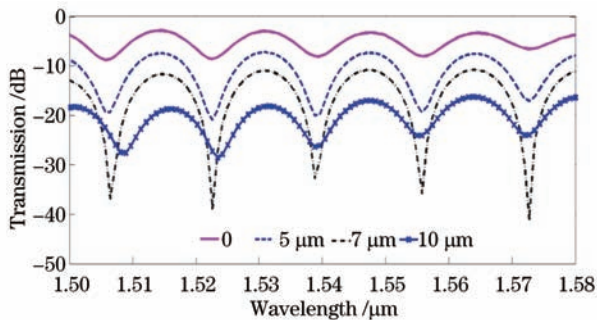


图 2 错位量分别为 0、5、7、10  $\mu\text{m}$  时, MZI 的模间干涉谱

Fig.2 Interference spectra of MZI with different offsets of 0, 5, 7, 10  $\mu\text{m}$

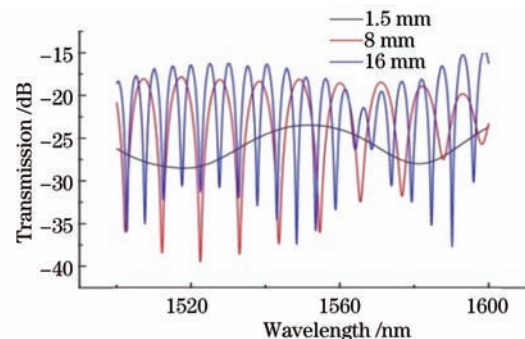


图 3 干涉长度分别为 1.5、8、16 mm 时 MZI 的干涉谱

Fig.3 Interference spectra of MZI with interference lengths of 1.5, 8, 16 mm

空间频率  $\xi$ 、干涉长度  $L$ 、有效折射率差  $\Delta n_{\text{eff}}^m$  之间的关系表示为<sup>[12]</sup>

$$\xi = \frac{1}{\lambda^2} \Delta n_{\text{eff}}^m L, \quad (2)$$

由(2)式可知,  $\Delta n_{\text{eff}}^m$  为定值时, 当干涉长度减小, 空间频率  $\xi$  就会随之减小。将三种不同干涉长度的 MZI 的传输光谱进行快速傅里叶变换 (FFT) 获得其对应的空间频谱, 如图 4 所示。从图 4 可看出, 模间干涉形成的干涉峰空间频率随干涉长度的增加而增加。在 1.5 mm 干涉长度时, 由于激发的包层模弱, 因而模间干涉不明显, 因而其空间频谱的干涉峰很弱。

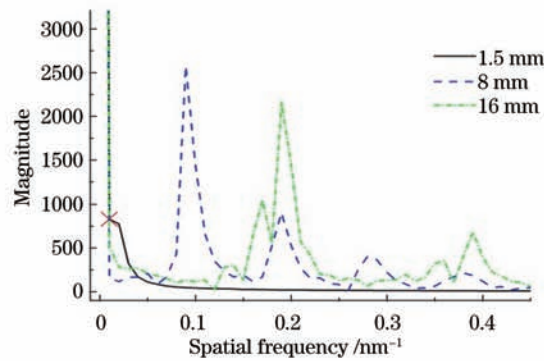


图4 在1.5、8、16 mm的干涉长度下 MZI对应的空间频谱

Fig.4 Spatial spectra of MZI with interference lengths of 1.5, 8, 16 mm

MZI温度传感器的热灵敏度公式可以表示为<sup>[13]</sup>

$$\frac{d\lambda}{dT} \approx \frac{\left[ \frac{\lambda}{\Delta n_{\text{eff}}^m} \left( \frac{\partial \Delta n_{\text{eff}}^m}{\partial n_{\text{co}}} \frac{dn_{\text{co}}}{dT} + \frac{\partial \Delta n_{\text{eff}}^m}{\partial n_{\text{cl}}} \frac{dn_{\text{cl}}}{dT} \right) + \frac{\lambda}{L} \frac{dL}{dT} \right]}{1 - \frac{\lambda}{\Delta n_{\text{eff}}^m} \frac{\partial \Delta n_{\text{eff}}^m}{\partial \lambda}}, \quad (3)$$

式中  $n_{\text{co}}$  表示纤芯的有效折射率,  $n_{\text{cl}}$  表示包层的有效折射率。

将前面制作的长度不同的 MZI 传感光纤放入加热炉, 对其进行加热, 每隔 10 °C 记录一次干涉图, 获得该结构的干涉谱中 1566 nm 处的波谷随温度变化的结果, 如图 5(a) 所示。

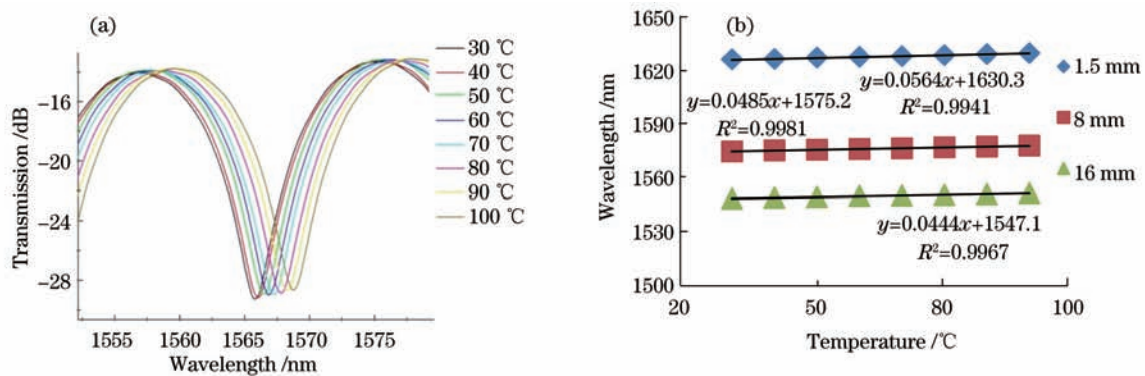


图5 (a) 1566 nm 处的干涉峰随温度的漂移; (b) 干涉长度分别为 1.5、8、16 mm 时, MZI 对温度的响应曲线。

Fig.5 (a) Response of the sensor to temperature; (b) temperature response fitting curves of the MZI at different lengths of 1.5, 8, 16 mm

三种不同干涉长度 MZI 传感器的温度灵敏度如图 5(b) 所示, 当干涉长度由 16 mm 减小到 1.5 mm 时, MZI 温度的灵敏度由 44 pm/°C 增大到 56 pm/°C, 温度灵敏度有了显著的提高, 并且传感器对温度具有良好的线性响应特性。在这种 MZI 结构中包层模参与了干涉过程, 因此, 研究光纤弯曲对传感器性能的影响具有实际意义。制作了 TCPSF 长度为 5 mm 和错位量为 7 μm MZI 干涉仪, 其干涉图如图 6(a) 所示。对其进行 FFT 可得到其对应的空间频率, 当 TCPSF 光纤处于 MZI 无弯曲和弯曲半径分别为 16.5 cm 和 12 cm 时, 获得它们的空间频率谱如图 6(b) 所示。当弯曲半径直径为 12 cm 时, 其模间干涉的空间频率最小, 参与模间干涉的纤芯模和包层模的折射率差最小, 由 (3) 式可知, 有效折射率差越小, 其温度灵敏度越高。分别对三种不同弯曲状态下直径的 MZI 进行温度响应实验, 测得它们的温度灵敏度分别为 43、44、61 pm/°C, 如图 5(c) 所示。这一结果和理论分析相一致。

当将细芯光纤的弯曲半径继续减小到 10.5 cm 时, 从其空间频谱 (图 7) 可看出耦合到细芯光纤中的包层模形成的两个相对较强的干涉峰空间频率分别在 0.0571 nm<sup>-1</sup> 和 0.0428 nm<sup>-1</sup>。图 7 中的插图为该 MZI 的干涉谱随温度的变化。分别测量位置在 1514 nm 和 1617 nm 的波谷随温度的变化。可得 1617 nm 峰的温度灵敏度为 116 pm/°C, 1514 nm 峰的温度灵敏度为 42 pm/°C。此时, 该 MZI 传感器的最大温度灵敏度是无弯曲

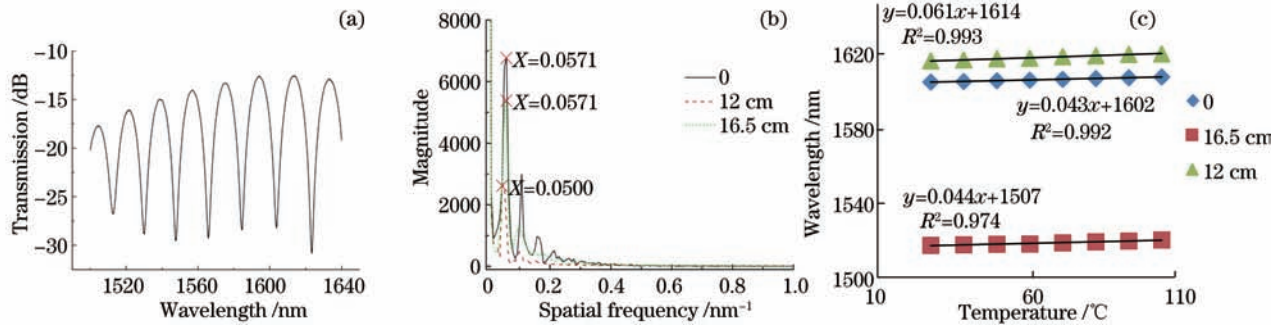


图6 (a) TCPSF长度为5 mm时的干涉谱; (b) MZI在无弯曲和弯曲半径分别为12 cm和16.5 cm时的空间频谱; (c)三种弯曲状态时MZI的温度响应曲线。

Fig.6 (a) Interference spectrum of MZI with length of 5 mm; (b) spatial spectra of MZI with bending radii of 0, 12, 16.5 cm; (c) temperature response fitting curves of MZIs

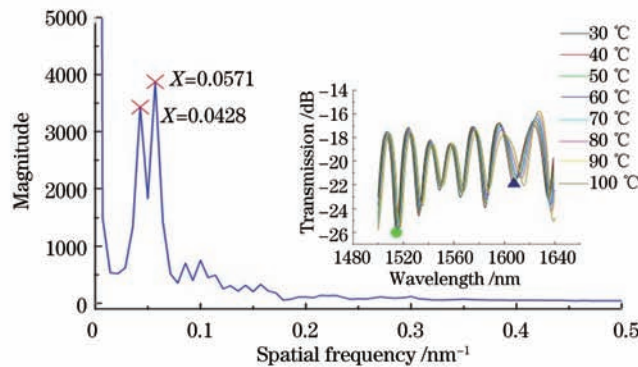


图7 弯曲半径为10.5 cm时MZI的空间频谱。插图为干涉谱随温度的变化曲线

Fig.7 Spatial spectrum of MZI with bending radius of 10.5 cm. The insert is the shift spectra of MZI with different temperatures

MZI的温度灵敏度的2.7倍。

### 3 结 论

基于模间干涉原理,实现了一种错位TCPSF的全光纤MZI,通过数值模拟获得该结构的优化错位参数,并制作出该MZI,其消光比超过20 dB。通过温度响应实验,证明该结构传感器可通过弯曲提高温度灵敏度,在弯曲半径为10.5 cm时,温度灵敏度由43 pm/°C提高到116 pm/°C。

### 参 考 文 献

- 1 Jiang Desheng, Li Jianzhi, Mei Jiachun. Temperature sensing properties of multimode fiber grating [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(2): 175-178.  
姜德生, 李剑芝, 梅家纯. 多模光纤光栅温度传感特性的实验研究[J]. 光学学报, 2004, 24(2): 175-178.
- 2 Peng Guo, Yunjiang Rao, Dengyong Li, *et al.*. Inscription of Bragg gratings in few-mode optical fibers [J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(2): 020606.
- 3 Wang Zhenbao, Yang Pengling, Shao Bibo, *et al.*. Fiber Bragg grating for simultaneous measurement of strain and temperature [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 50(10): 100602.  
王振宝, 杨鹏翎, 邵碧波, 等. 应力和温度同时测量的光纤布拉格光栅双参数传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 50(10): 100602.
- 4 H Y Choi, K S Park, S J Park, *et al.*. Miniature fiber-optic high temperature sensor based on a hybrid structured Fabry - Perot interferometer [J]. Opt Lett, 2008, 33(21): 2455-2457.
- 5 Yunjiang Rao. In-fibre Bragg grating sensors [J]. Meas Sci Technol, 1997, 8(97): 355-375.
- 6 S W James, R P Tatam. Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application [J]. Meas Sci Technol,

- 2003, 14(3): 49-61.
- 7 Jing Zhang, Hao Sun, Qiangzhou Rong, *et al.*. High-temperature sensor using a Fabry-Perot interferometer based on solid-core photonic crystal fiber [J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(7): 070607.
- 8 Zhang Yan, Zhang Jianzhong, Liu Zhihai, *et al.*. Multimode fiber based temperature sensor with the capability of wavelength encoding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 327-330.  
张 滢, 张建中, 刘志海, 等. 具有波长标定功能的多模光纤温度传感器[J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 327-330.
- 9 Qiang Wu, Yuliya Semenova, Agus Muhamad Hatta, *et al.*. Bent SMS fiber structure for temperature measurement [J]. *Electron Lett*, 2010, 46(16): 1129-1133.
- 10 Zhigang Cao, Xiaochun Ji, Rui Wang, *et al.*. Compact fiber sensor with high spatial resolution for simultaneous strain and temperature measurement [J]. *IEEE SENS J*, 2013, 13(5): 1447-1451.
- 11 L V Nguyen, D Hwang, S Moon, *et al.*. High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch [J]. *Opt Express*, 2008, 16(15): 11369-11375.
- 12 Jingjing Zhu, A Ping Zhang, Tianhao Xia, *et al.*. Fiber-optic high-temperature sensor based on thin-core fiber modal interferometer [J]. *IEEE SENS J*, 2010, 10(9): 1415-1417.
- 13 Hae Young Choi, Myoung Jin Kim, Byeong Ha Lee. All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber [J]. *Opt Express*, 2007, 15(9): 5711-5720.