

# 基于超长周期光纤光栅的高灵敏度扭曲传感器<sup>\*</sup>

朱 涛<sup>1)2)</sup> 饶云江<sup>2)†</sup> 莫秋菊<sup>1)</sup>

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 610054)

(2005 年 4 月 18 日收到, 2005 年 6 月 16 日收到修改稿)

利用高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入的周期达数毫米的超长周期光纤光栅(ULPFG), 实验研究了这种新型 ULPFG 的扭曲特性, 发现它的某些高阶谐振波长漂移与扭曲率之间具有良好的线性关系和方向相关性, 其灵敏度可达 0.2244 nm/(rad/m), 是高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入法写入的普通 LPFG 扭曲灵敏度的 4 倍. 初步的理论分析表明, 新型 ULPFG 横截面折变的非对称性以及导模与高阶包层模之间发生的耦合使得扭曲具有方向相关性和很高的灵敏度. 基于这种 ULPFG 独特的扭曲特性, 设计了一种可判别方向的强度型高灵敏度扭曲传感器, 测量灵敏度达 0.4394 dB/(rad/m), 可满足实际应用中对扭曲低成本实时测量的要求.

关键词: 光纤传感, 光纤光栅, CO<sub>2</sub> 激光, 扭曲测量, 双折射

PACC: 4281W, 4281P

## 1. 引言

随着现代测量技术的发展, 光纤传感器与传统的电传感器相比, 由于具有不受电磁干扰、复用能力强、灵敏度高、体积小、重量轻、可埋入各种结构或材料等一系列优点越来越受到人们的重视. 近年来人们研制出了各种各样的光纤传感器, 其中尤以测量温度、压力、应变等物理量的光纤传感器居多<sup>[1-6]</sup>. 在实际应用中, 对弯曲、扭曲等特殊物理量的测量也是非常重要的. 近年来, 有学者提出利用凹凸状长周期光纤光栅<sup>[7]</sup>(LPFG)或基于布拉格光纤光栅设计的传感结构<sup>[8]</sup>来测量扭曲率, 但存在机械强度弱及不能判别扭曲方向等缺点. 前不久我们利用高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入 LPFG 可同时实现扭曲率测量和扭曲方向判别的现象<sup>[9]</sup>.

本文利用高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入周期达数毫米的超长周期光纤光栅(ULPFG), 实验研究了这种新型 ULPFG 的扭曲特性, 在研究模式耦合理论和双折射的基础上, 结合高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入 ULPFG 折变分布的非对称性<sup>[9]</sup>, 指出可利用新型 ULPFG 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. 实验表明, 新型 ULPFG 高阶谐振峰扭曲率与波长漂移具有线性关系, 在  $\pm 120^\circ$  的扭曲范围内, 灵敏度可达 0.2244 nm/(rad/m), 并且可以判断扭曲方向. 基于这个独特的光学特性, 文中借助 ULPFG 的边缘线性滤波原理提出了一种测量扭曲率的强度型高灵敏度扭曲传感器.

## 2. 理论分析

当长周期光纤光栅的周期达到毫米量级(称为超长周期光纤光栅)时, 在光栅中能够发生耦合的就不仅局限于纤芯基模与一阶各次包层模的耦合, 高阶各次包层模与纤芯基模也将同时发生同向耦合, 因此, 在 ULPFG 的透射峰上将会出现多个谐振峰, 根据 ULPFG 的耦合理论<sup>[10]</sup>, 每个谐振峰都应满足相位匹配条件

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

式中  $\lambda_{\text{res}}^{N,m}$  是谐振波长,  $\Lambda$  是 ULPFG 的周期,  $N$  是闪耀阶数,  $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  和  $n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$  分别为纤芯基模和第  $N$  阶闪耀

<sup>\*</sup> 教育部重点基金(批准号:104210), 重庆市自然科学基金(批准号:8415)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: yjrao@cqu.edu.cn

模第  $m$  次包层模的有效折射率  $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  和  $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$  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,  $\lambda_D^{N,m}$  为最初的设计谐振波长, 其值等于  $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  和  $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$  都为 0 时的谐振波长. 从 (1) 式可知, 对于  $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  和  $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$  一个微小的变化,  $\lambda_{\text{res}}^{N,m}$  将极大地依赖于光栅周期和耦合的闪耀阶数. 另外, 紫外写入的 ULPG 其  $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$  占主要因素, 而用高频  $\text{CO}_2$  激光脉冲写入的 ULPG 其折变主要在包层, 所以  $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$  将占主要因素, 这一点就使得新型 ULPG 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.

ULPG 的扭曲过程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 ULPG 产生圆双折射, 扭曲率和圆双折射的关系可以近似表示为<sup>[11]</sup>

$$E = GR_T, \quad (2)$$

式中  $G$  表示弹光系数,  $E$  是由扭曲引起的圆双折射矢量,  $R_T$  是扭曲矢量(方向为逆时针或顺时针扭曲). 圆双折射矢量  $E$  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  $E$  的方向将使得  $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},N,m}$  变大或变小. 由方程 (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.

### 3. 实验与结果

将待写入 ULPG 的康宁 SMF-28 光纤固定在写入装置的三维微动台上, 设定好 ULPG 的周期, 通过控制计算机即可制作出 ULPG, 利用光谱仪可以观察到制作出的 ULPG 的谱图. 图 1 为制作出的周期为 2mm 的 ULPG 的透射谱, 这些谐振峰是纤芯基模耦合到多阶包层模的结果, 可见 ULPG 相比普通 LPFG 在相同的带宽范围内具有更多的谐振峰.

图 2 所示为 LPFG 扭曲特性的测量装置, 实验测试了图 1 所示 ULPG(周期为 2 mm, 周期数目为 20 个, 光栅长为 40 mm) 各谐振峰的扭曲特性. 实验中被扭曲的光纤总长  $L=100$  mm(ULPG 位于被扭

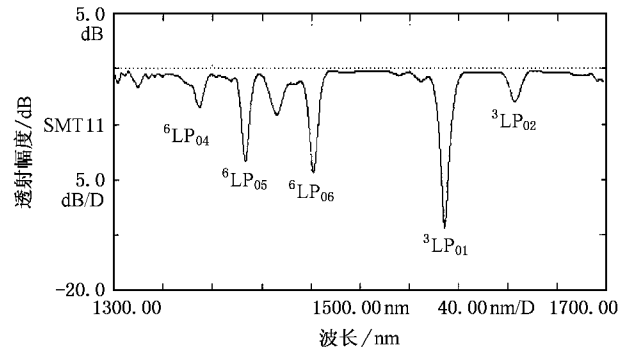


图 1 周期为 2 mm 的 ULPG 的各阶谐振峰

曲光纤的中间位置), 实验室室温  $T=25^\circ\text{C}$ . 这里定义扭曲率为单位光纤长度的扭曲弧度, 即  $T_{ij} = \theta/L$  (单位为  $\text{rad/m}$ ),  $\theta$  为扭角,  $L$  为扭曲光纤的长度. 图 3 为图 1 中所示的  ${}^3\text{LP}_{01}$  谐振峰谐振波长随扭曲率的变化关系,  ${}^3\text{LP}_{01}$  谐振峰原始中心波长为 1567.5 nm, 幅度为  $-14.85$  dB, 图中正扭曲率表示顺时针扭曲 ULPG, 负扭曲率表示逆时针扭曲 ULPG. 从图 3 可以看出, ULPG 的  ${}^3\text{LP}_{01}$  谐振峰在  $\pm 20$   $\text{rad/m}$  (约  $\pm 120^\circ$  的扭曲范围) 范围内, 其中心波长漂移与扭曲率呈很好的线性关系, 灵敏度为 0.2244 nm/( $\text{rad/m}$ ), 是高频  $\text{CO}_2$  激光脉冲写入法写入的普通 LPFG 扭曲灵敏度的 4 倍. 谐振峰幅度随扭曲率的变化如图 4 所示, 可见在测量范围内, 幅度变化不大. 我们针对  ${}^3\text{LP}_{01}$  谐振峰做了 5 次循环实验(先顺时针扭曲到约  $120^\circ$ , 然后逆时针扭曲到  $0^\circ$ ; 再逆时针扭曲到约  $-120^\circ$ , 然后顺时针扭曲到  $0^\circ$ , 如此循环), 最后发现谐振波长漂移和扭曲率的线性关系重复性很好, 并且没有磁滞现象, 再针对重新写入的 10 支周期为 2 mm 的 ULPG 的相同谐振峰也做了重复扭曲实验, 每次都得到了几乎一样的实验结果. 这充分表明利用 ULPG 实现扭曲率的测量具有很好的线性和重复性.

针对新型 ULPG 这种独特的扭曲特性, 我们设计了一种能实现高灵敏度扭曲测量的强度型传感方案, 图 5 为强度解调的原理图. 从图 1 和图 5 ULPG 阻带的特征可见, 左右阻带在一定的波长范围内具有近似线性的特性, 当谐振波长向左或右线性漂移时, 在谐振峰幅度变化不大的情况下, 这种线性度很好. 当在 ULPG 阻带线性区设置一固定波长的激光时, 随着 ULPG 的线性漂移, 该激光波长就相对于 ULPG 作线性漂移, 其输出功率与最初状态的差值也会呈线性规律变化.

对上文讨论的周期为 2 mm 的  ${}^3\text{LP}_{01}$  谐振峰, 中心

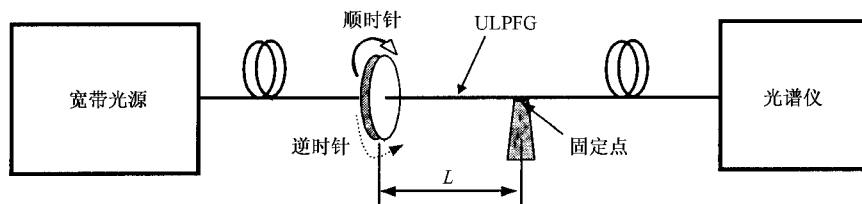


图 2 测量 ULPG 扭曲特性的实验装置

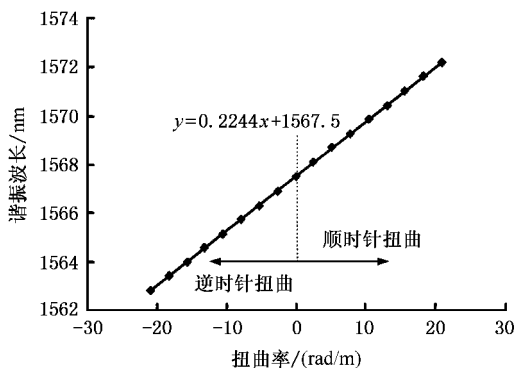


图 3 ULPG 谐振峰谐振波长和扭曲率之间的关系

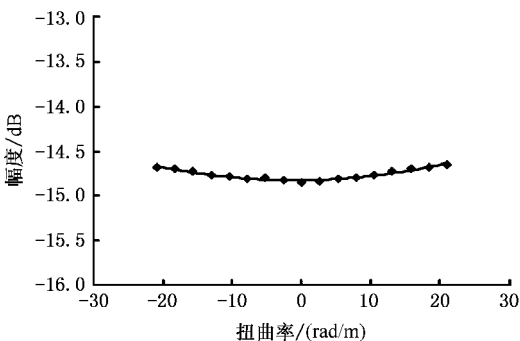


图 4 ULPG 谐振峰幅度和扭曲率之间的关系

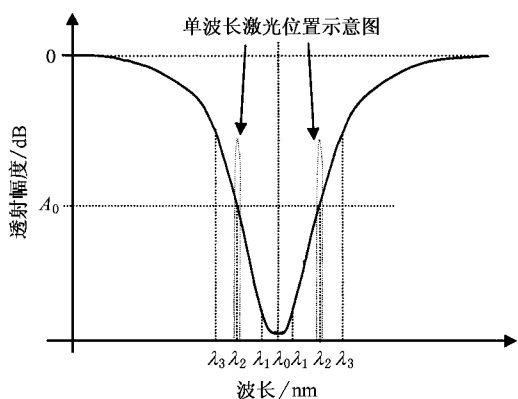


图 5 基于 ULPG 边缘滤波效应实现强度解调波长漂移量的原理图

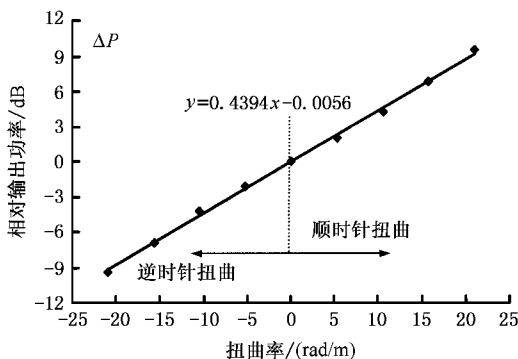


图 6 强度解调中相对输出功率差与扭曲率的关系

波长为  $\lambda_0 = 1567.5 \text{ nm}$  ,阻带左右边缘线性区带宽  $\lambda_3 - \lambda_1$  和  $\lambda'_3 - \lambda'_1$  约为  $12 \text{ nm}$  输入的两个激光波长分别设定在  $\lambda_2$  和  $\lambda'_2$  (它们分别位于 ULPG 左右阻带线性区的中心,即  $\lambda'_2 = (\lambda'_1 + \lambda'_3)/2$  ,  $\lambda_2 = (\lambda_1 + \lambda_3)/2$  ) ,当扭曲率在  $\pm 20 \text{ rad/m}$  范围内变化时,两激光波长相对 ULPG 漂移范围约为  $\pm 4.5 \text{ nm}$  ,小于 ULPG 对应谐振峰的线性测量区,解调时用两个光电探测器来探测激光器的输出功率,假定初始状态探测到两激光输出功率为  $P_{10}$  和  $P_{20}$  ,受到扭曲作用时分别为  $P_1$  和  $P_2$  ,则功率差  $\Delta P_1 = P_1 - P_{10}$  和  $\Delta P_2 = P_2 - P_{20}$  就体现了作用在 ULPG 上的扭曲变化,由于  $\Delta P_1$  和  $\Delta P_2$  对相同扭曲率其正负极性相反,所

以通过求  $\Delta P_1$  和  $\Delta P_2$  的差  $\Delta P = \Delta P_1 - \Delta P_2$  可以将扭曲率的灵敏度提高 2 倍,并且  $\Delta P$  的极性可以用于判别 ULPG 被扭曲的方向,如果  $\Delta P > 0$  ,则 ULPG 谐振波长向长波方向漂移,即 ULPG 受到了顺时针方向的扭曲,反之则受到了逆时针方向的扭曲.图 6 为实验测得的功率和相对输出功率差与扭曲率变化的关系,图中箭头标明了 ULPG 受到扭曲的方向,由图可以看出扭曲率的测量灵敏度约为  $0.4394 \text{ dB}(\text{rad/m})$  .当施加在 ULPG 上的扭曲快速变化时,ULPG 的波导结构会快速变化,因此 ULPG 谐振峰的特性也能随外界扭曲的变化而快

速变化,现在光电探测器能够响应的频率很容易达到 MHz 的数量级,因此,利用该 ULPGF 可以实现扭曲的快速动态绝对测量.

温度的变化会严重影响这种方法的测量精度,如果温度的变化太大,甚至超过了上述的线性区,这种方法就不再适用,因此在实际应用中,需要同时测量环境温度的变化,当整个测量工作在线性区时,可以根据 ULPGF 谐振峰的温度特性来补偿由于温度变化而带来的测量误差.

## 4. 结 论

由于高频 CO<sub>2</sub>激光脉冲写入 ULPGF 横截面折变

分布的非对称性,文中通过对新型 ULPGF 在模式耦合理论和双折射分析的基础上,阐明了利用新型 ULPGF 导模与高阶包层模耦合的谐振峰可进行扭曲率和扭曲方向判断的机理,并通过实验验证了理论分析的正确性.实验结果表明新型 ULPGF 某些高阶谐振峰扭曲率与波长漂移具有很好的线性关系,并且在  $\pm 120^\circ$  的测量范围内,灵敏度可达 0.2244 nm/(rad/m),是高频 CO<sub>2</sub>激光脉冲写入法写入的普通 LPFG 扭曲灵敏度的 4 倍.基于该独特的光学特性,文中利用 ULPGF 的边缘滤波效应设计了一种测量扭曲率的高灵敏度强度型扭曲传感器,其灵敏度达到了 0.4394 dB/(rad/m),完全可以满足实际应用中

- 
- [ 1 ] Udd E 2002 *Fiber Optic Sensors* ( New York : Marcel Dekker ) p1
- [ 2 ] Wang Y P , Rao Y J , Ran Z L , Zhu T 2003 *Acta Phys . Sin .* **52** 1432 ( in Chinese )[ 王义平、饶云江、冉曾令、朱 涛 2003 物理学报 **52** 1432 ]
- [ 3 ] Mei N N , Kin S C 2002 *Optics Communications* **208** 321
- [ 4 ] Rao Y J 1997 *Meas . Sci . Technol .* **8** 355
- [ 5 ] Rao Y J , Wang Y P , Ran Z L , Zhu T 2003 *J . Lightwave Technology* **21** 1320
- [ 6 ] Shun J L , Xu J H , Tian G Y , Guo J H , Zhao J , Xie A F 2001 *Chin . Phys .* **10** 631
- [ 7 ] Chunn Y L , Wang L A , Chen G W 2001 *J . Lightwave Technology* **19** 1159
- [ 8 ] Zhang W G , Kai G Y , Dong X Y , Yuan S Z , Zhao Q D 2002 *IEEE Photon . Technol . Lett .* **14** 1154
- [ 9 ] Wang Y P , Rao Y J 2004 *Electronics Letters* **40** 1101
- [ 10 ] Grubsky V , Skoruca A , Starodubov D S , Feinberg J 1999 *IEEE Photon . Technol . Lett .* **11** 87
- [ 11 ] Galtarossa A , Palmieri L 2002 *J . Lightwave Technology* **20** 1149

# A high sensitivity fiber-optic torsion sensor based on a novel ultra long-period fiber grating<sup>\*</sup>

Zhu Tao<sup>1 2)</sup> Rao Yun-Jiang<sup>2) †</sup> Mo Qiu-Ju<sup>1)</sup>

1) ( *Department of Optoelectronic Engineering , Chongqing University , Chongqing 400030 , China* )

2) ( *School of Communication and Information Engineering , University of Electronics Science & Technology of China , Chengdu 610054 , China* )

( Received 18 April 2005 ; revised manuscript received 16 June 2005 )

## Abstract

A high sensitivity fiber-optic torsion sensor is described , which measures twist rate and determines twist direction simultaneously by using a novel ultra long-period fiber grating ( ULPG ) with periods of up to several millimeters fabricated by high frequency CO<sub>2</sub> laser pulses . The torsion characteristics of a ULPG are analyzed based on the coupling theory and birefringence phenomena . The experimental results show that a higher torsion sensitivity of 0.2244nm/( rad/m ) for high order resonant modes was obtained , which is four times higher than that of the long-period fiber grating written by high frequency CO<sub>2</sub> laser pulses . Finally , an intensity-type demodulation approach for the realization of real-time torsion measurement is proposed and demonstrated based on the edge filtering effect of the ULPG .

**Keywords** : optical fiber sensors , fiber gratings , CO<sub>2</sub> lasers , torsion measurement , birefringence

**PACC** : 4281W , 4281P

---

<sup>\*</sup> Project supported by the Key Projects Program of Education Ministry of China( Grant No. 104210 ) and the Key Projects Program of Natural Science Foundation of Chongqing( Grant No. 8415 ) .

<sup>†</sup> E-mail : yjrao@cqu.edu.cn