

文章编号: 0258-7025(2005)07-0961-04

高初始分辨率的光纤光栅横向负载传感

钱景仁, 梁明, 孙箭

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系光纤实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要 提出了一种对光纤布拉格光栅(FBG)在横向压力负载条件下的谐振波长分裂进行高灵敏检测的方案, 并进行了实验研究。采用偏振分束器和偏振无关的光纤迈克耳逊干涉仪组成检测系统, 利用相位调制技术, 将光纤布拉格光栅的谐振波长分裂的检测转化为相位差的测量, 从而大大提高光纤光栅横向压力负载传感的初始分辨率。利用该系统进行横向压力负载传感实验, 得到 0.025 N/mm 横向负载初始分辨能力。

关键词 集成光学; 光纤光栅; 横向负载传感; 干涉扫描法; 应力双折射; 全光纤迈克耳逊干涉仪

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Optical Fiber Bragg Grating Load Sensing with High Primary Resolution

QIAN Jing-ren, LIANG Ming, SUN Jian

(Optical Fiber Laboratory, Department of Electronic Engineering and Information Science,
University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract In this paper, a new scheme to measure the difference of two resonance wavelengths of a fiber Bragg grating (FBG) load sensor is presented. In order to acquire high primary resolution of the fiber grating transverse load sensing, a beam splitter and a Michelson interferometer with two Faraday rotation mirrors (FRM) are adopted to compose the detecting system, the instability caused by birefringence of the fibers in the interferometer is considerably reduced. This new FBG load sensor is demonstrated and the primary resolution of 0.025 N/mm is obtained.

Key words integrated optics; fiber grating; transverse load sensing; interferometric scanning; stress induced birefringence; all fiber Michelson interferometer

1 引 言

光纤光栅由于其谐振波长灵敏特性而在传感领域具有广泛的应用^[1~3]。研究表明, 光纤光栅可用作横向压力负载传感^[4,5]。光纤中的应力双折射能够改变光纤布拉格光栅(FBG)的波长谐振条件, 产生两个分离的布拉格谐振波长, 而两个谐振峰的波长差线性依赖于光纤光栅在半径方向所承载的负载大小^[4]。这一特性使光纤布拉格光栅可应用于准静态挤压压力横向负载传感中。

然而, 在实际应用中, 当横向压力负载较小时, 光纤布拉格光栅的反射谱仅仅发生宽度的变化^[4], 利用光谱分析仪(OSA)无法测出相应的波长分裂, 从而限制了光纤布拉格光栅在较小横向负载情况下

的应用。如果采用灵敏度较高的长周期光纤光栅(LPG)进行横向负载传感^[5], 由于其所占的带宽较宽(约为 30 nm), 难以在多点分布式传感中得到应用。

为了提高横向负载传感的初始分辨率, 使之适用于准静态挤压的实际应用, 本文提出了对光纤布拉格光栅的反射光进行偏振分束, 同时利用偏振无关的非平衡迈克耳逊干涉仪对波长移位解调的检测方案。

2 原 理

横向压力负载传感实际上是一种各向异性压力的测量。根据弹性理论, 当光纤只受到横向压力负

收稿日期: 2004-05-18; 收到修改稿日期: 2004-12-09

作者简介: 钱景仁(1935—), 男, 江苏省吴江市人, 中国科学技术大学电子工程与信息科学系教授, 博士生导师, 主要从事光纤有源和无源器件的研究。E-mail: jrqian@ustc.edu.cn

载作用时,可以认为其处于平面应变状态(轴向应变为 0)。由于光弹效应,这样的应力状态将引起纤芯中的应力双折射,使光纤布拉格光栅的谐振条件发生变化,沿 x 和 y 两个线偏振方向的布拉格波长发生了不同的改变。假定光纤为理想单模光纤,沿 x, y 两个线偏振光的谐振波长变化分别为^[4]

$$\Delta\lambda_x = -\frac{1}{2}n_0^2\lambda_x(P_{11}\epsilon_{xx} + P_{12}\epsilon_{yy}), \quad (1)$$

$$\Delta\lambda_y = -\frac{1}{2}n_0^2\lambda_y(P_{11}\epsilon_{yy} + P_{12}\epsilon_{xx}), \quad (2)$$

式中 $\lambda_x, \lambda_y, \Delta\lambda_x, \Delta\lambda_y$ 分别为光纤布拉格光栅在两偏振方向上的谐振波长及其在横向负载条件下的波长移位; P_{11} 和 P_{12} 为泡克尔斯应变-光学系数张量, n_0 为光纤等效折射率; $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$ 分别为圆盘中心沿 x, y 方向的正应变。若 $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$ 不同,则 $\Delta\lambda_x, \Delta\lambda_y$ 也将不同,从而造成光纤布拉格光栅在横向负载作用下的谐振波长分裂。以宽带光源作为系统的输入光源,通过检测光纤布拉格光栅两反射峰的波长差,即可得到横向负载的大小。采用偏振分束器分离光纤布拉格光栅两个偏振方向的反射谱,配合高灵敏度的波长差检测方法,可使系统具有很高的初始分辨率。

波长差的检测采用干涉扫描检测方法^[6],利用全光纤干涉仪的相位调制技术,将光纤光栅的波长信息转化为相位信息进行检测。在迈克耳逊干涉仪的一个干涉臂上加上压电陶瓷(PZT)调制机构,对其臂长进行周期性锯齿波调制。假定施加于压电陶瓷的驱动电压是一角频率为 Ω 的锯齿波,适当调整锯齿波的幅度,使压电陶瓷对干涉仪一臂的光相位的双程调制恰好在 $0 \sim 2\pi$ 间随时间周期性线性变化。此时,干涉仪的输出光功率可以表示为一个波长相关的函数

$$P_{out}(\lambda) = \frac{P_{in}}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}nd + \Omega t + \varphi_0\right) \right], \quad (3)$$

式中 P_{in} 为干涉仪输入端波长为 λ 的功率分量, d 为未加调制时两干涉臂的长度差, n 为光纤等效折射率,而 φ_0 为干涉仪的初始相位的常数偏移。式(3)表明,对于某个波长的输入光信号,例如光纤光栅 x 或 y 偏振方向的反射光信号,干涉式波长扫描仪的输出光强被调制为具有初始相位 $\Phi(\lambda_{x,y}) = \frac{4\pi}{\lambda_{x,y}}nd + \varphi_0$ 的正弦信号。当输入光信号波长发生变化时,容易得到初始相位的变化

$$\Delta\Phi(\lambda_{x,y}) = -\frac{4\pi}{\lambda_{x,y}^2}nd \cdot \Delta\lambda_{x,y}, \quad (4)$$

即经过相位调制,输出光信号的初始相位变化量与

输入光信号的波长变化量成正比。经过光电转换以后,通过比较两路电信号的相位差,即可检测光纤布拉格光栅两反射峰的波长差。这种波长差测量方法的优点是能够显著减少环境温度变化对干涉仪输出相位的影响^[6]。

在研究中发现,由于光纤干涉仪的两臂都是普通的单模光纤,其双折射效应具有随机性,会导致干涉仪输出在幅度和相位上都受到随机调制,对高分辨率的波长移位检测造成了不良影响。为克服双折射引起的干涉条纹模糊对系统输出的影响,采用旋转角为 90° 的法拉第旋转反射镜(FRM)代替普通迈克耳逊光纤干涉仪中两干涉臂的反射镜,使两干涉臂的反射光的偏振态始终保持一致,不受普通光纤双折射效应的影响,提高检测的分辨率和稳定性^[7~9]。

3 实验结果

为便于负载测量,光纤光栅的横向负载实验的力学装置如图 1 所示。将两根直径相同的光纤平行地放置于一块光滑平整的钢板上,其中一根刻有光栅,而另一根光纤为平衡光纤,上方用一块抛磨平整的宽度为 3 cm 的铝板压住,然后在铝板上逐渐增加负载的重量。

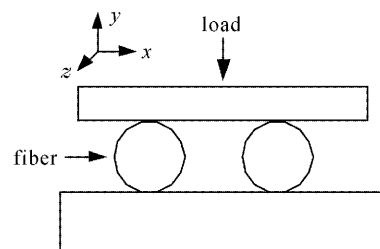


图 1 光纤光栅横向负载传感的力学装置

Fig. 1 Mechanical configuration of FBG transverse

load sensor

图 2 为光纤光栅横向压力负载传感检测系统的结构图。掺铒光纤超荧光宽带光源(BBS)输出的宽带光送入迈克耳逊干涉仪。干涉仪的臂长约 2.5 m,两干涉臂的长度差约为 1 ± 0.2 mm;法拉第旋转镜的总旋转角为 $90^\circ \pm 1^\circ$ 。干涉仪的一臂均匀缠绕在压电陶瓷筒外壁并粘牢。利用频率为 267 Hz 的锯齿波驱动压电陶瓷对干涉仪进行相位调制。通过压电陶瓷调制后由耦合器输入到光纤光栅上的宽带光信号具有如(3)式所示的与光波长相关的调制特性。而光纤光栅反射的两束不同偏振方向、不同波

长的光由偏振分束器 (PBS) 分到两个探测臂上, 分别由光探测器 D_1 和 D_2 转换为低频电信号, 即是相位差为 $\Delta\Phi$ 的两路正弦信号。该信号经中心频率为 267 Hz 的带通滤波器整形后, 采用 ADS7104 数字示波器读出两路信号的相位差。实验中所用的光纤光栅在室温下谐振波长为 1539 nm, 3 dB 反射线宽为 0.14 nm。

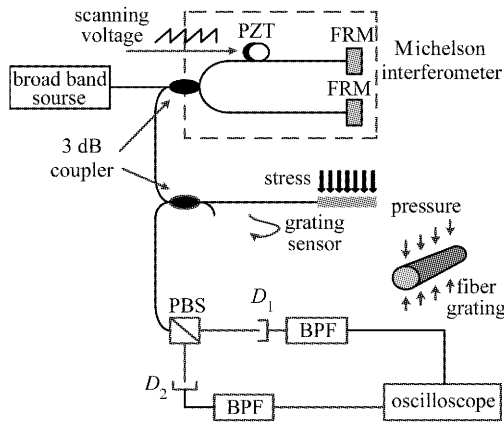


图 2 光纤光栅横向压力负载传感检测系统结构

Fig. 2 Detecting diagram of FBG transverse load sensing

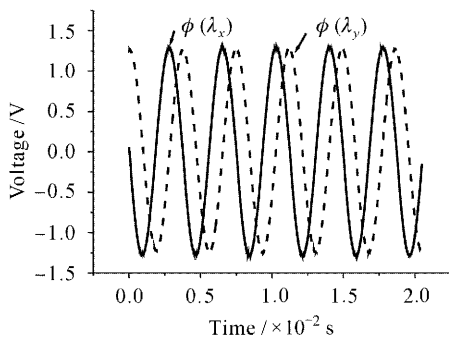


图 3 光栅受横向压力负载作用时系统的两路输出信号

Fig. 3 Output voltage waveform for two polarization components of FBG sensor under transverse loading

实验中, 当所加的横向压力负载较小时, 直接采用光谱分析仪无法得到相应的波长差; 而采用图 2 检测装置, 即使所加负载较小, 仍能够观察到明显的相位差, 如图 3 所示; 由 (4) 式即可得到相应的波长差。这样, 光纤光栅横向压力负载的初始分辨率就得到大大的提高。

实验中, 不断向铝板上增加重量, 使其由 0 增至 2 N/mm。在这一过程中, 观察两路信号的输出相位差。图 4 是对同一光纤布拉格光栅进行三组横向传感实验的实验数据及其线性拟合结果, 拟合直线的平均斜率为 $146^\circ / (\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$ 。从图中可以看

出, 单次的实验结果都显示了很高的线性度, 并与其拟合直线符合得很好。三条拟合直线的斜率略有差异, 这是由于在铝板上叠加重物时, 有可能造成重心偏离中轴, 导致光栅上所承受的负载并不完全等于铝板上所加负载的一半, 每次略有差异; 而外界环境对干涉仪的扰动也可能影响检测的准确性, 这需要在进一步的研究工作中更深入的分析。若不断增加负载, 所测得的相位差将呈 360° 周期性变化。因此所测相位差的主值区间为 $0 \sim 360^\circ$, 对应于本实验系统, 其横向负载的无模糊测量范围为 $0 \sim 2.47 \text{ N/mm}$ 。由于横向负载的测量范围与所用迈克耳逊干涉仪的光程差成反比, 采用光程差较短的干涉仪可以获得较大的测量范围。

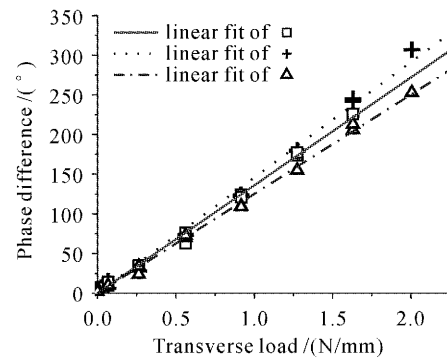


图 4 相位差与所加横向负载的关系

Fig. 4 Phase difference with different transverse loading

系统的初始分辨率取决于干涉仪两干涉臂的光程差以及相位计的最小稳定的读数。在实际测量时, 由于光电噪声以及电路噪声的影响, 相位可靠稳定的最小读数约为 3.5° , 此时, 横向负载的重量为 0.15 N, 对应传感系统的横向负载检测的初始分辨率为 0.025 N/mm。根据 (4) 式, 该结果表明系统的波长差检测初始分辨率达到 8 pm。文献 [4] 中利用光谱分析仪测量得到的光纤光栅最小可检测横向压力负载为 40 N, 相当于 0.8 N/mm 的初始分辨率。显然, 本实验系统大大提高了光纤布拉格光栅横向压力负载的初始分辨能力。

4 结 论

对光纤布拉格光栅的反射光进行偏振分束, 同时利用偏振无关的非平衡迈克耳逊干涉仪检测光纤光栅的谐振波长分裂, 提高了横向负载传感的初始分辨率。实验中采用两个旋转角为 90° 的法拉第旋转反射镜作为迈克耳逊干涉仪的反射镜, 从而

使干涉仪不受偏振态的困扰,提高了系统的检测初始分辨率和稳定性。该系统的传感灵敏度为 $146^\circ/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$,而初始分辨率达到 0.025 N/mm ,非常适用于准静态挤压的测量;由于每个传感单元所占的带宽很窄,只有 $3\sim 4 \text{ nm}$,因此本系统可扩展应用于多点分布式传感。

参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1442~1463
- 2 Zhang Weigang, Kai Gaiyun, Zhao Qida *et al.*. Linearly torsion sensor of fiber grating with temperature-independent [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1):83~87
张伟刚,开桂云,赵启大等. 免受温度影响的光纤光栅线性扭转传感器[J]. 中国激光, 2003, **30**(1):83~87
- 3 Tu Qinchang, Zhang Weigan, Sun Lei *et al.*. Study on transversal strain on fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1508~1512
涂勤昌,张伟刚,孙磊等. 光纤布拉格光栅横向应变特性的研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(12):1508~1512
- 4 R. B. Wageich, W. A. Atia, H. Singh *et al.*. Effects of diametric load on fibre Bragg gratings fabricated in low birefringent fibre [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(13):1223~1224
- 5 Y. Liu, L. Zhang, I. Bennion. Fibre optic load sensors with high transverse strain sensitivity based on long-period gratings in B/Ge co-doped fibre [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(8):661~663
- 6 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. Fiber-optic Bragg grating strain sensor with drift-compensated high-resolution interferometric wavelength-shift detection [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(1):72~74
- 7 A. D. Kersey, M. J. Marrone, M. A. Davis. Polarisation-insensitive fibre optic Michelson interferometer [J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(6):518~519
- 8 M. J. Marrone, A. D. Kersey. Visibility limits in fibre-optic Michelson interferometer with birefringence compensation [J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(16):1422~1424
- 9 Liang Ming. Key technologies of fiber grating sensors and its applications to transverse load [D]. *Ph.D Degree Thesis of University of Science and Technology of China*, 2003-JX-C-1023, 61~73
梁明. 光纤光栅传感的关键技术及其在横向压力负载传感中的应用[D]. 中国科学技术大学博士学位论文, 2003-JX-C-1023, 61~73