

基于倾斜光纤光栅的温度不敏感振动传感器

安佳丽 梁厚慧 金永兴 王剑锋 董新永

(中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

摘要 提出了一种基于倾斜光纤光栅与多模光纤相结合的温度不敏感振动传感器,其振动传感头是在倾斜光纤光栅与单模光纤之间加入一小段多模光纤所组成。倾斜光纤光栅的反射光谱有布拉格模和包层模两部分组成,其中多模光纤的作用是将倾斜光纤光栅反射包层模耦合到单模光纤的基模。倾斜光纤光栅包层模对外界振动很敏感,通过传感器的包层模平均输出功率完成对外界振动物理量测量。由于采用强度解调的方式,可以大大降低传感器装置的复杂性。实验表明:当传感器温度从 20 ℃ 上升到 70 ℃ 时,传感器的输出平均光功率均方根误差为 0.01 μW ,其反射光谱平均输出功率影响很小,故可以避免外界温度对测量结果的影响。

关键词 传感器;光纤传感器;振动传感器;倾斜光纤光栅;多模光纤

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s114003

Tilted Fiber Bragg Grating Based Temperature-Independent Vibration Sensor

An Jiali Liang Houhui Jin Yongxing Wang Jianfeng Dong Xinyong

(Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract A new type fiber vibration sensor based on a tilted fiber Bragg grating (TFBG) interacting with a multimode fiber (MMF) is presented. The sensing head is formed by inserting a small section of MMF into a single-mode fiber and the TFBG. The reflection light from this titled fiber Bragg grating includes two parts, the reflected Bragg mode and cladding modes. The cladding modes are coupled back into core mode as a function of the multimode fiber. The power of the cladding modes is sensitive to the vibration, so the external vibration measurement can be obtained through the average output power of cladding mode. The sensor device is simple due to the usage of the intensity demodulation method. The experimental results show that the root mean square (RMS) detection error of the average power is 0.01 μW within the temperature range from 20 ℃ to 70 ℃, so it is proved to be temperature independent.

Key words sensors; optical fiber sensor; vibration sensor; tilted fiber Bragg grating; multimode fiber

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.3735

1 引 言

振动现象存在于各种工程结构和机械系统中,测量和分析这些振动现象有着重要的研究意义与价值^[1]。传统的压电振动传感器由于存在电磁干扰和响应平坦性问题而不能满足传感技术向更高层次发展的要求,特别是在较恶劣环境下使用时更显不足^[2]。光纤传感器具有灵敏度高、抗电磁干扰、抗化学腐蚀、尺寸小和响应速度快等特点,在振动传感器

领域具有较高的研究价值和广泛的应用前景,所以利用光纤布拉格光栅(FBG)在振动传感中应用研究引起了人们极大的兴趣^[2~4]。倾斜光纤光栅(TFBG)是一种特殊的短周期光纤光栅,它的结构特点在于光栅波矢方向与光纤轴线方向有一定的交角。TFBG不但能引起反向导模的耦合,而且还能将基模耦合到高阶模中辐射掉,控制光栅波矢与光纤轴线的夹角,可以使原来在光纤内部传播的不同

收稿日期: 2012-01-16; **收到修改稿日期**: 2012-02-22

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327804)和浙江省重大科技专项(2009C11049)资助课题。

作者简介: 安佳丽(1988—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感器方面的研究。E-mail: ajlcdr@163.com

导师简介: 金永兴(1972—),男,教授,主要从事光纤传感和光纤通信等方面的研究。E-mail: jinyongxing@cjlu.edu.cn

波长的光以不同的角度耦合到光纤包层。TFBG 的特殊结构与性质使其兼有光纤布拉格光栅和长周期光纤光栅(LPG)的优点^[5,6],具有独特的温度特性和对外界高灵敏的包层模。目前,利用 TFBG 折射率与弯曲特性应用于传感得到了广泛的关注^[7~10]。

本文提出了一种基于 TFBG 与多模光纤(MMF)组合的振动传感器。振动传感头是在倾斜光纤光栅与单模光纤之间加入一小段多模光纤所组成,其中 MMF 作用是将 TFBG 反射包层模耦合到单模光纤的基模中。一般光纤光栅传感是采用波长解调的方式实现对环境物理量的测量,故存在温度的影响。由于 TFBG 包层模平均功率对外界振动很敏感,通过传感器的包层模平均输出功率完成对外界振动物理量测量。由于采用强度解调的方式,可以大大降低传感器装置的复杂性,同时温度对光纤光栅的反射光谱平均输出功率影响很小,故可以避免外界温度对测量结果的影响。

2 传感器制作和工作原理

振动传感器的传感头如图 1 所示,用熔接器把一段大约 2 mm 长的多模光纤熔接在单模光纤(SMF)与 TFBG 之间,MMF 纤芯直径为 105 μm,包层直径为 125 μm。TFBG 是利用相位掩模板技术制作,在制作工程中将相位模板倾斜一定的角度,通过紫外激光写入载氢的掺锗单模光纤中得到的。在实验过程中所使用的相位模板周期 $T=1066$ nm,倾斜角度 $\theta=5^\circ$,刻写的 TFBG 长度 $L=2$ cm。测得的 TFBG 在空气中的透射谱如图 2 所示,其中在长波长方向最右边的峰是布拉格谐振峰,余下的谐振峰是 TFBG 基模与反向传输包层模耦合的结果。由于光纤高折射率的涂覆层材料,这些反向传输的包层模经过短距离的传输后会全部泄漏到光纤外部,因此在反射谱中只有布拉格模的峰,而没有这些包层模的峰。该传感器的工作原理如下:在 TFBG 没有涂敷层并保持直线的情况下,上述反向传输的包层模可以在光纤中传输若干米的距离;MMF 的作用是把在 TFBG

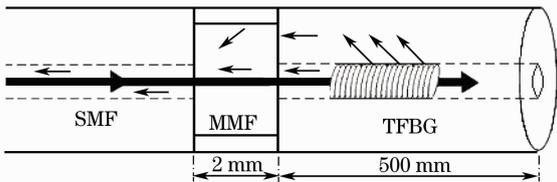


图 1 振动传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vibration sensor

中传输的包层模在泄漏之前耦合进 SMF 的基模,当外界振动信号带动光纤传感器发生弯曲时,耦合进 SMF 的基模的包层模的平均光功率会发生周期性变化,其变化周期对应不同的振动频率。因此,测量传感器反射回来平均光功率的振动时域信号,就可得到外界的振动信息。选用较短的 MMF,主要是考虑到多模光纤模式之间的干涉降低对实验测量影响^[11]。

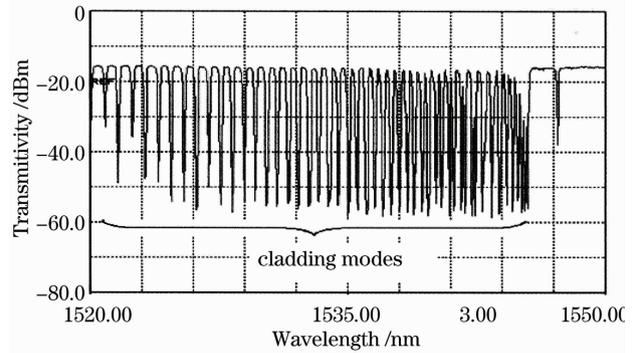


图 2 TFBG 的透射谱

Fig. 2 Original transmission spectrum of the TFBG

3 实验结果和讨论

实验装置如图 3 所示,从宽带自发光源(ASE)发出的光经三端光环行器后输入到经径向粘贴在低频扬声器振动膜上的振动传感单元,由 TFBG 反射回来的光功率用 Newport 光功率计来测量。该实验装置利用扬声器的振动膜来驱动光纤传感器的振动。

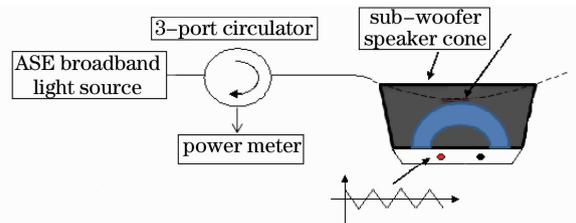


图 3 振动传感测试实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of variation sensing test

在实验过程中,TFBG 与一段 MMF 熔接后传感器的反射光谱变化图如图 4 所示。从图 4 中可以看出,由于 MMF 的存在,使得两者的反射光谱图有明显的差别。无熔接 MMF 的时候,光谱图与上述理论分析基本相符,反射光谱中主要是布拉格反射模,其他的包层反射模在传输一段距离后都泄露到光纤外部;当 TFBG 熔接上 2 mm 长的 MMF 时,反射光谱中除了布拉格反射模以外,在光谱 1535~

1545 nm 范围内还出现一系列的包层反射模。由于 MMF 与 SMF 模场不匹配,反向传输的包层模能重新耦合进光纤的基模,所以在熔接了 MMF 后传感器反射谱中就出现许多高阶包层反射模。同时从图 4 中也可以看出,MMF 和 SMF 模场不匹配引入了

比较大的插入损耗,使得反射回来传输的基模光功率下降近 8 dB。事实上,MMF 的长度也会影响 MMF 与 SMF 之间的耦合效率,所以选择合适的 MMF 长度可以增加反向传输包层模的功率,从而提高传感器的信号强度^[12,13]。

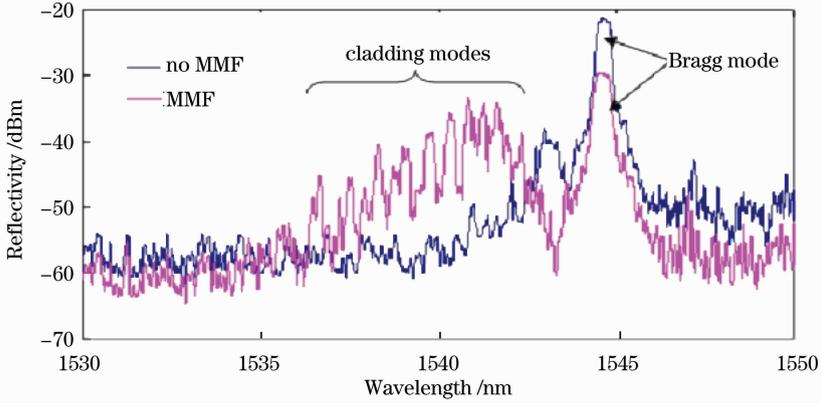


图 4 加 MMF 时 TFBG 反射光谱图变化

Fig. 4 Evolution of reflection spectrum after spliced with MMF

当三角波驱动信号驱动扬声器振动时,粘贴在振动膜上的光纤传感器随信号振动,从而改变光纤传感器的弯曲程度,光纤光谱器测量得到的传感器反射光谱随弯曲变化的情况如图 5 所示。从图中可以看出传感器反射回来的光功率随着弯曲程度的增大而减小,表明随着弯曲程度的增加,包层模损耗相应增加,这样通过 MMF 耦合进入 SMF 基模的光功

率也相应降低;同时从图中还可以看出低阶包层模的耦合强度明显比高阶模强,显示出低阶模能够更好地限制模场能量,因此低阶模受外部的影响较小。随着包层模阶数的增加,有更多的模场扩展到周围介质,从而导致传感器反射谱中高阶模对外部振动更为敏感。这意味着如果在制作传感器时 TFBG 的高阶模越丰富,传感器的灵敏度就越高。

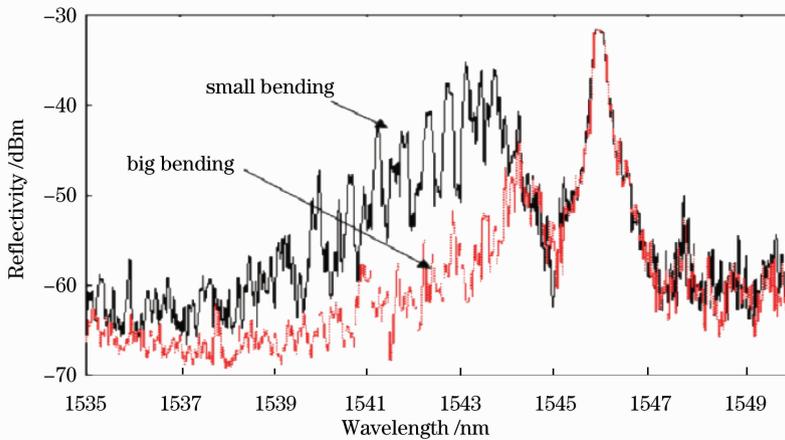


图 5 传感器反射光谱随弯曲的变化

Fig. 5 Spectrum response of the proposed sensor with different bending

图 6 给出了传感器对不同频率的时间响应的反射功率变化。结果表明,当三角波驱动频率在 50~400 Hz 范围内振动信号传感性能良好,可以获得清晰的振动波形信号。随着频率的增加,TFBG 反射光功率的频率变化与驱动频率一致。可以发现,当驱动频率 500 Hz 附近时,反射光功率频率响应的峰-峰值

能达到 0.1 以上,其振幅分辨率为 $0.06 \mu\text{W}/\text{mm}$ 。而随着频率的增加,响应曲线的峰-峰值越来越小,直到消失。这是由于:当振动频率的增加时,其与传感器的固有振动频率相差变大,故传感器的弯曲曲率半径越来越小,导致 TFBG 的弯曲幅度变小,如图 5 所示,传感器的平均输出光功率峰-峰值变小,可以从图 6

中看出反射光功率峰-峰值的变化。

光纤光栅一般采用波长解调,波长的移动对应外界物理的变化,而本实验采用的TFBG是输出光功率随外界物理量变化。实验所用的TFBG的温度灵敏度约为 $10\text{ pm}/^\circ\text{C}$,此传感器在实验过程中 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内的反射光谱漂移仅 1 nm 。另外

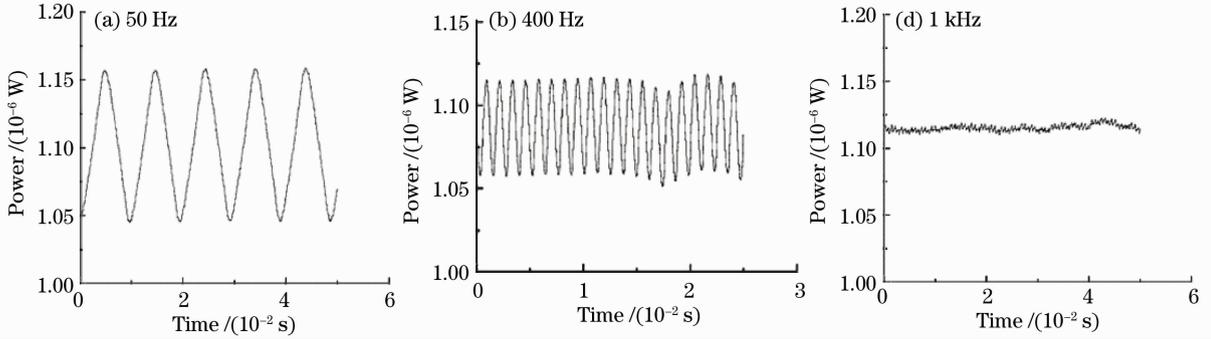


图 6 TFBG 传感器反射振动响应的波形图

Fig. 6 Waveform response of proposed vibration sensor

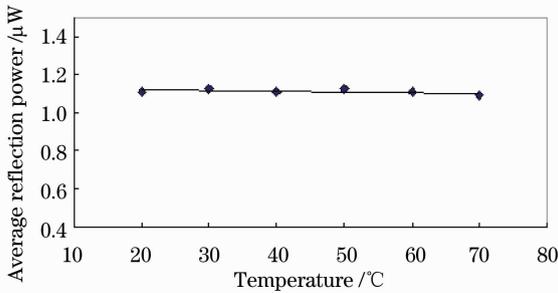


图 7 振动传感器的温度特性曲线

Fig. 7 Temperature characteristic curve of vibration sensor

在实际系统中,实验测得的振动信号信噪比还受到TFBG布拉格模功率的影响。从图5中可以看出,系统输出平均光功率布拉格模和包层模两部分组成。在振动测量过程中,TFBG布拉格模的功率基本保持不变。也就是说,所以在振动测量中,布拉格模的功率没有贡献,反而会影响到系统测量的灵敏度。如果有合适的滤波器(如长周期光纤光栅等)把这部分光功率滤掉,振动传感器的频率测量范围可以进一步增加。同时,布拉格模的功率不随振动变化,如果得到此功率值,此值可作为系统光源功率的参考值,来消除光源功率的波动对传感系统测量的影响。

4 结 论

利用TFBG包层模对外部振动的敏感特性,提出了一种基于TFBG与多模光纤相互作用的振动

TFBG的反射光谱基本保持不变,故此传感器对温度不敏感^[10]。图7给出了此传感器在不同温度情况下的输出平均光功率。从图7中可以看出,当传感器温度从 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 上升到 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 时,传感器的输出平均光功率均方根误差为 $0.01\text{ }\mu\text{W}$,基本保持不变。

传感器。它的振动传感头是在倾斜光纤光栅与单模光纤之间加入一小段的多模光纤组成,其中MMF作用是将TFBG的包层模重新耦合到单模光纤的纤芯中。研究了该传感器在振动频率 1 kHz 以下的情况,结果表明,当外界振动频率在 $50\sim 400\text{ Hz}$ 范围内,可以获得清晰的振动波形信号。此外,该传感器具有结构和解调方式简单、小型化等特点,在工程结构和机械性的低频测试领域有比较好的应用前景。

参 考 文 献

- Zheng Xufeng, Xiao Shali, Tan Xia *et al.*. Research and application of piezoelectric bridge vibration detection [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2003, **25**(1): 71~74
郑旭锋, 肖沙里, 谭霞等. 压电传感技术在桥梁振动检测中的研究和应用[J]. *压电与声光*, 2003, **25**(1): 71~74
- Ma Bin, Xu Jian, Sui Qingmei. Experimental study on coupling high-frequency fiber-optic vibration sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1178~1182
马宾, 徐健, 隋青美. 耦合型高频光纤振动传感器实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1178~1182
- Zou Hongbo, Liang Dakai, Zeng Jie *et al.*. Dynamic demodulation of fiber Bragg grating vibration sensor based on cascaded long-period fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0805005
邹红波, 梁大开, 曾捷等. 基于级联长周期光纤光栅的光纤布拉格光栅振动传感器的动态解调[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0805005
- Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen *et al.*. Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of a FBG Fabry-Pérot cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0406006
张乐, 吴波, 叶雯等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0406006
- T. Erdogan, J. E. Sipe. Tilted fiber phase gratings [J]. *J.*

- Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(2): 296~313
- 6 K. S. Lee, T. Erdogan. Fiber mode coupling in transmissive and reflective tilted fiber gratings [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(9): 1394~1404
- 7 Y. Y. Shevchenko, J. Albert. Plasmon resonances in gold-coated tilted fiber Bragg gratings [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(3): 211~213
- 8 D. Paladino, A. Cusano, P. Pilla *et al.*. Spectral behavior in nono-coated tilted fiber Bragg gratings: effect of thickness and external refractive index [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(24): 2051~2053
- 9 G. Laffont, P. Ferdinand. Tilt short-period fiber-Bragg-grating induced coupling to cladding modes for accurate refractometry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**(7): 765
- 10 T. Guo, Hwa-Yaw Tam, P. Krug *et al.*. Reflective tilted fiber Bragg grating refractometer based on strong cladding to core recoupling [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(7): 5736~5742
- 11 L. V. Nguyen, D. Hwang, S. Moon *et al.*. High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(15): 11369~11375
- 12 W. S. Mohammed, P. W. E. Smith. All-fiber multimode interference bandpass filter [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(17): 2547~2549
- 13 W. S. Mohammed, A. Mehta, E. G. Johnson. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference [J]. *Lightwave Technol.*, 2004, **22**(2): 469~477

栏目编辑：李文喆