

文章编号: 1001-3806(2015)04-0450-03

基于保偏光子晶体光纤的高灵敏度曲率传感器

陈大风, 鲁平*, 刘德明

(华中科技大学 光学与电子信息学院 下一代互联网接入国家工程实验室, 武汉 430074)

摘要: 为了高精度测量小曲率, 采用单模-鼓包-保偏光子晶体光纤-多模-单模光纤组成的结构, 其中多模光纤和单模光纤之间错位熔接。通过理论分析和实验验证得到在 $0.04582\text{m}^{-1} \sim 0.054776\text{m}^{-1}$ 及 $0.054776\text{m}^{-1} \sim 0.06929\text{m}^{-1}$ 曲率范围内, 谐振波长漂移与曲率变化之间分别存在着线性关系。结果表明, 该曲率传感器灵敏度值分别为 $93.95\text{nm}/\text{m}^{-1}$ 和 $30.89\text{nm}/\text{m}^{-1}$, 可以应用于健康监测等需要测量小曲率的场合。

关键词: 传感器技术; 曲率传感器; 马赫-曾德干涉仪; 保偏光子晶体光纤

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.04.004

Highly sensitive curvature sensors based on polarization-maintaining photonic crystal fibers

CHEN Dafeng, LU Ping, LIU Deming

(National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: For high accuracy of curvature measurement, a curvature sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber (PM-PCF) was proposed based on Mach-Zehnder interferometer structure. The fiber structure of the sensor head was formed by single-mode, up-taper, PM-PCF, multimode and single-mode fibers. Dislocation fusion was done between multimode and single mode fibers. After theoretical analysis and experiment verification, the linear relationship between resonance wavelength shift and curvature change in the curvature range of $0.04582\text{m}^{-1} \sim 0.054776\text{m}^{-1}$ and $0.054776\text{m}^{-1} \sim 0.06929\text{m}^{-1}$ was proved. The results show that the curvature sensor can be implied in health monitoring when the sensitivities of the sensor are $93.95\text{nm}/\text{m}^{-1}$ and $30.89\text{nm}/\text{m}^{-1}$.

Key words: sensor technique; curvature sensor; Mach-Zehnder interferometer; polarization-maintaining photonic crystal fiber

引言

近年来, 全光纤在线马赫-曾德尔干涉仪 (in-line Mach-Zehnder interferometer, IMZI) 已经被广泛研究。通过引入模式耦合器, 在线马赫-曾德尔干涉仪可以实现纤芯模式与包层模式的耦合和再耦合, 它的优点是结构结实而紧凑, 容易制造而且可采用波长或者功率编码进行测量, 所以已经广泛应用于应变、温度、折射率^[1-3]等等一些测量应用。基于在线马赫-曾德干涉仪的曲率传感器中有很多是通过熔接不同类型的光纤制得。GONG 等人提出的是单模-多模-单模结构, 测得的曲率灵敏度最大为 $10.38\text{nm}/\text{m}^{-1}$, 测量范围是

$0.25\text{m}^{-1} \sim 0.5\text{m}^{-1}$ ^[4]。WANG 等人提出了多模-单模-多模结构进行曲率测量, 得到的灵敏度最大为 $(14.40 \pm 0.02)\text{nm}/\text{m}^{-1}$ ^[5]。MAO 等人通过错位熔接得到的单模-多模-单模结构的最大曲率灵敏度是 $22.947\text{nm}/\text{m}^{-1}$ ^[6]。

还有一些曲率传感器是通过在单模光纤上制作出特殊结构制得的, 比如拉锥、刻光栅等等。相应的研究有: 级联两个光纤锥体结构^[7], 将1根多模光纤和1个光纤光栅^[8]或者长周期光纤光栅^[9]串联来进行曲率传感。然而拉锥后的光纤比较脆弱, 在测量的过程中容易折断, 而涂上保护材料又会增加实验的复杂度。同样, 引入光纤光栅也会增加实验的难度, 并且易受温度的影响^[10]。

目前, 一些基于特种光纤的曲率传感器也得到了研究, 比如在两段单模光纤之间熔接一段光子晶体光纤^[11], 或者双芯光纤^[12]。XU 等人提出了一种曲率传感器, 它是基于单模-双芯-单模结构^[13], 得到的灵敏度为 $4.3421\text{nm}/\text{m}^{-1}$ 。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61275083)

作者简介: 陈大风 (1989-), 女, 硕士研究生, 现主要从事光纤传感的研究。

* 通讯联系人。E-mail: pluriver@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2014-07-16; 收到修改稿日期: 2014-09-15

本文中提出一种新颖的曲率传感器结构,其是由单模-鼓包-保偏光子晶体光纤-多模-单模光纤所组成。该传感器在 $0.04582\text{m}^{-1} \sim 0.054776\text{m}^{-1}$ 以及 $0.054776\text{m}^{-1} \sim 0.06929\text{m}^{-1}$ 曲率范围内均呈现出线性灵敏度,灵敏度值分别为 $93.95\text{nm}/\text{m}^{-1}$ 和 $30.89\text{nm}/\text{m}^{-1}$,该灵敏度比参考文献[5]和参考文献[11]中的都高,同时光子晶体光纤对温度不敏感,所以该结构适合用于高灵敏度小曲率测量,且应用前景更大。

1 实验原理和传感头设计

传感头设计如图 1a 所示。单模光纤(single-mode fiber, SMF)里的光通过鼓包时,部分光功率被耦合到保偏光子晶体光纤(polarization-maintaining photonic crystal fiber, PM-PCF)的包层,而纤芯和包层里的光功率分配决定了干涉谱的对比度,所以控制鼓包的大小及保偏光子晶体光纤和多模光纤(multimode fiber, MMF)的长度很重要。保偏光子晶体光纤纤芯和包层里的光在多模光纤的纤芯里发生干涉后再被耦合到单模光纤里输出,这样就构成了一个全光纤在线马赫-曾德尔干涉仪。单模光纤与长度 $L_1 = 3.6\text{cm}$ 的保偏光子晶体光纤通过熔接机(Fujikura FSM-60S)手动模式熔接成一个鼓包,这个只需将熔接机的重叠参量设成 $25\mu\text{m}$ 以上,此处是 $35\mu\text{m}$ 。多模光纤(长度 $L_2 = 3\text{mm}$)与保偏光子晶体光纤错位熔接,错位 $22\mu\text{m}$ 。图 1b 显示的是本实验中所用的保偏光子晶体光纤的截面显微图。该光纤剥去涂覆层后的直径为 $125\mu\text{m}$ 。

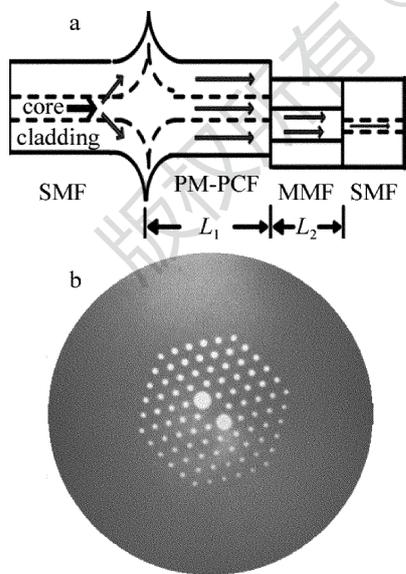


Fig. 1 a—schematic diagram of proposed curvature sensor head b—cross-section micrograph of PM-PCF

鼓包的设计原因是:单模光纤与保偏光子晶体光纤熔接容易产生气泡^[14],在实验过程中发现通过重叠熔接(即熔成鼓包)就可以避免气泡产生,同时由于坍塌

区域的存在,所以重叠值选为 $35\mu\text{m}$,得到一个小鼓包。当然坍塌区域可通过适当的熔接参量避免,但是这对操作者的熔接技术有很大的要求,所以本文中充分利用了坍塌区域及重叠熔接降低了对熔接技术的要求。光纤长度的选择是基于高阶模容易损耗的原理,因而尽量选择短一些的。

基于纤芯模式和包层模式的总相位差^[15]公式,当相位差满足 $\phi = (2m + 1)\pi$ 时, m 是一个非负整数,则谐振的波谷波长为:

$$\lambda_m = 2(n_{\text{co-eff}} - n_{\text{cl-eff}})L / (2m + 1) \quad (1)$$

式中, $n_{\text{co-eff}}$ 和 $n_{\text{cl-eff}}$ 分别表示的是纤芯和包层模式的有效折射率, L 是在线马赫-曾德尔干涉仪的物理长度, λ_m 是 m 对应的真空波长。

当某一曲率施加于在线马赫-曾德尔干涉仪上时,纤芯和包层模式的相位差就会发生变化,干涉谱的波谷波长则发生漂移,这样就可通过测试波长的漂移来得到所施加的曲率大小。

2 实验装置与实验结果

图 2 所示是实验中所用的曲率测量装置,一台输出光谱为 $(1520 \sim 1610)\text{nm}$ 的放大自发辐射(amplified spontaneous emission, ASE)光源,用来探测传感器输出光谱的光谱分析仪(optical spectrum analyzer, OSA)(YOKOGAWA AQ6370C),其分辨率为 0.02nm 。实验中用到的保偏光子晶体光纤和单模光纤都是由长飞光纤光缆有限公司所制造。该在线马赫-曾德尔干涉仪的两端由位移平台上的光纤夹持器夹住,通过调节位移平台上的千分尺(分辨率为 $10\mu\text{m}$)引入位移便可以产生弯曲以改变传感光纤的曲率。整个光学系统都是放置在防震光学平台上以保证其稳定性。

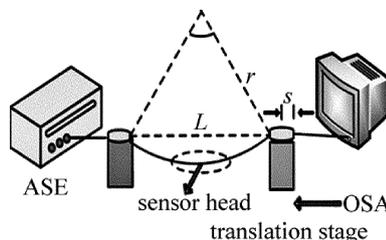


Fig. 2 Experimental setup of curvature sensor

由几何分析可得曲率与位移 s 之间的关系式:

$$r \times \sin(L/2r) = (L - s)/2 \quad (2)$$

式中, L 是两个光纤夹持器之间的初始位置(即马赫-曾德尔干涉仪的物理长度),此处为 20cm , s 是位移平台向内移动的距离, r 是弯曲的半径。

图 3 中给出的是室温下(大约为 25°C)没有引入曲率时,该传感器的传输光谱。作者选择位于 1540nm 附近的波谷波长进行实验。

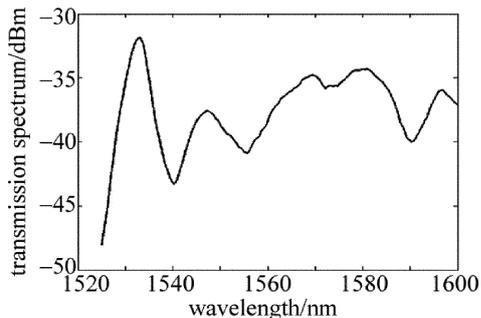


Fig. 3 Transmission spectrum of IMZI sensor without curvature

实验结果如图4所示,位移为 $70\mu\text{m} \sim 160\mu\text{m}$, 对应的曲率为 $0.04582\text{m}^{-1} \sim 0.06929\text{m}^{-1}$, 分别测出相应的传输光谱。图所呈现的趋势是随着曲率的增加,波谷波长向短波长漂移。

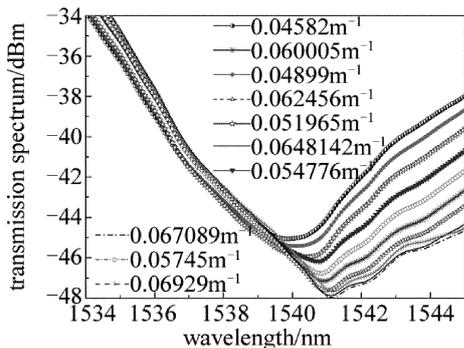


Fig. 4 Transmission spectra of IMZI sensor under different curvatures

每个曲率都对应着一个波谷波长,数据整理如图5所示,表示波长和曲率变化之间的关系,拟合的结果显示在 $0.04582\text{m}^{-1} \sim 0.054776\text{m}^{-1}$ 及 $0.054776\text{m}^{-1} \sim 0.06929\text{m}^{-1}$ 曲率范围内各自呈现线性关系,灵敏度值分别为 $93.95\text{nm}/\text{m}^{-1}$, $30.89\text{nm}/\text{m}^{-1}$, 相应得到该传感器曲率测量的分辨率分别为 0.0002m^{-1} 和 0.0006m^{-1} , 该分辨率受光谱分析仪的分辨率所限制。因此该传感器可以应用于高精度的小曲率测量场合。

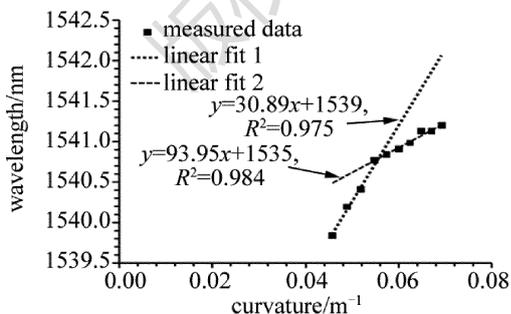


Fig. 5 Relationship between wavelength and curvature

3 结论

提出了一种小曲率传感器结构,并对其曲率灵敏度进行了理论分析和实验测量,测得的曲率灵敏度在 $0.04582\text{m}^{-1} \sim 0.054776\text{m}^{-1}$ 及 $0.054776\text{m}^{-1} \sim$

0.06929m^{-1} 范围内分别为 $93.95\text{nm}/\text{m}^{-1}$, $30.89\text{nm}/\text{m}^{-1}$, 且各自成线性关系。因此,该保偏光子晶体光纤曲率传感器在健康监测等需要测量小曲率的场合具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] 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.
- [2] GENG Y F, LI X J, TAN X L, *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] LU Y F, SHEN Ch Y, ZHONG Ch, *et al.* Refractive index and temperature sensor based on double-pass M-Z interferometer with an FBG [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(11): 1124-1127.
- [4] GONG Y, ZHAO T, RAO Y J, *et al.* All-fiber curvature sensor based on multimode interference[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(11): 679-681.
- [5] WANG R H, ZHANG J, WENG Y Y, *et al.* Highly sensitive curvature sensor using an in-fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(5): 1766-1770.
- [6] MAO L L, LU P, LAO Z F, *et al.* Highly sensitive curvature sensor based on single-mode fiber using core-offset splicing [J]. Optics & Laser Technology, 2014, 57: 39-43.
- [7] MONZON-HERNANDEZ D, MARTINEZ-RIOS A, TORRES-GOMEZ I, *et al.* Compact optical fiber curvature sensor based on concatenating two tapers[J]. Optics Letters, 2011, 36(22): 4380-4382.
- [8] ZHOU W J, ZHOU Y, DONG X Y, *et al.* Fiber-optic curvature sensor based on cladding-mode Bragg grating excited by fiber multimode interferometer[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(3): 1051-1057.
- [9] FRAZI O, VIEGAS J, CALDAS P, *et al.* All-fiber Mach-Zehnder curvature sensor based on multimode interference combined with a long-period grating[J]. Optics Letters, 2007, 32(21): 3074-3076.
- [10] WAN L B, ZHANG B M, WANG D F, *et al.* A kind of fiber Bragg grating strain sensor with jacket [J]. Laser Technology, 2002, 26(5): 385-387 (in Chinese).
- [11] DENG M, TANG Ch P, ZHU T, *et al.* Highly sensitive bend sensor based on Mach-Zehnder interferometer using photonic crystal fiber [J]. Optics Communications, 2011, 284(12): 2849-2853.
- [12] YIN G L, LOU Sh Q, ZOU H. Compact and high sensitivity curvature sensor based on twin core fiber coupler[J]. Proceedings of the SPIE, 2012, 8421: 84212P.
- [13] XU Zh L, SUN Q Zh, LI X L, *et al.* Dual core photonic crystal fiber based Mach-Zehnder interferometer assisted with two tapers for bending measurement [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim. Washington DC, USA: Optical Society of America, 2013; ThF1_3.
- [14] DENG M, TANG Ch P, ZHU T, *et al.* PCF-based Fabry-Pérot interferometric sensor for strain measurement at high temperatures[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(11): 700-702.
- [15] ZHANG Sh Sh, ZHANG W G, GAO Sh Ch, *et al.* Fiber-optic bending vector sensor based on Mach-Zehnder interferometer exploiting lateral-offset and up-taper [J]. Optics Letters, 2012, 37(21): 4480-4482.