

## 基于环行腔光纤激光器的应力传感器

余少伟, 裴丽, 温晓东, 刘超, 李超

(北京交通大学 光波技术研究所, 北京 100044)

**摘要:** 提出并演示了一种基于大直径光纤锥的马赫曾德尔干涉仪应力传感器。以锥形光纤马赫曾德尔干涉仪作为滤波器, 对掺铒光纤的增益谱进行梳状滤波, 最终在环行光纤谐振腔中实现激光的产生并输出。所采用的马赫曾德尔干涉仪在作为滤波器件的同时也能够对光纤轴向应力进行传感, 最终实现激光器输出波长随应力增加而向短波长方向漂移, 实验结果显示其在波长 1 557 nm 附近传感的灵敏度达到了 3 pm/ $\mu\epsilon$ 。基于该锥形光纤的马赫曾德尔干涉仪具有成本低、制作简便和机械强度高的优点, 使其更有利于商业化规模制作。

**关键词:** 应力传感; 锥形光纤; 马赫曾德尔干涉仪; 环行腔光纤激光器

**中图分类号:** TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0222004

## Strain sensor based on ring cavity fiber laser

Yu Shaowei, Pei Li, Wen Xiaodong, Liu Chao, Li Chao

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** An up-tapered fiber strain sensor based on Mach-Zehnder interferometer (MZI) was proposed and demonstrated. With the MZI as a filter, the laser was finally generated in the optical fiber ring resonator through comb filtering at the gain spectrum of erbium-doped fiber. The MZI could work as filter as well as carry on the sensor of optical fiber axial strain, and thus realize the output wavelength of the laser blue-shifts with the increase of strain. The experiment result shows that the sensor around the wavelength of 1 557 nm exhibits the axial strain sensitivity of 3 pm/ $\mu\epsilon$  by monitoring the wavelength shift. Moreover, the up-tapered MZI fabrication process is very simple, cost effective and high mechanical strength.

**Key words:** strain sensor; up-tapered fiber; Mach-Zehnder interferometer; ring cavity fiber laser

收稿日期: 2015-06-11; 修订日期: 2015-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(61275076、61525501)

作者简介: 余少伟(1975-), 男, 博士生, 主要从事光纤通信、超宽带信号产生、MIMO 和 OFDM 等方面的研究。Email: 10111012@bjtu.edu.cn

导师简介: 裴丽(1970-), 女, 教授, 博士, 主要从事光纤通信、ROF、光纤传感方面的研究。Email: lipei@bjtu.edu.cn

## 0 引言

随着激光技术的不断进步,激光器件成本的不断降低,使激光器及相关器件的应用领域越来越宽,特别是在传感领域,大有取代电传感的趋势。一方面,电子传感器件的抗电磁干扰性相比光器件要差很多;另一方面,随着通信传输速率的不断加快,电子通信的容量瓶颈逐渐显现。基于光纤结构的光传感的基本材质是石英基光纤,光纤在制作成本、信息容量、抗电磁干扰等方面要远远优于电传感。

以对环境参数敏感的滤波器件直接作为光传感器是一个十分有效可行的实施方式,大量该类光器件被制作并实施,其中有一些甚至已经被应用在工程测量领域,其中比较有代表性的有光纤迈克尔逊干涉仪和马赫曾德尔干涉仪(MZI)。这两种干涉仪的区别在于完成光束分离与合并的器件是否为同一个元件:马赫曾德尔干涉仪中,分光器与合束器分别以两个不同的单元完成,而迈克尔逊干涉仪的这两个功能是由同一个元件完成的。在实现原理上两类干涉仪并无太大区别,均是将一束光首先分离成两束,两束光分别经历不同的光路再合束,由于两束光经历的光路不同,就产生了光程差,当两束光再次合束时则会出现干涉现象。以直线型光纤马赫曾德尔干涉仪为例,一方面是由于其制作较为方便,另一方面其损耗和滤波特性也相对较好。传统的直线型马赫曾德尔干涉仪的分光器和合束器为相同结构的分离元件,这种结构包括长周期光栅<sup>[1]</sup>、偏芯光纤衰减器<sup>[2]</sup>、光纤拉锥结构<sup>[3]</sup>,甚至是将一段特殊光纤熔接到普通单模光纤之间,这种特殊的光纤可以是多模光纤<sup>[4]</sup>、细芯光纤<sup>[5]</sup>、光子晶体光纤<sup>[6]</sup>等等,其作用就是在与单模光纤的熔接处使光束分离与合并。所有这些结构在实现众多环境参数(包括应力、折射率、曲率、位移、温度等)测量的同时也有其固有的一些缺点。比如,长周期光栅的写入就需光敏光纤、掩模板、紫外光激光器或是 CO<sub>2</sub> 激光器,这些要求使得其制作成本难以降低。传统的光纤拉锥结构使光纤在纤芯直径上大大降低,这也使其机械强度得不到保证,当光纤被拉伸或是被弯曲时,极易造成断裂。

为了克服以上困难,采用了与传统拉锥相反的

锥形光纤制作方法,使得光纤直径不降反增,在机械强度上大大增加,并且滤波特性并无明显变化,利用基于此种光纤锥结构的马赫曾德尔干涉仪作为滤波器件,实现激光应力传感。

## 1 滤波器的分析与制作

与其它类型的直线型光纤马赫曾德尔干涉仪类似,光的分束器与合束器分别由两个光纤锥实现,如图 1 所示。当光束从单模光纤的左端进入到光纤锥时,光被分离为两束:一束进入到单模光纤的包层,成为包层模沿包层传输;另一束继续保持在光纤纤芯中以基模传输。当两束光沿光纤传输到第二个光纤锥时,两束光被合并,合束后的光进入到光纤纤芯中,由于两束光的行进路线不同,产生了一定的相位差,当合束时就发生了干涉,产生梳状滤波光谱。利用这个特性,将该滤波器接入到环行腔激光器中可以对掺杂光纤的自发辐射光谱进行滤波,经过多次环行传输,最终产生激光输出,如图 2 所示。该应力传感器采用 980 nm 激光源作为泵浦,通过波分复用器(WDM)将泵浦光耦合到环行腔激光器中,隔离器的接入能够保证激光沿单方向环行,由掺铒光纤作为增益介质,实现信号光放大并起振成为激光器,锥形光纤的马赫曾德尔干涉仪的梳状滤波特性使其能够在掺铒光纤的增益谱中产生激光信号,最终通过耦合器将激光输出,以便测量。利用应力调节架将马赫曾德尔干涉仪两端固定,可以通过调节应力调节架在光纤轴向加载应力,实现应力传感的测

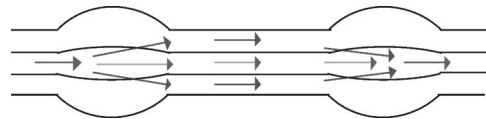


图 1 基于光纤锥结构的马赫曾德尔干涉仪

Fig.1 Mach-Zehnder interferometer based on up-tapers fiber

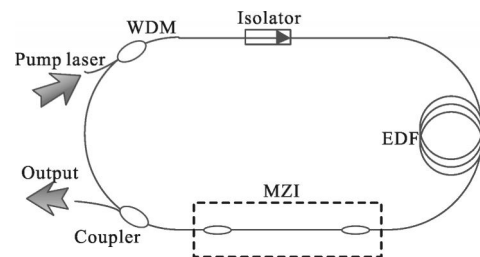


图 2 环行腔激光传感器结构图

Fig.2 Schematic of the ring cavity fiber laser sensing configuration

量。以大直径光纤锥的马赫曾德尔干涉仪作为应力传感的传感器件,其优点在于高强度的光纤结构使其能够抵抗的拉力更大,同时也增大了应力测量的范围。

根据之前工作<sup>[7-8]</sup>中所采用的方法,利用商用光纤熔接机进行锥形光纤的制作,制作完成的锥形光纤如图 3 所示,图中锥的最大直径为 284  $\mu\text{m}$ ,锥长度为 708  $\mu\text{m}$ ,并且在光纤上相隔 2.5 cm 处制作另一个锥形光纤,两个锥形光纤的几何尺寸接近,这保证了所制作的马赫曾德尔干涉仪具有较好的滤波性能,包括损耗和消光比。

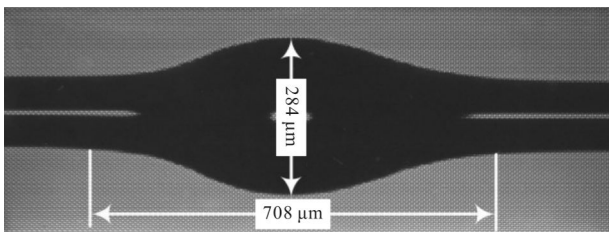


图 3 锥形光纤实验图

Fig.3 Experimental graph of the up-taper fiber

## 2 传感器系统的实验测试

通过对该滤波器的透射谱测量,得到如图 4 所示的光谱图,可以得知随着光纤轴向应力的增加,光谱波长向短波长方向移动。该马赫曾德尔干涉仪在 1540~1570 nm 的波长范围内的消光比为 5~10 dB。同时由于该马赫曾德尔干涉仪两个锥之间的光纤长度为 2.5 cm,因此决定了滤波器的梳状谱的自由光谱范围大约为 17 nm。

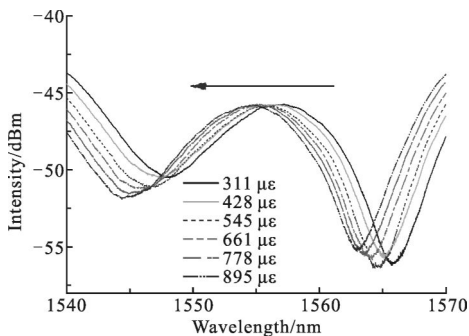


图 4 马赫曾德尔干涉仪的透射光谱图

Fig.4 Propagation spectra of the MZI

将此滤波器接入到图 1 所示的环形腔激光器中,测试输出光谱,得到如图 5 所示的光谱图。

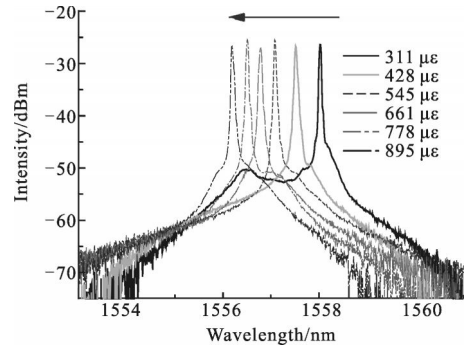


图 5 环形腔激光器输出激光光谱

Fig.5 Output spectra of the ring cavity fiber laser

根据图 5 绘制出该激光传感系统的波长漂移与应力的关系图,如图 6 所示。通过对实验数据的直线拟合,可以得到图中的直线,其斜率为  $-0.003 \text{ nm}/\mu\epsilon$ ,各实验数据点的线性度良好,近似为线性关系。由此得到该应力传感系统的传感灵敏度为  $3 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。

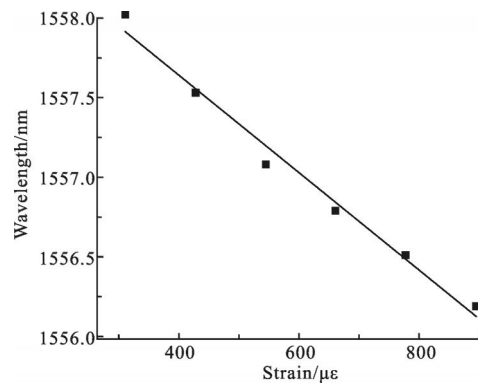


图 6 应力与波长移动之间的线性关系图

Fig.6 Nonlinear relationship between the strain and wavelength shifting

## 3 结论

通过利用商用光纤熔接机制作大直径光纤锥的马赫曾德尔干涉仪,以此干涉仪同时作为传感器件和滤波器,接入到环形腔光纤激光器中,实现激光的激发,通过对马赫曾德尔干涉仪轴向施加拉力,使得其滤波光谱发生变化,从而环形腔激光器的输出激光波长也相应的平移,实现了全光纤应力传感的目的。此传感系统的应力传感灵敏度为  $3 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ,相比传统的细锥光纤马赫曾德尔干涉仪,这种大直径光纤锥的结构在机械强度上大大增加,也就增加了传感器对应力的测量范围,而且无需对滤波器进行额外的保护,特别适用于工程应用。

## 参考文献:

- [1] Fu Hongyan, Shu Xuewen, Zhang Aping, et al. Implementation and characterization of liquid-level sensor based on a long-period fiber grating mach-zehnder interferometer.[J]. *Sensors Journal, IEEE*, 2011, 11(11): 2878-2882.
- [2] Tian Zhaobing, Yam Scott S-H, Loock Hans-Peter. Single-mode fiber refractive index sensor based on core-offset attenuators[J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2008, 20(16): 1387-1389.
- [3] Rodrigues da Silveira C, Weyl Albuquerque da Costa J C, Giraldi Maria Thereza Rocco, et al. A bent in-line Mach-Zehnder interferometer sensor to increase refractive index sensitivity [C]//Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), 2013 SBMO/IEEE MTT-S International, 2013: 1-4.
- [4] Wu Qiang, Semenova Yuliya, Yan Binbin, et al. Fiber refractometer based on a fiber Bragg grating and single-mode-multimode-single-mode fiber structure[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(12): 2197-2199.
- [5] Li Lecheng, Xia Li, Xie Zhenhai, et al. All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications. [J]. *Opt Express*, 2012, 20(10): 11109-11120.
- [6] Zheng J R, Yan P G, Yu Y Q, et al. Temperature and index insensitive strain sensor based on a photonic crystal fiber in line Mach-Zehnder interferometer.[J]. *Optics Communications*, 2013, 297: 7-11.
- [7] Wen Xiaodong, Ning Tigang, You Haidong, et al. Dumbbell-shaped Mach-Zehnder interferometer with high sensitivity of refractive index. [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2013, 25(18): 1839-1842.
- [8] Wen Xiaodong, Ning Tigang, You Haidong, et al. Up-tapered fiber Mach-Zehnder interferometer fabricated by using a fusion splicer[J]. *Optoelectronics Letters*, 2013, 9(5): 325-328.