

基于多芯少模光纤位移传感器的研究

张玉龙 贾大功 李 帅 吉 喆 张红霞 刘铁根 张以谟

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室 微光机电系统技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 提出一种基于新型多芯少模光纤模式干涉原理的位移传感器,该传感器由两段单模光纤和一段多芯少模光纤组成。研究了该传感器的实现原理,并实验验证。实验结果表明当光纤轴向被拉伸 $0\sim 60\ \mu\text{m}$ 时,该新型传感器的检测灵敏度为 $-61.17\ \text{pm}/\mu\text{m}$,与理论计算结果之间的误差小于 3.9% 。因此,当使用高分辨率光谱仪作为接收器时,该传感器可检测 $17\ \text{nm}$ 的位移变化。

关键词 传感器; 光纤传感器; 多芯少模光纤; 模式干涉; 位移变化量检测

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0905006

Study of Displacement Sensor Based on Few-Mode Multi-Core Fiber

Zhang Yulong Jia Dagong Li Shuai Ji Zhe Zhang Hongxia Liu Tiegeng Zhang Yimo

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education, Key Laboratory of Micro-Opto-Electro-Mechanical System Technology, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A new type displacement sensor based on few-mode multi-core fiber is presented. The sensor consists of two segments of single mode fiber and a segment of few-mode multi-core fiber. The sensing principle of the sensor is investigated and the experiments are performed to verify its feasibility. The experimental results show that the sensitivity of this sensor is $-61.17\ \text{pm}/\mu\text{m}$ with the elongation from 0 to $60\ \mu\text{m}$, error between the experimental results and the theoretical calculation is less than 3.9% . So the minimum change of displacement detected is $17\ \text{nm}$ by using an optical spectrum analyzer (OSA) with high resolution.

Key words sensors; optical fiber sensor; few-mode multi-core fiber; mode interference; displacement detection

OCIS codes 060.2370; 060.2330; 060.2310

1 引 言

多芯少模光纤(FMMCF)是一种新型传输光纤,被用来满足由于网络用户飞速增长带来的超大带宽需求。基于多芯少模光纤的光信号传输问题已成为光纤通信领域的一个研究热点^[1-4]。由于该光纤具有传输容量大、单根光纤传输信道多、较低的非线性、低的模式色散、几个模式在光纤中同时传输等优点^[5],不仅提升了光纤的传输容量,还可以利用光纤中模式间的关系实现外界物理量的检测。

微小位移测量在航空航天、桥梁建筑、大型设备等领域备受关注。目前已提出多种位移传感器,按照实现的原理,现有传感器可以分为两类:基于干涉理论传感器和基于光纤反射原理传感器。其中基于干涉理论的传感器有基于法布里-珀罗(F-P)原理的位移传感器^[6-8]、基于马赫-曾德尔干涉仪的位移传感器^[9]、基于迈克耳孙干涉仪的位移传感器^[10]、基于多模干涉理论的位移传感器^[11];基于反射原理的传感器有基于光纤布拉格光栅(FBG)的位移传感

收稿日期: 2014-03-12; **收到修改稿日期**: 2014-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(61377077)、国家 973 计划(2014CB340103)、天津市科技支撑重点项目(11ZCKFSF00400)

作者简介: 张玉龙(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感和光电检测等方面的研究。E-mail: zzyll924@126.com

导师简介: 贾大功(1972—),男,副教授,主要从事光纤传感、光通信和光电检测等方面的研究。

E-mail: dagongjia@tju.edu.cn(通信联系人)(中国光学学会会员号: s042011620s)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

器^[12-13]、基于光纤反射式的位移传感器^[14]等。而利用多芯少模光纤进行位移变化量的检测还未见报道,因此本文提出一种基于模式干涉原理的新型多芯少模光纤位移传感器。该传感器相比于基于光纤反射原理的位移传感器具有更高的检测灵敏度和精度;相比于基于马赫-曾德尔和迈克耳孙干涉原理的位移传感器,该新型传感器具有结构简单、装配方便、不需要设置参考臂等优点;相比于基于多模干涉理论的位移传感器,该新型传感器具有传导模式少且稳定,理论分析时因不做近似处理而使计算结果较准确的优点。故本文重点分析了该传感器的传感

原理,实验研究了该传感器的可行性,实验结果表明,该新型光纤在传感领域具有良好的研究价值和应用前景。

2 位移传感器工作原理

该传感器由两根单模光纤(SMF)和一根多芯少模光纤构成,其中多芯少模光纤是传感单元,其结构如图1所示。该光纤内含有7根纤芯,每根纤芯的结构和参数都相同,可以传输少量低阶模式。当传感器工作时,光纤内只激发两个低阶模式(LP₀₁和LP₁₁模式),可有效避免高阶模式对于干涉信号的干扰。

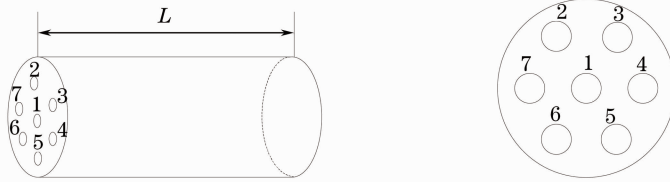


图1 多芯少模光纤

Fig. 1 Few-mode multi-core fiber

该位移传感的工作原理是利用少模光纤内LP₀₁模式和LP₁₁模式之间的干涉形成干涉峰和干涉谷,通过测量干涉峰或干涉谷对应波长移动量,可以解调出位移变化量。设多芯少模光纤的长度为L,LP₀₁模式和LP₁₁模式轴向传播常数分别是β₀₁和β₁₁,两者之间的差可以表示为

$$(\beta_{01} - \beta_{11}) = \frac{u_{11}^2 - u_{01}^2}{2k_0 n_{co} a^2}, u_{11} > u_{01}, \quad (1)$$

式中u₁₁和u₀₁为一阶和零阶贝塞尔方程的根;a=8 μm为少模光纤的半径;k=2π/λ为自由空间的波数,λ为波长;n_{co}=1.463为少模光纤纤芯折射率。纤芯内两个低阶模式传输距离L后形成干涉谷(干涉谷比干涉峰明显)的条件为

$$\frac{u_{11}^2 - u_{01}^2}{2k_0 n_{co} a^2} L = (2N + 1)\pi, N = 1, 2, 3, \dots, \quad (2)$$

干涉谷对应的波长(特征波长)可表示为

$$\lambda = \frac{4(2N + 1)\pi^2 a^2 n_{co}}{(u_{11}^2 - u_{01}^2)L}, \quad (3)$$

从(3)式可以看出,波长λ是少模光纤半径、纤芯折

射率、光纤长度的函数。当物体位移发生变化时,贴附在物体表面的多芯少模光纤的长度、纤芯折射率、半径都会发生相应的变化,因而使得干涉谷对应波长发生移动,通过测量特征波长的移动量即可以解调出位移的变化量。假设外界温度基本保持不变,特征波长的移动量与位移的变化量关系为

$$\Delta L = \frac{-L}{(1 + 2\sigma + p_e)\lambda} \cdot \Delta\lambda, \quad (4)$$

式中σ=0.17为石英光纤的泊松比,ΔL为位移变化量,即光纤所贴附物体的位移量,对于光纤的有效弹光系数p_e可表示为

$$p_e = \frac{n_{co}^2}{2} [p_{12} - \sigma(p_{11} + p_{12})], \quad (5)$$

式中p₁₁=0.12和p₁₂=0.27表示光纤材料的弹光系数。通过(4)式便可以计算外界物体位移变化量。

3 实验与结果

为了验证该新型位移传感器的可行性,搭建了实验系统,整个位移变化量检测的实验装置如图2

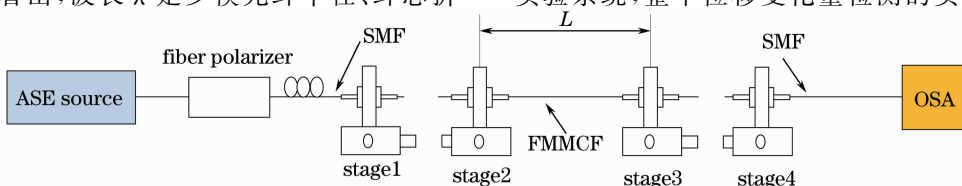


图2 位移检测实验装置图

Fig. 2 Experimental setup of displacement detection

所示。实验时截取了一段长 41 mm 的多芯少模光纤作为传感头,在该光纤的两端,通过两根标准单模光纤实现光信号输入/输出。实验系统中光源为放大自发辐射(ASE)宽带光源,波长范围为 1525 ~ 1565 nm;接收器是高分辨率的光谱仪(OSA)。

实验过程中单模光纤分别与多芯少模光纤的 1 号纤芯和 7 号纤芯对准耦合,耦合时利用面阵 CCD 测量了少模光纤出射端的模场分布图,如图 3 所示。

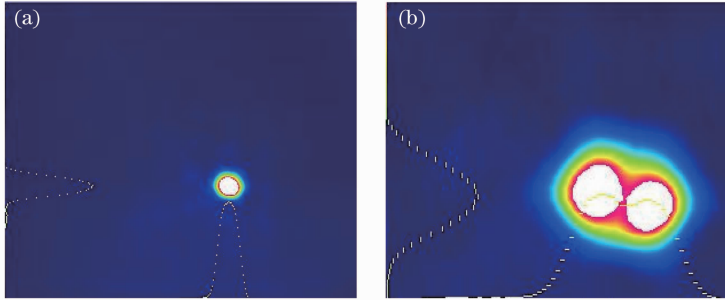


图 3 出射端的光斑模场分布图。(a) LP₀₁ 模式光斑图;(b) LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式光斑图

Fig. 3 Mode field distributions of the output light. (a) Diagram of LP₀₁ mode; (b) diagram of LP₀₁ and LP₁₁ mode

实验过程中为了提高测量精度、减小误差,利用该新型光纤多芯的特点,对同一个位移状态进行多次测量求取平均值。在某一位移状态下光谱仪采集了不同芯的干涉谱,其中图 4(a)和(b)分别是 1 号纤芯和 7 号纤芯出射的干涉谱,从图 4 中可以看出在温度恒定的情况下,光谱仪的分辨率不足以分辨出两个纤芯干涉谱之间的差异。因此,可以认为温度恒定时,同一位移状态下多芯少模光纤每个芯出

图 3(a)表示少模光纤内只存在 LP₀₁ 模式,通过调节三维调整架使单模光纤和少模光纤之间存在一定的径向错位,此时可激发少模光纤内的 LP₁₁ 模式,如图 3(b)所示。需要指出的是为更好地观察 LP₁₁ 模式的激发情况,图 3(b)是经调整后探测到新模场图的放大图,由图 3(b)可以看出在该实验条件下 LP₁₁ 模式和 LP₀₁ 模式同时存在,并且此时 LP₁₁ 模式处于最佳激发状态。

射的干涉谱几乎没有差异。由于 1 号纤芯位于多芯少模光纤的中心部位,对准耦合方便,因而实验过程中选取 1 号纤芯进行位移传感实验。从图 4(a)中可以看出位移变化前后光谱仪接收到的干涉谱发生了移动,图中绿色的曲线表示位移变化前的干涉谱,红色曲线表示位移发生变化后的干涉谱,对应的特征波长发生蓝移,实验现象与理论分析一致。

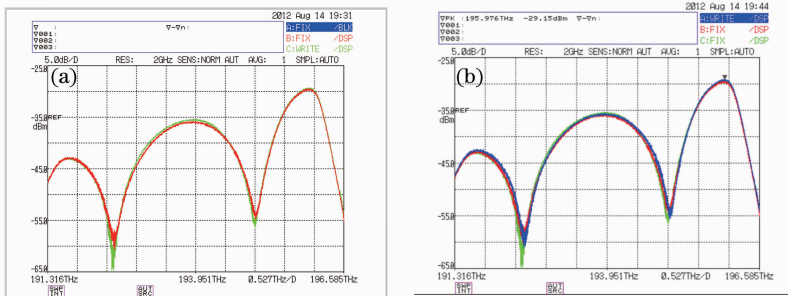


图 4 位移变化前后的干涉谱。(a) 1 号纤芯干涉谱;(b) 7 号纤芯干涉谱

Fig. 4 Interference spectra before and after the change of displacement. (a) Interference spectra of 1 fiber core; (b) interference spectra of 7 fiber core

选取 1 号纤芯进行实验,通过调节三维调整架使光纤依次产生 10、20、30、40、50、60 μm 的位移变化量。位移每次变化,光谱仪都要采集相应的干涉谱,图 5 表示经滤波处理后的干涉谱线。从图中可以看出随着位移的增大特征波长发生了蓝移;并且随着位移量的增加干涉条纹的整体能量有所下降,原因可能是位移变化过程中多芯少模光纤被轴向拉

伸,导致纤芯半径减小,芯内高阶模发生泄露,最终导致整体干涉谱能量有所下降。

图 6 给出了初始特征波长与位移变化量之间的关系,曲线的斜率表示多芯少模光纤的位移变化 1 μm 对应的特征波长的移动量。通过软件对原始数据进行拟合,得到了一条相关系数为 0.9987 的直线,这表示位移变化量和特征波长移动量之间有着

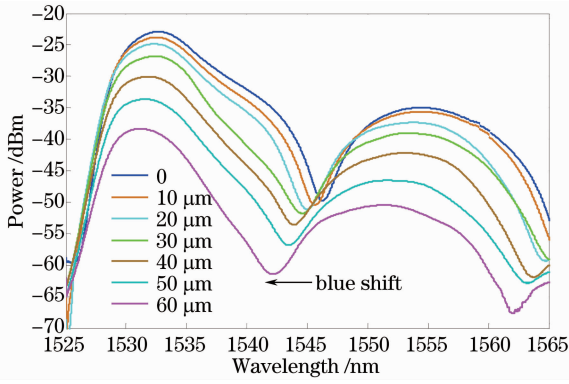


图5 滤波处理后的干涉谱

Fig. 5 Interference spectra after filtering

很好的线性关系。当位移变化在 $0 \sim 60 \mu\text{m}$ 范围内,拟合直线的斜率(即传感器灵敏度)为 $-61.17 \text{ pm}/\mu\text{m}$,此时理论计算结果为 $-58.75 \text{ pm}/\mu\text{m}$,二者之间的误差小于 3.9% 。因此当使用高分辨率的光谱仪作为接收器时,经过计算,可知该传感器可以检测 17 nm 的位移变化。

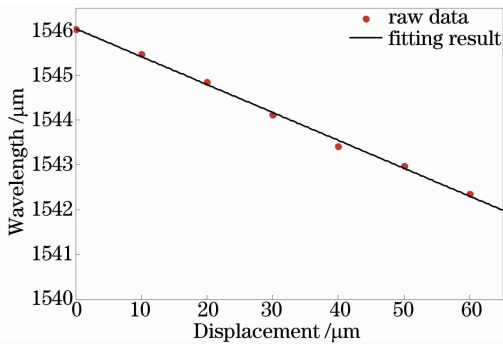


图6 特征波长移动量随位移的变化

Fig. 6 Characteristic wavelength shift varying with displacement

4 结 论

利用多芯少模光纤模式干涉原理,可以实现微小位移的测量。实验结果表明,在温度恒定的情况下,当位移变化的变化范围为 $0 \sim 60 \mu\text{m}$ 时,该新型位移传感器的检测灵敏度为 $-61.17 \text{ pm}/\mu\text{m}$,与理论计算值相比二者之间的误差小于 3.9% 。实验结果与理论计算基本一致。理论分析和实验研究都是假设测量物体温度与外界温度一致,但是有时,被测物体温度通常不同于外界环境温度,从而造成温度

沿光纤径向呈梯度分布。此时便可以利用多个纤芯同时检测物体产生的位移,通过算法进而消除温度带来的测量误差,这将是下一步的主要研究方向。

参 考 文 献

- 1 S Matsuo, Y Sasaki, I Ishida, *et al.*. Recent progress on multi-core fiber and few-mode fiber[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2013, OM3I. 3.
- 2 C Xia, R Amezcuca-Correa, N Bai, *et al.*. Hole-assisted few-mode multi-core fiber for high-density space-division multiplexing[J]. Photon Technol Lett, 2012, 24(21): 1914–1917.
- 3 F Yaman, N Bai, B Zhu, *et al.*. Long distance transmission in few-mode fibers[J]. Opt Express, 2010, 18(12): 13250–13257.
- 4 C Xia, R Amezcuca-Correa, N Bai, *et al.*. Low-crosstalk few-mode multi-core fiber for high-mode-density space-division multiplexing[C]. European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2012, MO. I. F. 5.
- 5 Lin Zhen, Zheng Siwen, Ren Guobin, *et al.*. Characterization and comparison of 7-core and 19-core large-mode-area few-mode fibers[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(6): 064214.
- 林 楨, 郑斯文, 任国斌, 等. 七芯及十九芯大模场少模光纤的特性研究和对比分析[J]. 物理学报, 2013, 62(6): 064214.
- 6 W D Hogg, D Janzen, T Valis. Development of a fiber Fabry-Perot strain gauge[C]. SPIE, 1991, 1588: 30–307.
- 7 H N Li, D S Li, G B Song. Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering[J]. Engineering Structures, 2004, 26(11): 1647–1657.
- 8 Li Kun, Wen Hongqiao, Li Hui. A study on miniature interferometer strain sensor based on EFPI[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3282–3285.
- 李 坤, 文泓桥, 李 慧. 光纤法布里-珀罗结构的微型应变传感器的研制[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3282–3285.
- 9 B Chiu, M Hasting. Digital demodulation for passive homodyne optical fiber interferometry based on a 3×3 coupler[C]. SPIE, 1994, 2292: 371–382.
- 10 M Szustakowski, N Palka. Contrast sensitive fiber optic Michelson interferometer as elongation sensor [J]. Opto-Electronics Review, 2005, 13(1): 19–26.
- 11 A Mehta, W Mohammed, E G Johnson. Multimode interference-based fiber-optic displacement sensor[J]. Photon Technol Lett, 2003, 15(8): 1129–1131.
- 12 L H Kang, D K Kim, J H Han. Estimation of dynamic structural displacements using fiber Bragg grating strain sensors[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 305(3): 534–542.
- 13 Zhang Jinlong, Yu Chongxiu, Wang Kuiru, *et al.*. Displacement sensor with temperature compensation based on chirp fiber grating[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 28(4): 779–782.
- 张锦龙, 余重秀, 王葵如, 等. 基于啁啾光纤光栅的温度自补偿位移传感器[J]. 光学学报, 2009, 28(4): 779–782.
- 14 C Prella, F Lamarque, P Revel. Reflective optical sensor for long-range and high-resolution displacements[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 127(1): 139–146.

栏目编辑:王晓琰