

· 光学设计 ·

一种锥型光纤倾角传感器设计研究

姚 平

(武汉东湖学院 电信学院, 武汉 430212)

摘 要:介绍了一种双锥型光纤倾角传感器,传感器采用康宁SMF-28单模光纤,在光纤上加工两个光纤锥。光束经过第一个光纤锥时,纤芯内的部分基模光被激发为高阶的包层模,和芯层模式光一起在光纤内传输,到达第二个光纤锥时,包层模重新耦合进入芯层,并与芯层的基模光发生干涉,由于纤芯内的基模与包层模的有效折射率存在差异,从而引入相位差,干涉谱强度随着波长呈现峰谷值变化。倾斜角变化时,包层模的有效折射率也发生变化,干涉谱强度的峰值和谷值均产生移动,根据峰值或谷值的移动量,即可测量相对应的倾斜角度。实验结果表明,加工的光纤角度传感器能够有效的测量倾斜角度值,两个方向上的测量精度可分别达到 $0.151 \text{ nm}/^\circ$ 和 $0.087 \text{ nm}/^\circ$ 。

关键词:光纤角度传感器;马赫-曾德式干涉;双光纤锥

中图分类号:O436

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2017)-06-0035-04

Design and Research on Inclinometer Based on Fiber Taper

YAO Ping

(School of Electronic Information Engineering, Wuhan Donghu University, Wuhan 430212, China)

Abstract: An inclinometer based on dual tapered fiber is introduced. Corning single-mode fiber SMF-28 is used in the inclinometer. Two fiber tapers are fabricated in the fiber. When a light beam transmits through the first taper, high-order cladding modes are partially excited from the core mode. The cladding modes and the core mode propagate along the fiber together. When the light beam transmits through the second taper, the cladding modes are coupled into the core again and interfered with the core mode. As the effective refractive indexes of the core mode and the cladding modes are different, phase differences are introduced. The interference spectral intensity shows peaks and valleys at different wavelengths. As the effective refractive index of the cladding mode changes with the various of the tilt angle, the peaks and valleys of the interference spectral intensity will also shift. As a result, the tilt angle could be computed through the shift of a peak or a valley. Experimental results show that the tilt angle can be measured effectively with the fabricated fiber inclinometer. The accuracies for two directions are $0.151 \text{ nm}/^\circ$ and $0.087 \text{ nm}/^\circ$ respectively.

Key words: fiber inclinometer; Mach-Zehnder interferometer; dual fiber tapers

当前,在建筑与机械工程等领域,倾角传感器有着广泛的应用,如广州塔“小蛮腰”上使用了数百个光纤倾角传感器,发展结构简单、成本低廉、精度高的倾角传感器极具实用价值^[1-2]。倾角传感器的

类型多种多样,如光电学角度传感器、旋转编码式角度传感器、光纤角度传感器等。其中,光纤角度传感器具有分辨率高、可连续测量、抗电磁干扰、电绝缘性能好、耐腐蚀、稳定性好、结构简单、体积小、

收稿日期:2017-11-08

基金项目:湖北省自然科学基金项目青年基金(2015CFC890)

作者简介:姚平(1984-),男,湖北省随州市人,博士,讲师,主要研究方向是光纤传感与测量。

易于批量生产等特点,受到工程领域的格外重视。

光纤角度传感器主要有两类:光纤光栅式和干涉式。光纤光栅角度传感器具有稳定性好,测量精度高等诸多优点,不足之处在于其制备通常需要紫外激光器、相位板、光敏光纤、氢载敏化处理等,成本一般较高,制作难度大。干涉式光纤角度传感器结构简单、成本较低、制作相对简单,其温度稳定性、响应的线性度和重复性都比较好,干涉式结构可分为马赫-曾德式干涉、迈克尔逊式干涉、法布里-帕罗式干涉、偏振模式干涉等^[3-13]。

介绍了一种双锥形光纤角度传感器,该传感器属于马赫-曾德式干涉光纤传感器,采用SMF-28单模光纤,在光纤中集成有两个光纤锥,在第一个光纤锥区纤芯内的部分基模光激发为包层内的高阶模式光,在另一光纤锥区包层内的高阶模式光重新耦合进芯层,并与纤芯内的基模光发生干涉,角度发生变化使相位差发生变化,导致干涉峰和干涉谷发生移动,从而测量角度值。

1 传感器结构与工作原理

光纤角度传感器的结构如图1所示。

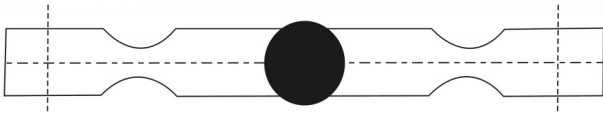


图1 光纤倾角传感器结构

在光纤两端集成有两个光纤锥,光纤两端固定,中间固定有一穿孔钢珠。采用标准单模光纤(SSMF, Corning SMF-28, 芯层直径6 μm, 包层直径125 μm)。

光在SSMF内传输时仅存在基模模式,光能量主要被约束在纤芯层内。光纤的芯层直径是决定光传输模式的一个重要参数,不同芯径的光纤对光的约束能力不同。当光传播到光纤锥区时,光传输的截止条件发生改变,芯层内的部分基模光被激发为高阶模式的光,高阶模式光在包层内传输,到达另一个光纤锥时,包层内的高阶模式光重新耦合进芯层,并与芯层的基模光发生干涉,由于不同模式光的有效折射率不同,高阶模式光和基模光具有不同的光程差,因此干涉光强度随着波长有强弱变化的关系。通过探测干涉光强,即某个干涉峰谷值的

波长变化值,从而测量物理量^[1-2]。

对于图示的光纤干涉仪,出射端纤芯层基模光和包层内的激发光的相位差可表示如下

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

其中, Δn_{eff}^m 为基模和第 m 阶包层模的有效折射率之差; λ 为光波长; L 为两个光纤锥之间的距离。当 $\phi_m = (2p+1)\pi$ (p 为整数) 时, 芯层基模和第 m 阶包层模干涉相消, 频谱强度取极小值, 对应的波长值为

$$\lambda_p^m = \frac{2}{2p+1} \Delta n_{\text{eff}}^m L \quad (2)$$

当 $\phi_m = 2p\pi$ (p 为整数) 时, 芯层基模和第 m 阶包层模干涉相涨, 频谱强度取极大值, 对应的光波长值为

$$\tilde{\lambda}_p^m = \frac{1}{p} \Delta n_{\text{eff}}^m L \quad (3)$$

当倾斜角为 θ 时, 由于钢珠的重力作用, 施加于光纤锥锥面的应变向量可计算如下

$$\tilde{\varepsilon}(\theta) = \frac{mg \cdot \sin(\theta)}{AE} \quad (4)$$

其中, A 为光纤锥截面的面积; m 为钢球的质量; g 为重力加速度; E 为光纤的杨氏模量。

根据式(2)可以得到如下公式

$$d\lambda_p^m = \frac{2}{2p+1} (\Delta n_{\text{eff}}^m dL + L d(\Delta n_{\text{eff}}^m)) \quad (5)$$

$$\frac{d\lambda_p^m}{\lambda_p^m} = \frac{dL}{L} + \frac{1}{\Delta n_{\text{eff}}^m} \frac{\partial(\Delta n_{\text{eff}}^m)}{\partial \varepsilon} \varepsilon = \frac{dL}{L} + p_e \varepsilon \quad (6)$$

其中, $p_e = \frac{1}{\Delta n_{\text{eff}}^m} \frac{\partial(\Delta n_{\text{eff}}^m)}{\partial \varepsilon}$ 为光纤材料的有效光弹性系数。

由于光纤的两端固定, $\frac{dL}{L}$ 可近似趋于0。当光纤被拉伸时, $p_e \varepsilon$ 为 $d\lambda_p^m$ 负; 当光纤被压缩时, $p_e \varepsilon$ 为正。对于双光纤锥结构, 可得到下式

$$\frac{d\lambda_p^m}{\lambda_p^m} \approx \frac{p_e mg \sin(\theta)}{\pi E} \left(\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right) \quad (7)$$

从上式可以看出, 对于给定结构的传感器结构, $d\lambda_p^m / \lambda_p^m$ 与 $\sin(\theta)$ 成正比。对于特定的某阶包层模式, $d\lambda_p^m$ 与倾斜角 θ 呈正弦变化。在光纤锥区, 可以激发多阶包层模式, 干涉谱强度是多阶包层模式与纤芯模共同作用的结果。

实际加工过程中, 光纤锥的锥腰半径不容易精确控制, 加工了多组结构, 下面以其中一组进行测量, 两组锥腰半径分别为 54.58 μm 和 63.66 μm, 一

个光纤锥图像如图2所示。

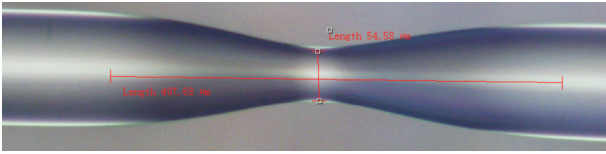


图2 光纤锥图像

2 实验测量

光纤倾角传感器的实验测试装置如图3所示。

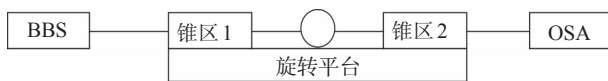


图3 光纤倾角传感器实验装置

其中BBS为宽带光源(broad band source), OSA为光学频谱分析仪(optical spectrum analyzer), 宽带光源发出的光沿着单模光纤经过第一个锥区, 激发有效折射率不同的包层模, 这些包层模在经过第二个锥区时与纤芯基模重新耦合, 发生干涉, 干涉光经光纤到达光学频谱分析仪进行频谱分析。

光纤倾角传感器的性能测试过程如下:

(1)把光纤倾角传感器放置在一个旋转平台上, 倾斜角的数值可以通过旋转平台上标示的角度值读出; (2)调节旋转平台的角度值从 -75° 变化至 75° 对于各角度值, 使用光学频谱分析仪测量光纤倾角传感器输出光的光谱强度曲线。

测量过程中采用宽谱光源, 在 1500 nm 波长附近进行测量。在不同的倾斜角度下, 使用光谱仪对干涉光强进行光谱测量, 其中一组输出光的光谱强度曲线如图4所示。

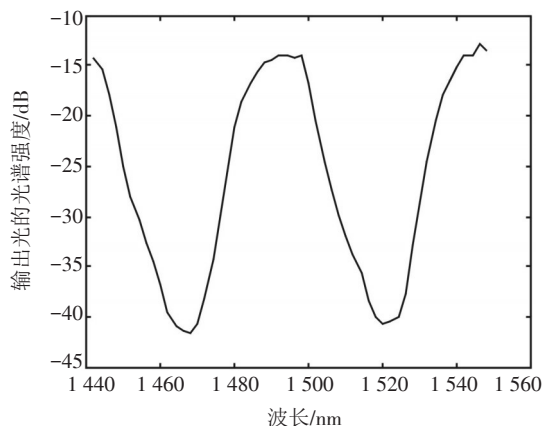


图4 输出光的光谱强度曲线

曲线在 1468 nm 和 1520 nm 附近存在极小值, 当倾斜角度变化时, 谱线的极大值和极小值对应的波长均会发生移动, 根据极大值点和极小值点的波长移动量均可以测量角度值, 如下结果采用 1468 nm 附近的较小值点对应的波长。

测量的波长移动量随倾斜角度的变化曲线如图5所示。

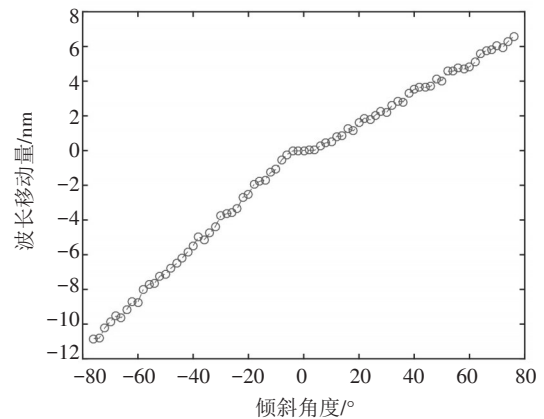


图5 波长变化量随倾斜角的变化曲线

在倾斜角度的零点附近曲线存在一定的阈值, 阈值大小约为 4.7° , 该阈值主要是由于静摩擦力的存在; 在倾斜角的正负变化区间, 两段曲线的斜率存在一定的差异, 通过最小二乘法进行拟合, 分别得到斜率值约为 $0.151\text{ nm}/^\circ$ 和 $0.087\text{ nm}/^\circ$ 其主要原因是加工过程中在保证光纤内处处受力均匀的情况下光纤传感器的两端固定比较难实现; 在倾斜角的正负变化区间, 两段曲线的线性度(阈值区域以外)较好, 因此可以较好的实现倾斜角度的测量。相比于文献[14]、文献[15]中基于光纤光栅的角度传感器的测量精度($62.6\text{ pm}/^\circ$ 和 $77\text{ pm}/^\circ$), 文中的测量精度略好一些。

3 结论

针对设计的一种基于马赫-曾德式干涉的双锥形光纤角度传感器, 详细介绍了其工作原理, 即在第一个光纤锥区激发包层模, 沿着光纤传输到达第二个锥区, 包层模重新耦合进纤芯, 并与纤芯内的基模光束干涉, 纤芯模和包层模的光程差发生变化, 角度变化时光程差相应的改变, 从而干涉峰值和谷值会发生移动, 通过检测干涉峰值或谷值的移动, 可以测量角度值的变化。实验结果表

明,该角度传感器可以精确的测量倾斜角度值,在 $-75^{\circ}\sim 0^{\circ}$ 和 $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 的角度范围内测量的精度可分别达到 $0.151\text{ nm}/^{\circ}$ 和 $0.087\text{ nm}/^{\circ}$ 。

本光纤角度传感器在加工复杂性和成本方面极具优势,具有广泛的应用前景:光学平台的倾角监测;机械臂的运动监测;无人机飞行时的角度检测;工程结构的稳定性监测等。

参考文献

- [1] Lee Cheng-ling, Shih Wen-cheng, Hsu Jui-ming, et al. Asymmetrical dual tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for fiber-optic directional tilt sensor[J]. Optics Express, 2014, 22(20): 24646-24654.
- [2] 夏天豪. 波长调制型光纤传感器及其应用[D]. 杭州:浙江大学, 2010:12-21.
- [3] Enbang L, W Xiao-lin, Z Chao. Fiber-optic temperature sensor based on interference of selective higher-order modes[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(9): 91119-1-3.
- [4] Amaral L M N, Frazao O, Santos J L, et al. Fiber-optic inclinometer based on taper Michaelson interferometer[J]. IEEE Sens J, 2011, 11(9): 1811-1814.
- [5] Bajic J S, Stupar D Z, Manojlovic L M, et al. A simple, low-cost, high sensitivity fiber-optic tilt sensor[J]. Sens Actuators A Phys, 2012, 185: 33-38.
- [6] Lu P, Men L, Sooley K, et al. Tapered fiber Mach Zehnder interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. Appl Phys Lett, 2009, 94(13): 131110-1-3.
- [7] Hsu J M, Lee C L, Chang H P, et al. Highly sensitive tapered fiber Mach-Zehnder interferometer for liquid level sensing[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2013, 25(14): 1354-1357.
- [8] Tian Z, Yam S S-H. In-line abrupt taper optical fiber Mach-Zehnder interferometric strain sensor[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2009, 21(3): 161-163e.
- [9] Tian Z, Yam S, Bames J, et al. Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(8): 626-628.
- [10] Bongkyun Kim, Tae-Hoon Kim, Long Cui, et al. Twin core photonic crystal fiber for in-line Mach-Zehnder interferometric sensing applications[J]. Optics Express, 2009, 17(18): 15502-15507.
- [11] Rodrigo M Gerosa, Danilo H Spadoti, Leonardo de S Menezes, et al. In-fiber modal Mach-Zehnder interferometer based on the locally post-processed core of a photonic crystal fiber[J]. Optics Express, 2011, 19(4): 3124-3129.
- [12] Du J, Dai Y, Leisure G K P, et al. Photonic crystal fiber based Mach-Zehnder interferometer for DPSK signal demodulation[J]. Optics Express, 2010, 18(8): 7917-7922.
- [13] Choi H Y, Kim M J, Lee B H. All-fiber Mach-Zehnder type interferometers formed in photonic crystal fiber[J]. Optics Express, 2007, 15(9): 5711-5720.
- [14] Aneesh R, Maharana M, Munendhar P, et al. Simple temperature insensitive fiber Bragg grating based tilt sensor with enhanced tenability[J]. Appl Opt, 2011, 50(25): 172-176.
- [15] Wang Y, Zhao C L, Hu L, et al. A tilt sensor with a compact dimension based on a long-period fiber grating[J]. Rev Sci Instrum, 2011, 82(9): 093106.

版权声明

本刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊,并加入中国光学期刊网,所刊载的文章在国内外数据库检索机构及网站(包括纸板、光盘版、网络版)报道时,不再征求作者意见。稿件刊登录用后作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给,并赠送当期样刊两份。