

温度/应变/扭曲三参量同时测量低成本传感系统*

朱 涛^{1,2} 饶云江^{2,1} 莫秋菊¹ 周昌学¹ 王久玲¹

(1 重庆大学光电工程学院, 重庆 400030)

(2 成都电子科技大学通信与信息工程学院, 成都 610015)

摘 要 提出了一种利用布喇格光纤光栅反射光作信号源、高频 CO₂ 激光脉冲写入的长周期光纤光栅和超周期光纤光栅作传感器实现温度、应变和扭曲同时测量的全光栅型低成本强度解调传感方案. 文中利用长周期光纤光栅边缘滤波效应实现了温度、应变和扭曲传感信号的实时解调. 实验结果表明, 其温度和应变的测量灵敏度分别为 -0.211 dB/°C 和 -0.012 dB/10μ ϵ ; 而扭曲率的测量灵敏度为 0.4394 dB/(rad·m⁻¹), 是该法写入普通 LPFG 的 4 倍以上.

关键词 传感器技术; 光纤光栅; 多参量测量; CO₂ 激光; 低成本

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

近年来, 光纤传感器由于具有分辨率高、受电磁场影响小、耐恶劣环境、体积小等系列优点而受到人们广泛关注^[1,2]. 光纤光栅传感器作为光纤传感器的重要分支, 相对于其它传感器具有制作容易、成本低、容易复用和易实现多参量测量等优点, 近几年得到了快速发展, 比如利用光纤光栅实现温度、应变、扭曲和横向负荷等的测量^[3~7]等, 但在很多探测方法中, 都是利用光谱分析仪器作为传感信号的解调手段. 由于光谱分析仪器成本高、扫描速度慢, 所以还需要与计算机连接才能实现传感参量的提取等, 这就大大影响了传感系统的成本和实效性. 因此如何实现传感信号的实时在线解调一直是关注的焦点.

高频 CO₂ 激光脉冲写入的长周期光纤光栅(简称 LPFG)可以实现温度和高灵敏度应变测量^[3,4]. 关于扭曲率的实时测量, 有学者提出利用凹凸状 LPFG^[8]或基于布喇格光纤光栅(简称 FBG)设计的传感结构^[9]来测量, 但存在机械强度弱及不能判别扭曲方向等缺点. 前不久报道了利用高频 CO₂ 激光脉冲写入的普通 LPFG 可同时实现扭曲率测量和扭曲方向判别的现象^[5], 但也由于灵敏度太低而不能用于实时测量, 在研究模式耦合理论和双折射的基础上, 结合高频 CO₂ 激光脉冲写入超长周期光纤光栅(简称 ULPGF)折变分布的非对称性^[5], 文中首次提出可利用新型 ULPGF 导模与高阶包层模耦合的谐振峰进行高灵敏度的扭曲测量. 因此, 本

文提出利用 LPFG 的温度和应变特性, 新型 ULPGF 独特的扭曲特性及 LPFG 的边缘滤波效应实现了温度/应变/扭曲三参量低成本实时测量传感方案.

1 基本原理

文献[3,4]报道了高频 CO₂ 激光脉冲写入的 LPFG 用于温度和应变测量的基本原理和实验特性, 本文提出利用该法写入的 ULPGF 作为传感器进行扭曲率测量. 根据 LPFG 的耦合理论, 在忽略材料色散对谐振波长的影响下^[10], ULPGF 每个谐振峰都应满足如下的相位匹配条件

$$\lambda_{res}^{N,m} = (n_{eff}^{co} - n_{eff}^{cl,N,m}) \frac{\Lambda}{N} \cdot \left[1 + \frac{(\delta n_{eff}^{co} - \delta n_{eff}^{cl,N,m}) \cdot d\lambda_B^{N,m} / d\Lambda}{(n_{eff}^{co} - n_{eff}^{cl,N,m})^2} \right] \quad (1)$$

式(1)中, $\lambda_{res}^{N,m}$ 是谐振波长, Λ 是 ULPGF 的周期, N 是闪耀阶数, n_{eff}^{co} 和 $n_{eff}^{cl,N,m}$ 分别为纤芯基模和第 N 阶闪耀模第 m 次包层模的有效折射率, δn_{eff}^{co} 和 $\delta n_{eff}^{cl,N,m}$ 分别为纤芯基模和第 N 阶闪耀模第 m 次包层模的有效折射率的变化量, $\lambda_B^{N,m}$ 为最初的设计谐振波长, 其值等于 δn_{eff}^{co} 和 $\delta n_{eff}^{cl,N,m}$ 都为 0 时的谐振波长. 用高频 CO₂ 激光脉冲写入的 ULPGF 其折变主要在包层, 所以 $\delta n_{eff}^{cl,N,m}$ 将占主要因素, 从式(1)可知, 对于 $\delta n_{eff}^{cl,N,m}$ 一个微小的变化, $\lambda_{res}^{N,m}$ 将极大的依赖于光栅周期和耦合的闪耀阶数, 这一点就使得新型 ULPGF 很容易受到外界环境条件比如弯曲、扭曲、横向负荷等的影响, 并且其谐振谱将可能具有独特的光学特性.

扭曲 ULPGF 将会使得光纤产生剪应力和扭曲应力, 其中剪应力对光纤纤芯和包层的影响可以忽略, 而扭曲应力将使得 ULPGF 产生圆双折射, 扭曲

*教育部重点基金(批准号:104210)、重庆市自然科学基金重点基金(批准号:8415)和国家自然科学基金重点项目(批准号:60537040)资助

Tel:023-65111973 Email: fiberlab@cqu.edu.cn

收稿日期:2005-08-25

率和圆双折射的关系可以近似表示为^[11]

$$E = G \overline{R}_T \quad (2)$$

式(2)中 G 表示弹光系数, \overline{E} 是由扭曲引起的圆双折射矢量, \overline{R}_T 是扭曲矢量(方向为逆时针或顺时针扭曲). 圆双折射矢量 \overline{E} 会产生 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl}, N, m}$ 和 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$, 对于新型 ULPG, 折变主要分布在包层, 并且呈现一种不均匀的分布形式, 因此 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl}, N, m}$ 将是主要的, 并且 \overline{E} 的方向将使得 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl}, N, m}$ 变大或变小. 由式(1)可知, 谐振波长将会向长波或短波方向漂移, 这就能利用单个 ULPG 同时确定扭曲率和扭曲方向, 此外, 由于 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl}, N, m}$ 比低阶闪耀(比如普通周期光纤光栅, $N=1$)具有更大的变化量, 因此, 这种方法将会具有更高的扭曲测量灵敏度.

图 1 为实验测得周期为 2 mm、长度为 4 cm 的 ULPG 谐振峰³LP₀₁(纤芯基模与第 3 闪耀级次的第 1 阶包层模耦合形成)在扭曲长度为 10 cm 时的扭曲特性, 在 $\pm 120^\circ$ 的扭曲范围内, 谐振波长漂移与扭曲率呈较好的线性关系, 其灵敏度达到了 $0.2244 \text{ nm}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$, 是高频 CO₂ 激光脉冲写入普通 LPFG 扭曲灵敏度的 4 倍, 而谐振峰幅度变化不大, 均小于 0.25 dB.

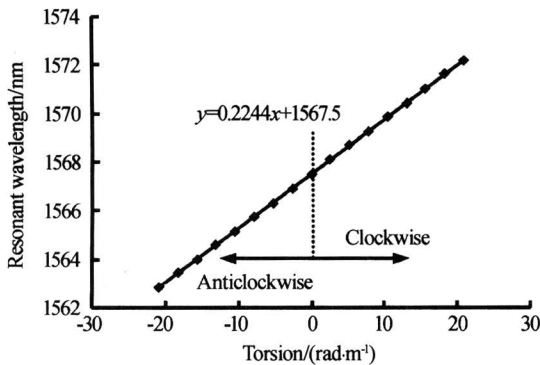


图 1 周期为 2 mm 的 ULPG 谐振峰漂移与扭曲率之间的关系

Fig. 1 Relationship between resonant wavelength shift and torsion for ULPG with a 2 mm

基于高频 CO₂ 激光脉冲写出的 LPFG 和 ULPG 独特的光学特性, 这里提出全光栅型温度/应变/扭曲三参量实时测量方法, 其系统原理如图 2. 图中光源为自制高平坦度 C+L 波段 ASE 光源, 平坦度可达 ± 0.4 dB, 其短时稳定度小于 0.002 dB; ISO 为隔离器, 用于防止后续系统的反射光进入光源而影响其稳定性; C₁、C₂ 和 C₃ 是分光比分别为 1:99、35:35、30:50 的耦合器; FBG₁~FBG₄ 为 4 支反射波长分别为 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 的布喇格光纤光栅, 它们作为整个传感系统的信号源而被安装在环境参量稳定的控制系统中; F₁、F₂、F₃、F₄ 和 F₅ 都是由高频 CO₂ 激光脉冲在康宁 SMF-28 通信光

纤上写入的普通 LPFG, 分别设计成可滤掉波长为 $\lambda_2 \sim \lambda_4$ 、 $\lambda_1 \cup \lambda_3 \sim \lambda_4$ 、 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 、 λ_4 和 λ_3 光信号的带阻滤波器, 每支插入损耗小于 0.2 dB; PD₁~PD₄ 为高灵敏度光电探测器, 其探测灵敏度和响应速度分别可达 0.001 dB 和 2.5 GHz. 图中电路主要实现 PD₁~PD₄ 的功率获取和后续的信号处理、控制、显示及存储等功能; L₁ 和 L₂ 为高频 CO₂ 激光脉冲分别在氢载光敏光纤和康宁 SMF-28 单模光纤上写入的长周期光纤光栅, 用于实现温度和应变的探测; UL 为该法在康宁 SMF-28 单模光纤上写入的超长周期光纤光栅, 用于实现扭曲量的探测.

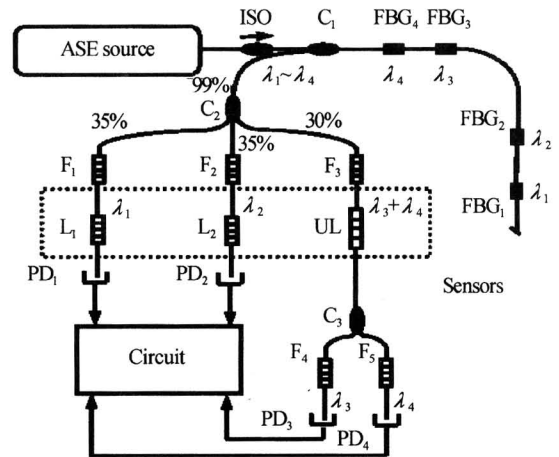


图 2 温度、应变、扭曲同时测量系统原理

Fig. 2 Principle diagram for simultaneous measurements of temperature, strain and torsion

结合波长稳定的 FBG₁~FBG₄, 利用传感元件长周期光纤光栅的线性边缘滤波效应即可实现传感参量的强度解调, 边缘滤波效应强度解调的基本原理如图 3. 图 3 中, LPFG 两个滚降边缘中段具有较好的线性关系, 因此利用其中任意一段即可实现温度或应变信号的强度检测. 图中箭头所指位置设定为 FBG₁ 或 FBG₂ 的初始位置(具体设定为什么位置, 取决于温度和应变的测量起始范围), 当 L₁ 或 L₂ 的谐振波长随温度或应变变化时, 则 FBG₁ 和 FBG₂ 的反射波长就相对于 L₁ 或 L₂ 作相对移动, 从而通过 LPFG 边缘探测到的功率变化就与环境温度或应变成线性关系, 从 PD₁ 和 PD₂ 的功率相对变化值就可以获取环境温度和应变的大小. 另外, 超长周期光纤光栅在扭曲测量中其谐振波长也会左右移动, 将 FBG₃ 和 FBG₄ 的反射波长分别固定在 ULPG 滚降边缘的两个线性区时, FBG₃ 和 FBG₄ 的反射波长就相对于 ULPG 向右或左移动, 则 PD₃ 或 PD₄ 探测到的功率变化就体现了扭曲率的变化, 由于 ULPG 两个边带斜率相反, 那么 PD₃ 和 PD₄ 功率变化的斜率也应当相反, 它们的差值就可增强测量的灵敏度, 根据差值的极性还可判断扭

曲的方向.

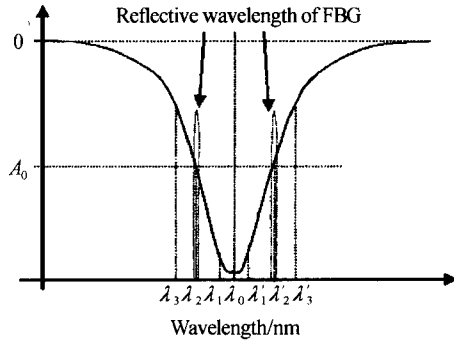


图 3 基于 LPFG 边缘滤波效应的强度检测原理
Fig. 3 The sketch graph for intensity-demodulated based on edge filter

2 实验结果及讨论

实验中,先利用高频 CO₂ 激光脉冲在氢载光敏光纤中写入 L₁,在标准康宁 SMF-28 光纤上制作出 L₂和 UL,其谐振波长分别为 1520.4 nm,1531.2 nm 和 1567.5 nm. 测试 L₁ 谐振波长对温度的灵敏度为 -0.32 nm/°C,而谐振峰幅度变化不大;L₂ 谐振波长对应变的灵敏度和幅度灵敏度分别为 -0.5 nm/mε 和 0.6 dB/mε;UL 的扭曲灵敏度为 0.2244 nm/(rad·m⁻¹),其谐振峰幅度变化不大. 此外,再按照系统的要求制作出满足不同滤波要求的滤波器 F₁~F₅,定做反射波长依次为 1519.5 nm、1529.5 nm、1560.0 nm 和 1575 nm 的 FBG₁~FBG₄.

利用恒温箱改变 L₁ 的环境温度、利用微动台改变 L₂ 所受的拉应变(当将 L₂ 封装成有一定预拉应力的传感器时,也可进行一定范围压应力的测量,这里为实验的方便,仅测试了拉应力),利用旋转盘改变 UL 的扭曲状态,PD₁ 和 PD₂ 测试结果的变化量即为 L₁、L₂ 测试的温度和应变变化相应的幅度变化值(测试的电压值经过误差和响应曲线的校正转化成的功率变化值). 实验结果如图 4 和图 5,其测量的灵敏度分别为 -0.211 dB/°C 和 -1.2 dB/mε,其温度的探测分辨率可小于 0.5°C,而应变的分辨率可达 ±10με. PD₃ 和 PD₄ 各自相对变化都可以体现扭曲的变化量,并且 PD₃ 和 PD₄ 的变化方向相反,则它们的差值可以增强探测的灵敏度,其差值的极性可以判断扭曲的方向,扭曲测试结果如图 6,其测量灵敏度约为 0.4394 dB/(rad·m⁻¹). 该系统测量温度的范围一般为室温到 60°C 左右,那是因为 LPFG 自身的温度灵敏度为 -0.32 nm/°C,而 LPFG 的线性区一般只有 12 nm 左右,不过,这里温度的测量主要用于补偿系统中温度对应变和扭曲测量的影响. 当温度变化太大,该系统就不再实用. 考虑到 LPFG 测量应变的灵敏度不太高,在实际测

试系统中也可像测量扭曲量的方法一样将两个固定波长的信号光通过 LPFG 的两个线性边带,从而来增强它的探测灵敏度.

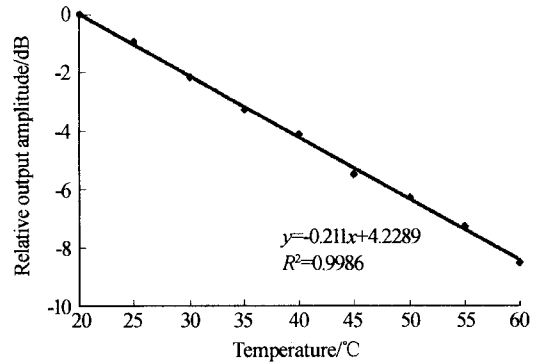


图 4 PD₁ 输出相对强度与温度的关系
Fig. 4 Relationship between temperature and relative output amplitude of PD₁

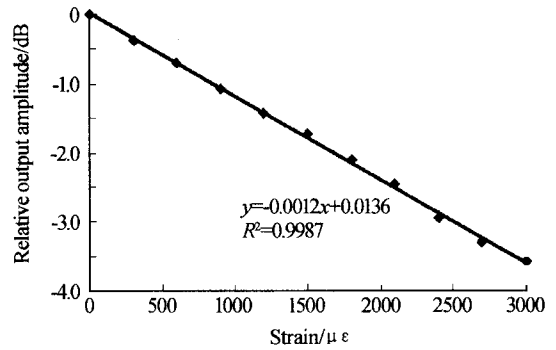


图 5 PD₂ 输出相对强度与测量应变的关系
Fig. 5 Relationship between strain and relative output amplitude of PD₂

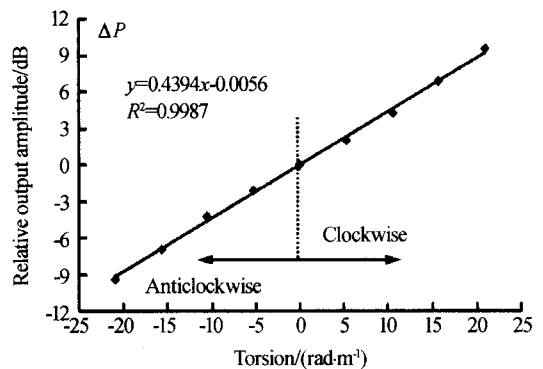


图 6 光探测器相对输出强度与扭曲之间的关系
Fig. 6 Relationship between torsion and relative output amplitude

3 结论

本文首次提出利用高频 CO₂ 激光脉冲写入的超长周期光纤光栅高阶闪耀峰实现可辨方向的高灵敏度扭曲测量,利用 LPFG 实现温度和应变的高灵敏度测量,最后利用 FBG 反射光源作为信号源,借助于传感元件 ULPGF 和 LPFG 的边缘滤波效应,以光电探测器作为解调器,实现了温度/应变/扭曲三参量的低成本同时测量,实验表明,该系统的温度

和应变灵敏度分别可达 $-0.211\text{dB}/^\circ\text{C}$ 和 $-1.2\text{dB}/\mu\epsilon$, 扭曲灵敏度可达 $0.4394\text{dB}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$, 完全可满足实际环境对实时测量的应用要求.

参考文献

- 1 江建, 饶云江, 冉曾令, 等. 基于光放大的外腔式光纤 Fabry-Perot 干涉传感系统. 光学学报, 2004, **24**(2): 183~186
Jiang J, Rao Y J, Ran Z L, et al. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 183~186
- 2 王义平, 饶云江, 冉曾令, 等. 高频 CO_2 激光脉冲写入的长周期光纤光栅传感器的特性研究. 物理学报, 2003, **52**(6): 1432~1437
Wang Y P, Rao Y J, Ran Z L, et al. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(6): 1432~1437
- 3 Rao Y J, Wang Y P, Zhu T, et al. Simultaneous measurement of transverse load and temperature using a single long-period fiber grating element. *Chinese Physics Letters*, 2003, **20**(1): 72~75
- 4 李景义, 饶云江, 牛永昌, 等. 基于新型长周期光纤光栅的低成本应变传感系统. 光子学报, 2005, **34**(3): 431~433
Li J Y, Rao Y J, Niu Y C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 431~433
- 5 王义平, 饶云江, 胡爱姿. 长周期光纤光栅扭曲传感器. 光学学报, 2002, **22**(9): 1096~1099
Wang Y P, Rao Y J, Hu A Z. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1096~1099
- 6 胡爱姿, 饶云江, 王义平, 等. 基于弯曲不敏感光纤的长周期光纤光栅可调谐增益均衡器. 光子学报, 2003, **32**(11): 1359~1362
Hu A Z, Rao Y J, Wang Y P, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1359~1362
- 7 董兴法, 付圣贵, 姜莉, 等. 用于结构损伤诊断的实用型光纤光栅传感器研究. 光子学报, 2004, **33**(1): 28~30
Dong X F, Fu S G, Jiang L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 28~30
- 8 Chunn Y L, Wang L A, Chen G W. Corrugated long-period fiber gratings as strain, torsion, and bending sensors. *J of Lightwave Technology*, 2001, **19**(8): 1159~1168
- 9 Zhang W G, Kai G Y, Dong X Y, et al. Temperature-independent FBG-type torsion sensor based on combinatorial torsion beam. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002, **14**(8): 1154~1156
- 10 Grubsky V, Skorucak A, Starodubov D S, et al. Fabrication of long-period fiber gratings with no harmonics. *IEEE Photon Technol Lett*, 1999, **11**(1): 87~89
- 11 Galtarossa A, Palmieri L. Measure of twist-induced circular birefringence in long single-mode fibers: theory and experiments. *J of Lightwave Technology*, 2002, **20**(8): 1149~1159

Low Cost Sensing System for Simultaneous Measurements of Temperature, Strain and Torsion

Zhu Tao^{1,2}, Rao Yunjiang^{1,2}, Mo Qiuju¹, Zhou Changxue¹, Wang Jiuling¹

¹ Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030

² School of Communication and Information Engineering, University of Electronics Science & Technology of China, Chengdu 610015

Received date: 2005-08-16

Abstract A novel low cost sensing system for simultaneous measurements of temperature, strain and torsion based on unique optical characteristics of long period fiber gratings (LPFGs) and ultra-long period fiber gratings (ULPFGs) induced by high frequency CO_2 laser pulses was reported in this paper. Here an intensity-type demodulating approach which can satisfy the real measurement was realized based on the edge filtering effect of the LPFG and the ULPFG. The experimental results show that the sensitivities of temperature and strain are $-0.211\text{dB}/^\circ\text{C}$ and $-0.012\text{dB}/10\mu\epsilon$, respectively. And the sensitivity of torsion is $0.4394\text{dB}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$, which is 4 times over than that of normal LPFG.

Keywords Sensing technology; Fiber gratings; Multi-parameter measurements; CO_2 laser; Low cost



Zhu Tao was born in 1976, in Sichuan, China. He received the B. S. Degree and M. S. Degree from the Chongqing University in 2000 and 2003, respectively. At present, he is a Ph. D. degree candidate in Chongqing University. His present interests are optical communication devices and optical sensing devices.