

文章编号: 0253-2239(2002)09-1096-04

长周期光纤光栅扭曲传感器^{*}

王义平 饶云江 胡爱姿 曾祥楷 冉曾令 朱 涛

(重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

摘要: 发现用高频 CO₂ 激光写入的长周期光纤光栅的谐振波长会随光栅扭曲而线性变化。当顺时针扭曲时, 谐振波长向长波方向漂移, 逆时针扭曲时, 谐振波长向短波方向漂移。该新型扭曲传感器不但能实现对扭曲率的直接测量, 而且能判断扭曲方向, 因此具有广泛的应用前景。

关键词: 长周期光纤光栅; 扭曲传感器; 光纤传感器; 扭曲率

中图分类号: TB96: TN253 文献标识码: A

1 引 言

目前有各种各样的扭曲传感器能实现对扭曲率的测量。传统的扭曲传感器一般是运用圆光栅或磁栅通过测量被扭曲的圆柱面上不同位置的两点的相对位移来实现对扭曲率的间接测量^[1], 因此通常体积较大, 不能埋入工程结构。近年来, 能够埋入工程结构的传感器引起了人们的极大兴趣, 以实现所谓的智能材料^[2]。光纤具有能埋入智能材料的优点, 通过偏振态的变化可以间接测得扭曲率, 但只能实现对扭曲率的相对测量^[3]。

近年来, 周期为几十到几百微米的长周期光纤光栅 LPFG 因其易于制作、附加损耗小、无后向反射、与偏振基本无关以及具有较高的温度、折射率和弯曲灵敏度等特性, 得到了人们越来越广泛的重视。Wang 等^[4]提出了一种用腐蚀法制作的凹凸状长周期光纤光栅直接测量扭曲率的方法, 但此长周期光纤光栅特殊的凹凸结构使其机械强度较弱且埋入工程结构后其波导结构会因周围材料的填入而发生较大的变化, 甚至破坏长周期光纤光栅的模式耦合条件。此外, 该传感器因初始耦合峰幅值较小, 以致扭曲前必须预加拉伸应力, 因此实用性较差。本文发现用高频 CO₂ 激光在康宁 SMF-28 光纤中写入的长周期光纤光栅的谐振波长随着光栅扭曲而线性变化。顺时针扭曲时, 谐振波长向长波方向漂移, 逆时针扭曲时, 谐振波长向短波方向漂移。耦合峰幅值随着扭曲率的增加而逐渐减小。用这种长周期光纤

光栅制成的新型扭曲传感器埋入智能材料中不但能实现对扭曲率的直接测量, 而且能判断扭曲方向, 具有广泛的应用前景。

2 基本原理

常用的长周期光纤光栅是用 193 nm 或 248 nm 的紫外光通过振幅掩模曝光氢载掺锗光纤, 通过掺锗光纤的光敏性引起光纤纤芯折射率发生周期性调制而形成^[5]。我们用聚焦的高频 CO₂ 激光在 SMF-28 光纤中写入了一种新型的长周期光纤光栅。所用的 CO₂ 激光能量为 1 W, 波长为 10.6 μm, 脉冲频率为 5 kHz, 聚焦后的焦斑直径为 50 μm。聚焦的高频 CO₂ 激光轴向周期性局部加热光纤产生的热冲击效应可能使 SiO₂ 的晶格发生变化, 密度增加^[6,7]。此外, 在光纤拉制过程中, 由于纤芯比包层冷却得快, 以致纤芯中产生应力残余^[8]。聚焦的高频 CO₂ 激光轴向周期性局部加热光纤产生的局部高温使光纤中的残余应力得以释放^[8,9]。周期性的密度增加和应力释放通过光弹效应引起光纤折射率沿轴向发生周期性变化而形成长周期光纤光栅。

由模式耦合理论可知, 当光纤内引入某种微扰时, 会引起不同传播模式之间的耦合。长周期光纤光栅中的模式耦合属于同向传播的模式之间的耦合, 主要指正向传播的导模耦合至正向传播的包层模。由模式耦合的相位匹配条件可得长周期光纤光栅的初始谐振波长 λ_{res} 为^[10]

$$\lambda_{\text{res}} = (n_{\text{core}} - n_{\text{clad}}^m) \Lambda, \quad (1)$$

式中 n_{core} 为纤芯导模有效折射率, n_{clad}^m 为 m 阶包层模有效折射率, Λ 为光栅周期。因为模式耦合对纤芯

^{*} 国家杰出青年科学基金(60025515)资助课题。

E-mail: ypwang@china.com

收稿日期: 2001-10-04; 收到修改稿日期: 2001-11-28

和包层中发生的微扰非常敏感,所以纤芯和包层的有效折射率的变化对长周期光纤光栅的谐振波长 λ_{\max} 有重要影响,如下式所示^[10]

$$\lambda_{\max} = \lambda_{\text{res}} \left[1 + \frac{\delta n_{\text{core}} \left(\frac{d\lambda_{\text{res}}}{d\Delta} \right)}{\left(n_{\text{core}} - n_{\text{clad}}^m \right)^2} \right], \quad (2)$$

式中 λ_{res} 为纤芯导模与 m 阶包层模之间的初始谐振波长, δn_{core} 为纤芯导模平均有效折射率的变化。

光弹效应对折射率的影响可表示为^[11]

$$n - n_0 = c_1 \sigma_x + c_2 (\sigma_y + \sigma_z), \quad (3)$$

式中 n 为施加应力后的折射率, n_0 为施加应力前的折射率, σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为应力三轴分量, c_1 、 c_2 为系数。沿光纤轴扭曲长周期光纤光栅时,在光纤横切面上将产生沿圆周方向的剪应力 α ($\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$),大小与半径 r 和扭曲率 $\tau = 2\pi N/L$ 成正比^[12], L 为被扭曲的光纤长度, N 为扭曲的转数。轴向应力 σ_z 几乎为零。对于单模光纤,包层比纤芯大得多(SMF-28 光纤包层直径 $125 \mu\text{m}$,纤芯直径约 $10 \mu\text{m}$)因此包层中的剪应力 σ_{clad} 比纤芯中的剪应力 σ_{core} 大得多。又由(3)式可知光弹效应引起的折射率变化与剪应力 σ 成比例,所以剪应力 σ 引起的包层有效折射率变化 dn_{clad}^m 比纤芯有效折射率变化 dn_{core} 大得多。由于扭曲效应是整体作用于长周期光纤光栅上的,使得沿光纤轴向任意横截面的剪应力分布相同,因此在与光纤轴同轴的圆柱面上因扭曲而引起的折射率变化相同,即扭曲主要是使 n_{core} 和 n_{clad}^m 发生变化而不会改变光栅的条纹可见度,也即扭曲对长周期光纤光栅写入时引起的纤芯导模平均有效折射率变化 δn_{core} 几乎没有影响^[10,11]。当扭曲率较小时,扭曲对光栅周期 Δ 的影响可以忽略,并且对于确定的 m 阶包层模和确定的光栅周期 Δ , $d\lambda_{\text{res}}/d\Delta$ 几乎为常数^[10]。因 λ_{\max} 、 n_{core} 和 n_{clad}^m 是剪应力 σ 的函数,把(1)式代入(2)式并对剪应力 σ 取微分,忽略剪应力对 δn_{core} 、 Δ 和 $d\lambda_{\text{res}}/d\Delta$ 的影响,可得扭曲引起的谐振波长的变化 $d\lambda_{\max}$ 近似为

$$d\lambda_{\max} \approx \left(dn_{\text{clad}}^m - dn_{\text{core}} \right) \left[\frac{\delta n_{\text{core}} \left(\frac{d\lambda_{\text{res}}}{d\Delta} \right)}{\left(n_{\text{core}} - n_{\text{clad}}^m \right)^2} - 1 \right] \Delta. \quad (4)$$

因为包层有效折射率变化 dn_{clad}^m 比纤芯有效折射率变化 dn_{core} 大得多,所以 $d\lambda_{\max}$ 主要由剪应力所引起的包层有效折射率变化 dn_{clad}^m 决定,并有近似线性关系。因为光弹效应所引起的折射率变化是增加还是减小与剪应力 σ 的方向有关,即剪应力 σ 的方向不

同, dn_{clad}^m 可能大于零也可能小于零;所以由(4)式可知,沿不同的方向扭曲光栅,谐振波长的漂移具有方向性,即如果顺时针扭曲光栅时,谐振波长向长波方向漂移,逆时针扭曲光栅时,谐振波长向短波方向漂移。当长周期光纤光栅扭曲时,导模与包层模之间的耦合系数减小,以致耦合峰幅值降低。

3 实验结果与讨论

我们采用图1所示的实验装置测试长周期光纤光栅的扭曲特性。研究对象是用高频 CO_2 激光在康宁 SMF-28 光纤中写入的长周期光纤光栅(周期 $\Delta = 437 \mu\text{m}$,周期数 $N = 45$,光栅长 20mm)。长周期光纤光栅的一端固定,另一端粘贴在限位片的表面。把限位片插入分度盘的开槽且使光纤处于分度盘的轴线上。悬挂于分度盘左侧光纤上的 10g 重物使光纤始终处于直线状态。限位片的作用既保证分度盘转动时扭曲光纤,又使光纤可以有微小的轴向移动,从而避免光纤扭曲时产生额外的轴向应力。被扭曲的光纤总长 $L = 60 \text{mm}$,长周期光纤光栅位于光纤中央,实验室室温 $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。中心波长为 1550 nm 的宽带光源作为输入,用光谱分析仪(HP 86140A)测量长周期光纤光栅透射光谱的变化。

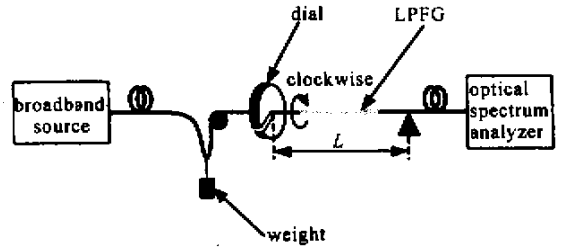


Fig.1 Experimental set-up for twist test of the LPFG

未施加扭曲时,长周期光纤光栅的透射光谱如图2所示,共有三个耦合峰。

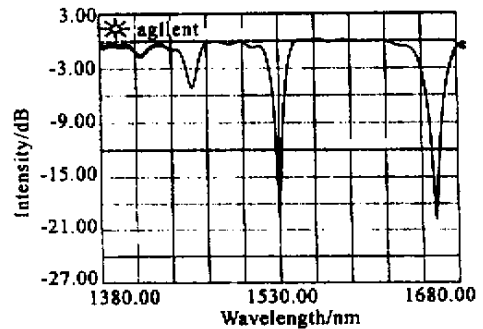


Fig.2 Transmission spectrum of LPFG with out twist

首先测试谐振波长 $\lambda = 1529.88 \text{ nm}$,透射峰幅值为 -20.008 dB 的耦合峰的变化。先顺时针转动

分度盘,每次转动 15° (约 2.2 rad/m),用光谱仪测量谐振波长的变化。共顺时针扭曲 120° (17.5 rad/m),然后逐渐恢复到自由状态;再逆时针扭曲 -120° (-17.5 rad/m)然后又逐渐恢复到自由状态。如图 3 所示,谐振波长随着扭曲率(绝对值)的增加而线性地变化,其灵敏度约为 $0.0645 \text{ nm/(rad/m)}$,且恢复时的重复性很好。图中的公式表示数据点的线性拟向方程, R^2 表示拟合的线性度。顺时针扭曲时,谐振波长向长波方向漂移;逆时针扭曲时,谐振波长向短波方向漂移。长周期光纤光栅扭曲时谐振峰的幅值变化相对较小而损耗几乎没有变化,因此扭曲过程中仍能保持较好的信噪比。如图 4 所示,无论顺时针还是逆时针扭曲,谐振峰的幅值都随扭曲率的增加而有一定的减小,且恢复时的重复性也很好。

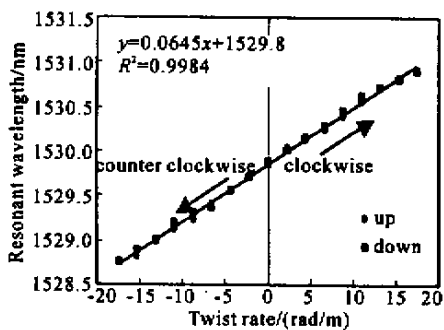


Fig.3 Resonant wavelength versus applied twist rate

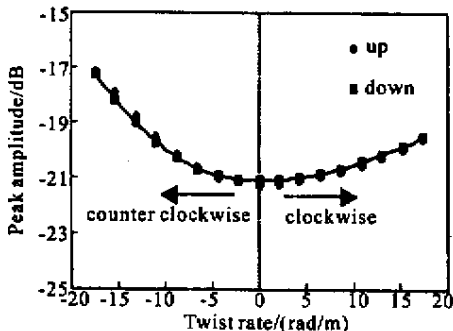


Fig.4 Resonant peak amplitude versus applied twist rate

也测量了谐振波长为 1457.91 nm 和 1661.82 nm 的两个耦合峰随扭曲的变化,发现与以上的现象类似,只是灵敏度稍有不同,这主要是因为相同的扭曲率所引起的对应不同模式 m 的包层有效折射率变化 dn_{clad}^m 不同。

因此用此长周期光纤光栅可以制成很好的扭曲传感器,实现对扭曲的直接测量,并可判断扭曲方向。方法如下:把长周期光纤光栅埋入被测物体扭转轴的轴线上,通过测量谐振波长的变化,可以直接

获得扭曲率的大小,并且从谐振波长的变化方向可以判断轴的扭曲方向,从而实现对扭曲的实时监控,因此该传感器将具有广泛的应用前景。

结论 用高频 CO_2 激光在康宁 SMF-28 光纤中写入的长周期光纤光栅的谐振波长随着光栅扭曲而线性变化。顺时针扭曲时,谐振波长向长波方向漂移;逆时针扭曲时,谐振波长向短波方向漂移。用这种长周期光纤光栅制作成的扭曲传感器不但能实现对扭曲率的直接测量,测量范围是 $\pm 17.5 \text{ rad/m}$,而且能判断扭曲方向,从而可实现对扭曲的实时监控,因此该传感器将在结构扭曲测量中具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Lemarquand V. Synthesis study of magnetic torque sensors. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1999, **35**: 4503 ~ 4510
- [2] Udd E. *Fibre Optic Smart Structures*. New York: Wiley, 1995
- [3] Ulrich R, Simon A. Polarization optics of twisted single-mode fibers. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(13): 2241 ~ 2251
- [4] Wang L A, Lin C Y, Chern G W. Torsion sensor made of corrugated long period fiber grating. *Proc. SPIE*, 2000, **4185**: 640 ~ 643
- [5] Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 58 ~ 65
- [6] Davis K M, Miura K, Sugimoto N *et al.*. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(21): 1729 ~ 1731
- [7] Rao Y J, Wang Y P, Ran Z L *et al.*. Characteristics of novel long-period fiber gratings written by focused high-frequency CO_2 laser pulses. *Proc. SPIE*, 2001, **4581**: 327 ~ 333
- [8] Yamasaki S, Akiyama M, Nishide K *et al.*. Characteristics of long period fiber grating utilizing periodic stress relaxation under high temperature environment. *Proc. SPIE*, 1999, **3746**: 385 ~ 388
- [9] Davis D D, Gaylord T K, Glytsis E N *et al.*. Long-period fibre grating fabrication with focused CO_2 laser pulses. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(3): 302 ~ 303
- [10] MacDougall T W, Pilevar S, Haggans C W *et al.*. Generalized expression for the growth of long period gratings. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(10): 1449 ~ 1451
- [11] Wu Chongqing. *Optical Waveguide Theory* (光波导理论). Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 111 ~ 114 (in Chinese)
- [12] Liu Hongwen. *Material Mechanics* (the third version, vol. 1) (材料力学). Beijing: Senior Education Publishing Group, 1982. 97 ~ 108 (in Chinese)

A Novel Long-Period Fiber Grating Torsion Sensor

Wang Yiping Rao Yunjiang Hu Aizi Zeng Xiangkai Ran Zengling Zhu Tao

(*Department of Optoelectronic Engineering , Chongqing University , Chongqing 400044*)

(Received 4 October 2001 ; revised 28 November 2001)

Abstract : A novel torsion sensor based on a long-period fiber grating (LPFG) written by high-frequency CO₂ laser pulses is demonstrated. The resonant wavelength shifts linearly toward longer wavelength as the LPFG is twisted clockwise , whereas it shifts toward linearly shorter wavelength as the LPFG is twisted anticlockwise. Such a torsion sensor can , not only measure the applied twist rate directly , but also determine the twist direction. Accordingly , this all-fiber absolute torsion sensor could find important engineering applications in the field of smart structures where the ability for the sensor to be embedded into the structure is critical.

Key words : long-period fiber gratings ; torsion sensors ; optical fiber sensors ; twist rate