

## 基于扩径光纤锥马赫曾德尔干涉仪的位移传感

温晓东<sup>1,2</sup>, 宁提纲<sup>1</sup>, 李晶<sup>1</sup>, 郑晶晶<sup>1</sup>, 油海东<sup>1,3</sup>, 李超<sup>1</sup>, 王春灿<sup>1</sup>

- (1. 北京交通大学 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044;
2. 曲阜师范大学 物理工程学院, 山东 曲阜 273165;
3. 青岛农业大学 理学与信息科学学院, 山东 青岛 266109)

**摘要:** 以直线形光纤马赫曾德尔干涉仪作为滤波器件, 掺铒光纤作为增益介质的环行腔光纤激光器实现位移传感。构成该马赫曾德尔干涉仪的扩径光纤锥由光纤熔接机制作而成。随着两个应力调节支架距离的减小, 干涉仪发生弯曲, 输出的波峰向短波长方向移动, 最大敏感度为 4.49 nm/mm, 消光比大于 50 dB。扩径光纤锥的引入使得光纤在弯曲时能够保持基本一致的弯曲度, 并且相比其他结构强度更高, 不容易发生断裂。同时, 该结构的制作所需材料便宜, 制作过程简便, 有利于工程应用。

**关键词:** 位移传感; 扩径光纤锥; 马赫曾德尔干涉仪

**中图分类号:** TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0622001

## Displacement sensor based on filter up-tapered Mach-Zehnder interferometer

Wen Xiaodong<sup>1,2</sup>, Ning Tigang<sup>1</sup>, Li Jing<sup>1</sup>, Zheng Jingjing<sup>1</sup>, You Haidong<sup>1,3</sup>, Li Chao<sup>1</sup>, Wang Chuncan<sup>1</sup>

- (1. Key Lab of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. College of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu 273165, China;
3. College of Science and Information, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

**Abstract:** A ring cavity fiber laser based on the filter of up-tapered Mach-Zehnder interferometer(MZI) was proposed and demonstrated for displacement sensor experimentally. The up-tapered MZI was easily fabricated by using a commercial fusion splicer. The peak wavelength of the laser blue-shifted with the different bending direction by decreasing the distance between the two stages. The maximum sensitivity of 4.49 nm/mm and extinction ratio of more than 50 dB were achieved. The configuration of up-tapers were strong in strength, therefore, the bending radius of the whole fiber were almost the same. Note that this kind of configuration is easy in fabrication and low in cost which is beneficial for engineering application.

**Key words:** displacement sensor; fiber up-taper; Mach-Zehnder interferometer

收稿日期: 2015-10-09; 修订日期: 2015-11-20

基金项目: 北京交通大学基本科研业务费(2013JBM012)

作者简介: 温晓东(1985-), 男, 博士生, 主要从事激光器及光纤传感方面的研究。Email: xiaodongwen@bjtu.edu.cn

导师简介: 宁提纲(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光信息与微波等方面的研究。Email: tgning@bjtu.edu.cn

## 0 引言

随着光纤制作及激光器技术的不断发展，特别是在光传感领域，成本低廉的光纤得到大量应用。鉴于光纤的高信息容量、抗电磁干扰、抗化学腐蚀、重量轻、价格便宜等优势，越来越多的传感系统引入了光纤。实际应用中的光纤一般担任两个角色，一是光的传输载体，另外一个就是直接作为传感元件进行信息的采集。对于传统的电传感器系统，光纤可以替代电缆将大量实时数据信息传送到终端，而利用特殊的光纤结构可以将传感元件与传输线结合起来，构成全光的传感系统，在有些场合甚至替代了传统的电传感系统。

对普通单模光纤进一步加工可以制作出许多传感器件，其中利用马赫曾德尔干涉仪(MZI)原理的直线型传感器对环境敏感度高、制作简便、类型多样，是实现全光传感的一个有效方法。其可以检测的环境变量十分丰富，包括温度、应力、位移、振动、液体折射率等，甚至与额外的器件相配合可以实现磁场强度、生物粒子浓度、化学 PH 值的测量。MZI 的基本结构是由一个分光器与一个合束器构成，通常情况下两个部分具有相同的物理结构，并且双向导通。目前，已经有相当多的基于普通单模光纤的直线型 MZI 被设计与制作，例如，串联的长周期光纤光栅<sup>[1]</sup>，串联的纤芯错位衰减器<sup>[2]</sup>，相隔一定光纤长度分别制作的光纤锥<sup>[3-4]</sup>，在普通单模光纤中间插入一段其他类型光纤<sup>[5-6]</sup>。不同类型的 MZI 结构有着不同的制作方法，也有各自的优缺点：长周期光栅的制作较为简便，但会用到紫外光、氢载光纤、掩膜板，使得其制作成本偏高；纤芯错位的衰减器的制作只需要用光纤熔接机就可以完成，但很难做到两个衰减器的纤芯偏移方向一致，这会引入大的损耗；与衰减器一样的是光纤拉锥也十分容易制作，但拉锥之后的光纤机械强度大大降低，特别是对弯曲变得更加脆弱。

因此，通过采用扩径光纤锥作为光分束与合束元件，利用马赫曾德尔干涉仪原理进行位移传感。一方面，扩径光纤锥的光纤直径大大增加，使其特别是在对抗弯曲时，机械强度也比拉锥的光纤更高。另一方面，与传统的拉锥过程类似，扩径光纤锥仅由光纤熔接机就可制作完成，成本很低。

## 1 结构原理分析

利用基于扩径光纤锥的 MZI 作为滤波及传感器件，将其接入到环形腔激光器结构中，构成位移传感器系统，如图 1 所示。其中 980 nm 泵浦提供波长为 980 nm 的单模激光泵浦；10 m 长的掺铒光纤(EDF13/6/125-23, YOFC)提供信号增益；隔离器保证信号光单向传输；MZI 两端被分别安置在固定支架和可移动支架上，由可移动支架提供位移量参数；分光比 10:90 的耦合器使 90%的光信号继续在环形腔中传输，而另外 10%输出到光谱仪进行检测。

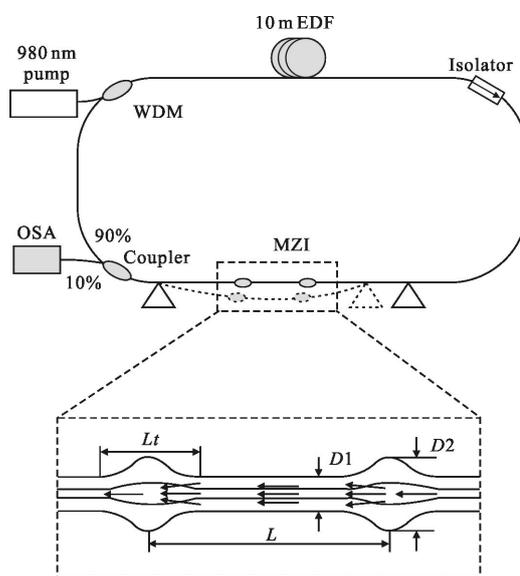


图 1 位移传感器原理图

Fig.1 Principle of the displacement sensor

与其他类型的 MZI 相类似，只是分光器和合束器分别由两个参数基本一致的扩径光纤锥充当。图 1 中光从 MZI 的右端输入，在右端的扩径光纤锥处被分为两路，一路被耦合到光纤包层中转换为光纤包层模式沿光纤进行传输，另一路继续在纤芯中传输。经过一定长度的光纤传输后，两路光在左边的扩径光纤锥处合束相干。由于两路光经过的路径不同，会因此产生一定的相位差，合束后的光在光谱上表现出梳状滤波的特性，由下式决定<sup>[7]</sup>：

$$I(\lambda) = I_{co}(\lambda) + I_{cl}(\lambda) + 2\sqrt{I_{co}(\lambda)I_{cl}(\lambda)} \cos(\Phi) \quad (1)$$

式中： $I_{co}$  和  $I_{cl}$  分别为分光后纤芯模和包层模的光强； $\lambda$  为真空中的波长； $\Phi$  为两路光的相位差，由于激发的包层模不只一个，最终都会与纤芯模发生干

涉,但强度分配则很不均匀,大部分的包层模都可以被忽略,这里假设起分光作用的扩径光纤锥只激发出单阶包层模,则包层模与纤芯模的相位差可以用公式(2)表示:

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{co} - n_{cl})L \quad (2)$$

式中: $n_{co}$ 和 $n_{cl}$ 分别为纤芯和包层的有效折射率; $L$ 为两扩径光纤锥之间的光纤长度。当MZI被拉直时, $L$ 是一定的,因而由公式(1)和公式(2)得到的传输光谱是恒定不变的,如图2所示。

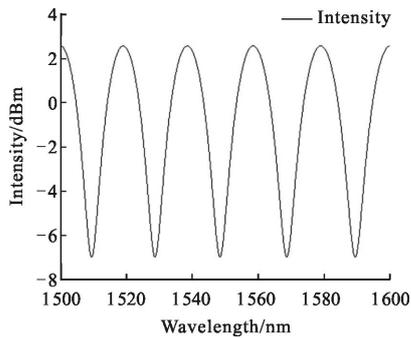


图2 马赫曾德尔干涉仪的传输光谱仿真图  
Fig.2 Simulated propagation spectrum of the MZI

通过调节可移动支架使光纤弯曲,可以实现位移传感器的功能,而光纤的弯曲又会使纤芯模与包层模在原有相位差的基础上引入一个额外的相位差,可以表示为:

$$\Phi_{add} = -\frac{2\pi}{\lambda} n_{cl} \Delta L \quad (3)$$

这里假设光纤在弯曲时,纤芯的长度不变,而包层相对长度变化量用 $\Delta L$ 表示。由于纤芯与包层折射率差的原因,纤芯模的相位更超前,而光纤的弯曲使包层模式在原有相位基础上增加了一个相位量,因此,两模式的相位差相比弯曲之前更小,式中的负号就表示两模式相位差的减小量。从而,传输光谱可以重写为:

$$I(\lambda) = I_{co}(\lambda) + I_{cl}(\lambda) + 2\sqrt{I_{co}(\lambda)I_{cl}(\lambda)} \cos(\Phi + \Phi_{add}) \quad (4)$$

利用该马赫曾德尔干涉仪的梳状滤波特性对增益波长进行选择,而且随着光纤的弯曲所选择波长还会向短波长方向移动,在此原理基础上的基于光纤弯曲的位移传感器可以被实验验证。

## 2 实验结果

实验首先需要制作传感所需的基于扩径光纤锥

的马赫曾德尔干涉仪,在之前的工作中曾对直线型扩径光纤锥的制作进行过试验,并制作出满足实验要求的扩径光纤锥<sup>[8-9]</sup>。此次实验采用类似的制作方法,制作出如图3所示的滤波器结构,图中扩径光纤锥侧面图通过对熔接机(FSU975)显示屏进行拍照获得,以单模光纤纤芯 $125 \mu\text{m}$ 按比例计算出图中所示结构的尺寸参数。两个光纤锥的长度大约为 $720 \mu\text{m}$ ,直径 $286 \mu\text{m}$ ,两个光纤锥尺寸参数接近可以得到更好的传输谱,包括传输损耗和消光比。

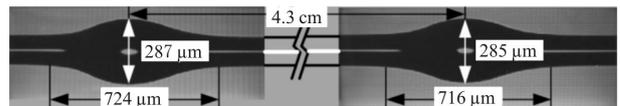


图3 基于扩径光纤锥的直线型马赫曾德尔干涉仪  
Fig.3 In-line up-tapered MZI

利用超连续谱宽带光源(KOHERAS, SuperK uersa)和光谱仪(YOKOGAWA, AQ6375)测试其透射光谱,得到如图4所示的透射曲线,由图可知,该干涉仪的自由光谱范围大约 $15 \text{ nm}$ ,消光比 $2\sim 3 \text{ dB}$ 。较高的消光比有利于增强干涉仪的滤波性能,但是由该类马赫曾德尔干涉仪的原理结构所限,更高的消光比会带来高的传输损耗,因此在满足滤波性能要求的前提下,尽量以减小传输损耗为目的,这也是在此次实验中所制作的干涉仪消光比如此低的原因。由于采用铒光纤作为增益材料,所以自由光谱范围较宽的滤波器可以有效减少所激发的波长数量,稳定性也更强,更有利于进行波长的选择和识别,此次实验采用的马赫曾德尔干涉仪两个光纤锥之间的光纤长度为 $4.3 \text{ cm}$ ,决定了其自由光谱范围大约为 $15 \text{ nm}$ 。

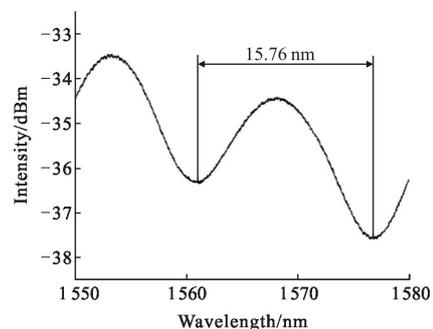


图4 基于扩径光纤锥的马赫曾德尔干涉仪透射光谱图  
Fig.4 Propagation spectrum of the up-tapered MZI

完成整个系统的搭建之后,进行位移传感的测量,由于位移传感利用的是光纤弯曲对纤芯模和包

层模相位差的影响来实验传感,因而,在马赫曾德尔干涉仪被拉直的情况下通过调节可移动支架实现 1 mm 的初始位移量而使光纤弯曲。之后以每隔 0.05 mm 的位移量进行递加,并记录光谱图。最终得到如图 5 所示的光谱随位移变化关系图,从图中得知,随着可移动支架位移量的增加(光纤的弯曲度也越来越大),输出激光峰值对应波长向短波长方向移动,并且峰值功率并无大的波动。将峰值对应波长绘制成如图 6 所示形式,得到近似线性的变化关系,并且线性度较好,拟合直线的斜率为-4.49 nm/mm,这也正是该位移传感器的传感敏感度。

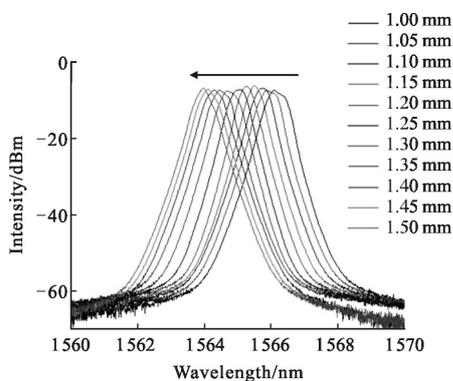


图 5 传感器系统随位移变化的光谱图

Fig.5 Spectra of the sensor system with the changing of displacement

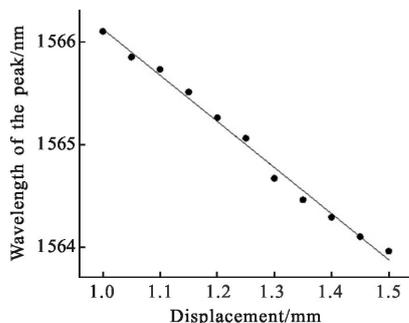


图 6 输出峰值波长与位移的关系图

Fig.6 Relationship between the peak wavelength and displacement

### 3 结论

利用基于扩径光纤锥的直线型马赫曾德尔干涉仪作为滤波和传感元件,通过搭建环形腔光纤激光器传感系统进行了分辨率为亚毫米级的位移传感。传感的敏感度达到 4.49 nm/mm,该结构制作简单,

成本低,而且抗弯曲的机械强度相比其他分光、合光的光纤结构更强,利用环形腔激光器结构使得更容易分辨出峰值功率所对应的波长,并且整个系统结构紧凑,便携性强,适宜工程应用。

### 参考文献:

- [1] Duhem F, Henninot J, Douay M. Study of in fiber Mach-Zehnder interferometer based on two spaced 3-dB long period gratings surrounded by a refractive index higher than that of silica.[J]. *Optics Communications*, 2000, 180(4-6): 255-262.
- [2] Zhaobing Tian, Yam S S H, Look H. Single-mode fiber refractive index sensor based on core-offset attenuators [J]. *Photonics Technology Letters*, 2008, 20(16): 1387-1389.
- [3] Xu Yanping, Lu Ping, Qin Zengguang, et al. Vibration sensing using a tapered bend-insensitive fiber based Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 3031-3042. (in Chinese)
- [4] Guillermo Salceda-Delgado, Alejandro Martinez-Rios, David Monzón-Hernández. Tailoring Mach-Zehnder comb-filters based on concatenated tapers[J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(5): 761-767.
- [5] Chen Yaofei, Han Qun, Liu Tiegeng, et al. Optical fiber magnetic field sensor based on single-mode-multimode-single-mode structure and magnetic fluid [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20): 3999-4001. (in Chinese)
- [6] Yang Li, Xue Linlin, Che Di, et al. Guided-mode-leaky-mode-guided-mode fiber structure and its application to high refractive index sensing.[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(4): 587-589. (in Chinese)
- [7] Wu Di, Zhu Tao, Deng Ming, et al. Refractive index sensing based on Mach-Zehnder interferometer formed by three cascaded single-mode fiber tapers[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(11): 1548-1553. (in Chinese)
- [8] Wen Xiaodong, Ning Tigang, Li Chao, et al. Liquid level measurement by applying the Mach-Zehnder interferometer based on up-tapers[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(1): 71-75. (in Chinese)
- [9] Wen Xiaodong, Ning Tigang, You Haidong, et al. Analysis and measurement of the displacement sensor based on up-tapered Mach-Zehnder interferometer [J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31(3): 034203. (in Chinese)