

# 高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入的长周期光纤光栅传感器的特性研究\*

王义平 饶云江 冉曾令 朱 涛

(重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

(2002 年 8 月 21 日收到, 2002 年 9 月 29 日收到修改稿)

报道了一种用高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入的新型长周期光纤光栅(LPFG). 发现该 LPFG 具有独特的应变、温度、弯曲、扭曲和横向负载特性. 分析表明这些特性与单侧 CO<sub>2</sub> 激光加热导致光栅横截面折射率分布不均匀有关. 基于这些独特的特性提出了几种新型的 LPFG 传感器: 1) 能彻底解决弯曲与其他参量之间交叉敏感问题的弯曲不敏感的传感器; 2) 不仅能绝对测量扭曲率而且能判断扭曲方向的扭曲传感器; 3) 单个 LPFG 实现温度和横向负载同时测量的传感器. 这些新型的传感器具有方法简单易行、体积小、能埋入智能材料的优点, 可实现对工程结构的实时监测, 具有广泛的应用前景.

关键词: 长周期光纤光栅, 光纤传感器, 应变传感器, 温度传感器, 弯曲传感器, 扭曲传感器, 负载传感器

PACC: 4281W, 4281C, 4281B

## 1. 引 言

大型工程结构如桥梁、大坝、高层建筑的建设和使用都需要大量的智能传感器实时监测健康状况, 以降低其建设和维护成本. 几十年来, 包括光纤传感器在内的大量智能传感器被应用到这一领域<sup>[1]</sup>. 布拉格光纤光栅(FBG)是一种重要的光纤传感器, 尤其适合于分布式传感<sup>[2]</sup>. 近年来, 周期为几十微米到几百微米的长周期光纤光栅(LPFG)得到了人们越来越广泛的重视<sup>[3,4]</sup>. 由于 LPFG 具有易于制作、附加损耗小、无后向反射、与偏振无关等优点以及具有比 FBG 更好的温度、折射率、弯曲和横向负载灵敏度<sup>[3]</sup>, 因此, 在光纤传感领域得到了广泛应用.

本文报道了一种用高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲在单模光纤中写入的新型 LPFG<sup>[5]</sup>. 首次发现这种新型的 LPFG 具有许多与紫外光等其他方法写入的 LPFG 不同的特性, 比如弯曲、扭曲和横向负载特性具有明显的方向相关性. 理论分析表明这些独特的特性与单侧 CO<sub>2</sub> 激光加热导致光栅横截面折射率分布不

均匀有关. 本文详细讨论了这种 LPFG 的制作方法及其应变、温度、弯曲、扭曲和横向负载特性, 以及在传感领域的应用: 1) 能彻底解决弯曲与其他参量之间的交叉敏感问题的弯曲不敏感的传感器; 2) 不仅能绝对测量扭曲率而且能判断扭曲方向的扭曲传感器; 3) 单个 LPFG 实现温度和横向负载同时测量的传感器. 这些新型的传感器具有体积小、能埋入智能材料的优点, 可实现对工程结构的实时监测, 因此具有广泛的应用前景.

## 2. 基本原理

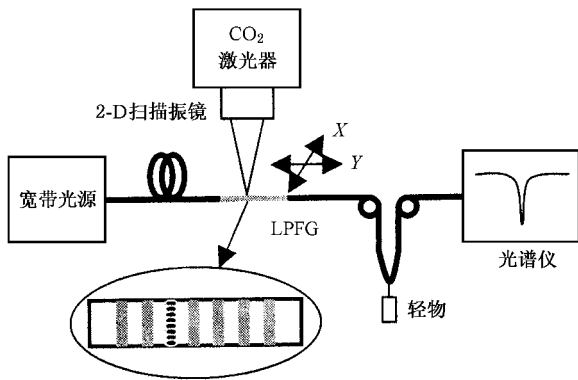
常用的 LPFG 写入法是利用氢载掺锗光纤光敏性的紫外光写入法, 但该方法一般需要昂贵的振幅掩模、光敏光纤、退火处理以致其成本较高且热稳定性较差<sup>[3,4]</sup>. 然而高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲可在普通单模光纤中写入高质量的 LPFG, 且热稳定性较好、不需退火处理、成本低, 此外可随意改变 CO<sub>2</sub> 激光的扫描周期从而写入不同传输特性的 LPFG. CO<sub>2</sub> 激光写入法的装置如图 1 所示<sup>[5]</sup>, 全功率为 10W 的 CO<sub>2</sub> 激

\* 国家杰出青年科学基金(批准号: 60025515)资助的课题.

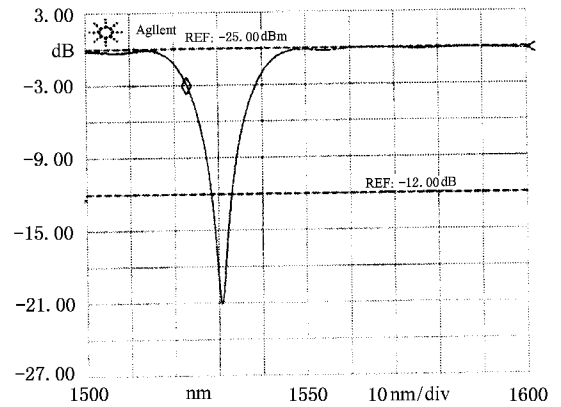
光器由计算机控制,可调节输出激光脉冲的各种参数. 焦斑直径可由聚焦透镜调节. 宽带光源作为输入,光谱仪(HP86140A)监测 LPFG 透射谱的变化. 由 2-D 扫描振镜控制的 CO<sub>2</sub> 激光沿横向( $X$ )扫描光纤,然后使激光光束沿光纤轴向( $Y$ )偏移一个光栅周期,再次扫描光纤,使激光光束沿  $Y$  向每偏移一次就  $X$  向扫描光纤一次. 这样光纤经 CO<sub>2</sub> 激光轴向周期性加热,其折射率发生轴向周期性变化而形成 LPFG,其透射谱如图 2 所示. 该 LPFG 的周期  $\Lambda = 450\mu\text{m}$ ,周期数 500,自由状态时谐振波长  $\lambda = 1530.82\text{nm}$ ,透射峰幅值为  $-21.091\text{dB}$ . 该 LPFG 的常用光学参数如表 1 所示. 用此方法可在单模光纤中各个感兴趣的波长处制作出 3dB 带宽较窄,谐振峰幅值较大,低插损的单峰或多峰的 LPFG.

表 1 高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入的 LPFG 的光学特性

参 数	数值	
波长范围/nm	1546—1650	
通带	最大嵌入损耗/dB	0.5
	典型嵌入损耗/dB	0.3
阻带	波长范围/nm	1520—1545
	最大带阻比/dB	22
3dB 带宽/nm	15—17	
PDL/dB	0.3	
回路损耗/dB	> 30	
热稳定性( $\text{nm}/^\circ\text{C}$ )	0.05	

图 1 高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入 LPFG 的装置

在光纤拉制过程中,纤芯比包层冷却得快,以致拉应力保留在纤芯中形成残余应力. 聚焦的高频 CO<sub>2</sub> 激光轴向周期性加热光纤产生的局部高温使得被加热处纤芯中的残余应力得以释放和密度增加,

图 2 高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入的 LPFG 的透射谱图

周期性的应力释放和密度增加通过光弹效应使光纤折射率沿轴向周期性变化从而形成 LPFG<sup>[5,6]</sup>. 单侧入射的 CO<sub>2</sub> 激光,在光纤表面同时产生反射和透射,由于 SiO<sub>2</sub> 对 10.6 $\mu\text{m}$  波长的激光吸收较强,使得透射光的能量沿激光入射方向逐渐减弱,以致在光纤面向激光入射的一侧激光能量较强,而在背向入射方向的一侧激光的能量较弱,从而导致在光纤横截面上因 CO<sub>2</sub> 激光加热而引起的折射率分布不均匀<sup>[7]</sup>. 即在光纤面向激光入射的一侧,密度增加较大,残余应力释放较多,因此折射率增加较大;而在光纤背向激光入射方向的一侧,密度增加较小,残余应力释放较少,因此折射率增加较小. 相应于文献[7,8]中的现象,高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入的 LPFG 横截面折射率分布不均匀导致了其弯曲、扭曲、横向负载等特性的方向相关性.

由模式耦合理论可知,在光纤中引入某种微扰会导致模式耦合. LPFG 中的模式耦合主要是指同向传播的导模和包层模之间的耦合<sup>[9]</sup>. 由模式耦合的相位匹配条件可得 LPFG 的初始谐振波长  $\lambda_{\text{res}}$  为<sup>[4]</sup>

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

式中  $n_{\text{core}}$  为纤芯导模有效折射率,  $n_{\text{clad}}^m$  为  $m$  阶包层模有效折射率,  $\Lambda$  为光栅周期. LPFG 的谐振波长  $\lambda_{\text{max}}$  为<sup>[4]</sup>

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

式中  $\delta n_{\text{core}}$  为纤芯导模平均有效折射率的变化. 模式耦合对导模和包层模中微扰的高度敏感性使得 LPFG 的谐振波长和谐振峰幅值对纤芯和包层每个周期内的平均有效折射率变化非常敏感. 外界条件

(温度、应力、弯曲、扭曲和横向负载等)的变化,使得 LPFG 纤芯有效折射率、包层有效折射率或光栅周期等发生变化,即使纤芯导模和正向传播的包层模之间的耦合条件发生变化,从而导致 LPFG 的谐振波长和共振峰幅值发生变化,测量谐振波长或幅值就可获得这些物理量的大小。

### 3. LPFG 的传感特性及应用

LPFG 的特性与其形成机理密切相关,因此不同方法写入的 LPFG 由于其形成机理不同将可能具有不同的独特特性。实验表明高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲在单模光纤中写入的 LPFG 具有与紫外光等其他方法写入的 LPFG 不同的特性。下面分别详细介绍其应变、温度、弯曲、扭曲和横向负载特性及其在传感中的应用。

#### 3.1. 应变特性及应用

这种新型 LPFG 的轴向应变特性如图 3 所示,其谐振波长的应变灵敏度比 FBG 的应变灵敏度低得多<sup>[2]</sup>,约为 -0.45nm/mε。由于 LPFG 的周期比 FBG 的周期大得多,同样的应变引起的 LPFG 的周期变化相对较小,以致同等应变对 LPFG 的模式耦合影响较小,因此 LPFG 的应变灵敏度相对较低。

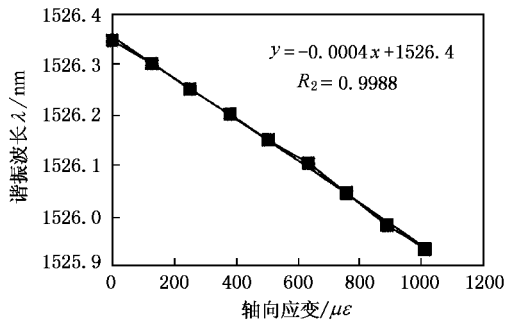


图 3 高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲写入的 LPFG 轴向应变特性

#### 3.2. 温度特性及应用

高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲在康宁 SMF-28 光纤中写入的 LPFG 的温度特性如图 4 所示,当温度升高时,谐振波长发生‘红’移,其灵敏度约为 0.058nm·°C<sup>-1</sup>,比 FBGs 的温度灵敏度高几倍<sup>[2,3]</sup>。高频 CO<sub>2</sub> 激光脉冲在光敏光纤中写入的 LPFG 的温度特性如图 5 所示,当温度升高时,谐振波长发生‘蓝’移,其灵敏度

为 -0.3nm·°C<sup>-1</sup>,远大于其他方法写入的 LPFG 的温度灵敏度<sup>[3]</sup>,然而谐振峰幅值对温度不敏感,最大变化仅为 ±0.1dB,因此该 LPFG 是一种高灵敏度的温度传感器。由此可见 LPFG 的温度特性不仅与写入方法有关,而且与光纤的类型有关。

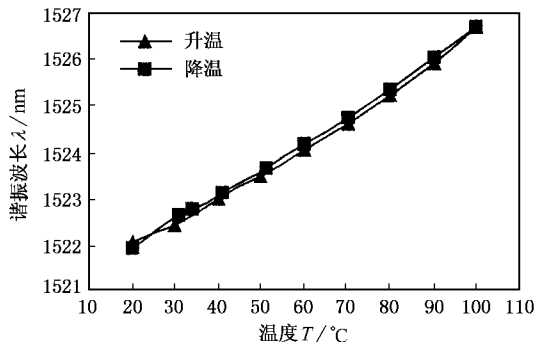


图 4 康宁 SMF-28 光纤中写入的 LPFG 的温度特性

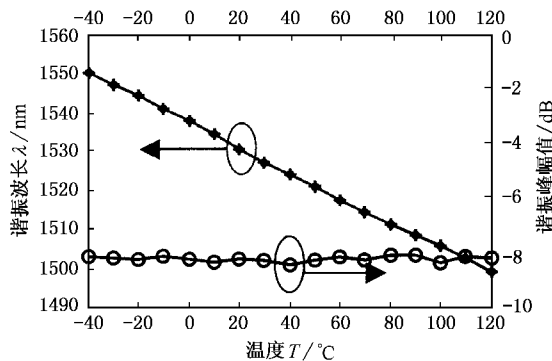


图 5 光敏光纤中写入的 LPFG 的温度特性(\* 表示谐振波长, ○表示谐振峰幅值)

#### 3.3. 弯曲特性及应用

本文发现这种新型 LPFG 的谐振波长的弯曲敏感性具有较强的方向相关性<sup>[10]</sup>。如图 6 所示,在不同圆周方向上弯曲 LPFG,其谐振波长的弯曲灵敏度不同,且在圆周的两个对称方向上对弯曲不敏感,这是由于这种 LPFG 横截面折射率分布不均匀引起的。如图 7(a)所示,在弯曲不敏感的方向上,当弯曲曲率为 1.1m<sup>-1</sup>时,谐振波长仅漂移 -0.018nm,即灵敏度仅约为 -0.016nm/m<sup>-1</sup>,这比其他方法写入的 LPFG 的弯曲灵敏度低两个数量级<sup>[10,11]</sup>。如图 7(b)所示,在弯曲敏感的方向上,谐振波长随弯曲线性漂移,最大灵敏度约为 -7nm/m<sup>-1</sup>。因此该 LPFG 具有弯曲敏感和不敏感的双重特性。当该 LPFG 用于测量温度、折射率或应变时,把谐振波长对弯曲最不敏

感的侧面紧贴放置 LPFG 的基底的表面, 这样即使热变形或外界的受力使基底发生变形, 进而导致光栅发生弯曲, 只要弯曲程度不是特别大(曲率小于  $1.1\text{m}^{-1}$ ) 就几乎不会对谐振波长的漂移产生影响, 从而可大大提高测量精度. 因此, 该 LPFG 可望从根本上解决其他方法写入的 LPFG 在测量中存在的温度、折射率、应变等参量与弯曲的交叉敏感问题<sup>[3, 11]</sup>, 从而具有广泛的应用前景. 此外, 当把该 LPFG 谐振波长对弯曲敏感的侧面紧贴工程结构, 可实现对工程结构的弯曲测量.

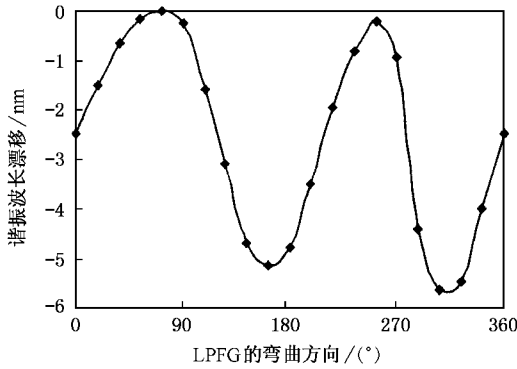


图 6 LPFG 弯曲曲率为  $1.3\text{m}^{-1}$  时, 谐振波长漂移与弯曲方向的关系

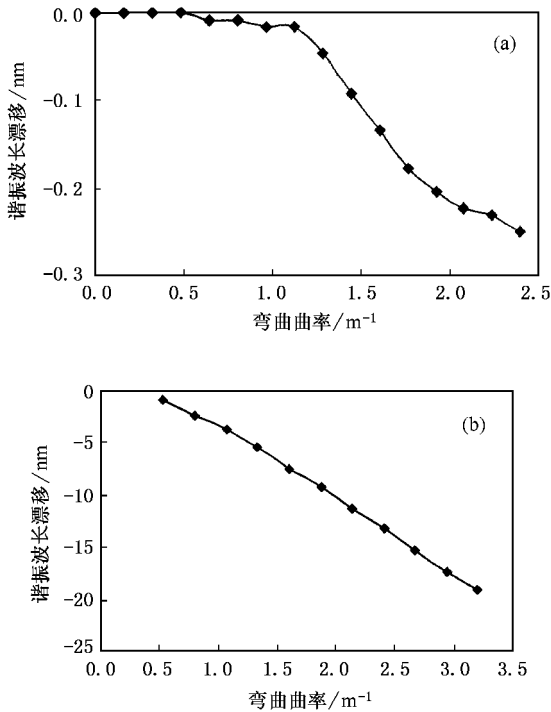


图 7 (a) 弯曲最不敏感方向 (b) 弯曲最敏感方向, LPFG 谐振波长漂移与弯曲曲率的关系

### 3.4. 扭曲特性及应用

本文首次发现这种新型 LPFG 的谐振波长随着光栅扭曲而线性变化, 其灵敏度约为  $0.0645\text{nm}\cdot(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})^{-1}$ , 且恢复时的重复性很好<sup>[12]</sup>. 如图 8 所示, 顺时针扭曲时, 谐振波长‘红’移; 逆时针扭曲时, 谐振波长‘蓝’移. 耦合峰幅值随着扭曲率的增加而逐渐减小. 用这种 LPFG 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  $\pm 17.5\text{rad}\cdot\text{m}^{-1}$ , 而且能判断扭曲方向, 克服了光纤扭曲传感只能实现相对测量和皱褶式 LPFG 不能判断扭曲方向<sup>[11]</sup>的不足, 从而可实现对扭曲的实时监控, 因此该 LPFG 在结构扭曲测量中将获得广泛应用.

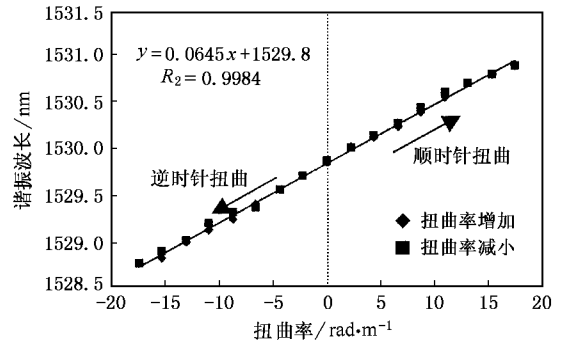


图 8 LPFG 谐振波长与扭曲率的关系

### 3.5. 横向负载特性及应用

本文首次发现这种新型 LPFG 的谐振波长的横向负载灵敏度具有很强的方向相关性<sup>[13]</sup>. 如图 9 所示, 在圆周  $0^\circ\text{--}180^\circ$  范围内有一个谐振波长对横向负载发生‘红’移最敏感的方向 ( $+0.03\text{nm}\cdot(\text{g}\cdot\text{mm}^{-1})^{-1}$ ) 和一个发生‘蓝’移最敏感的方向 ( $-0.03\text{nm}\cdot(\text{g}\cdot\text{mm}^{-1})^{-1}$ ) 以及两个对横向负载不敏感的方向(最大变化仅为  $\pm 0.1\text{nm}$ ). 如图 10(a) 所示, 在谐振波长对横向负载比较敏感的圆周方向上, 谐振波长随负载量的变化而线性漂移, 而在特定的方向上 ( $0^\circ$ ), 谐振波长对横向负载不敏感. 如图 10(b) 所示, 在圆周的各个方向上, 谐振峰幅值都随着负载量的增加而线性减小且其灵敏度相近, 约为  $0.07\text{dB}\cdot(\text{g}\cdot\text{mm}^{-1})^{-1}$ , 即方向相关性较弱. 图 10 中只画出了几个具有代表性的圆周方向 ( $0^\circ, 30^\circ, 55^\circ, 130^\circ, 150^\circ$ ) 的横向负载特性曲线.

根据该 LPFG 的谐振波长对特定圆周方向上的横向负载不敏感而谐振峰幅值随横向负载的增加而

线性减小以及谐振波长随温度变化线性漂移而谐振峰幅值对温度变化不敏感的独特特性,分别测量 LPFG 谐振波长和幅值的变化就可以得到温度和横向负载的变化.该传感器可望从根本上解决了温度和横向负载之间的交叉敏感问题<sup>[13]</sup>,从而用一个 LPFG 实现对工程结构的温度和横向负载的实时监控.此外,该 LPFG 作为单纯的负载传感器时,可用谐振波长和幅值的变化相互校正,提高测量精度.

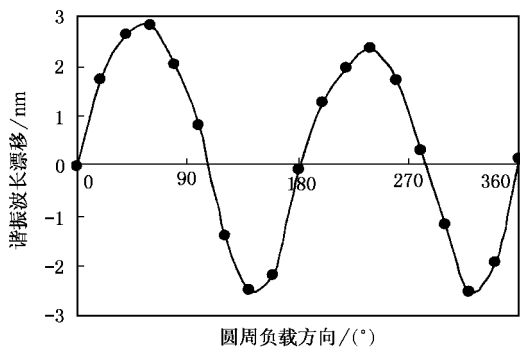


图 9 当 LPFG 负载  $80\text{g}\cdot\text{mm}^{-1}$  时,谐振波长漂移与负载方向的关系

### 4. 结 论

高频  $\text{CO}_2$  激光脉冲在单模光纤中写入 LPFG 具有很好的光学特性,如高带阻比、低插损、偏振无关、低回损等.单侧  $\text{CO}_2$  激光加热引起的 LPFG 横截面折射率分布的不均匀性使得这种 LPFG 具有与其他方法写入的 LPFG 不同的特性:1) 谐振波长的温度灵敏度的大小和漂移方向与光纤类型有关,而谐振峰幅值对温度不敏感;2) 谐振波长的弯曲灵敏度具有很强的方向相关性,且在圆周的两个对称方向上对弯曲不敏感;3) 谐振波长随着光栅扭曲而线性漂移,顺时针扭曲时谐振波长‘红’移,而逆时针扭曲时谐振波长‘蓝’移;4) 谐振波长随横向负载线性漂移,

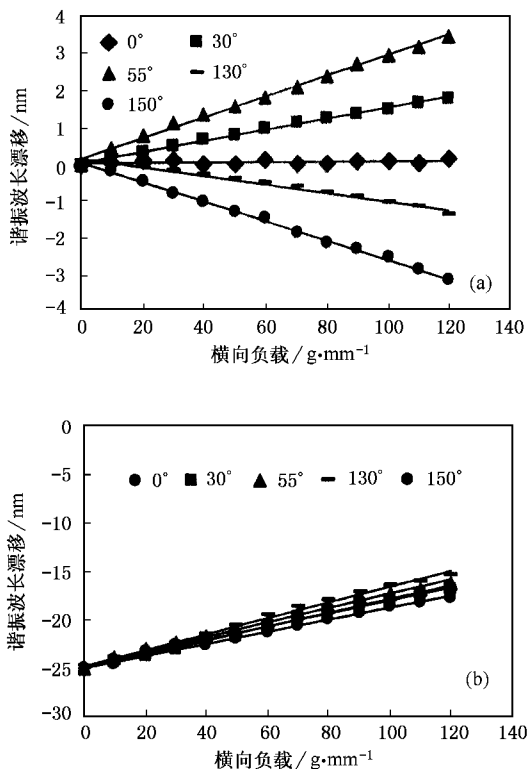


图 10 LPFG 在圆周  $0^\circ, 30^\circ, 55^\circ, 130^\circ$  和  $150^\circ$  方向负载时 (a) 谐振波长 (b) 谐振峰幅值与横向负载的关系

其灵敏度具有很强的方向相关性,分别有一个‘红’移和‘蓝’移最敏感的方向,且对两个特定方向的横向负载不敏感,但谐振峰幅值的负载灵敏度的方向相关性较弱,且随着负载量的增加而线性减小.根据这些独特的特性,本文提出了其在应力、温度、弯曲、扭曲和横向负载测量中的应用.这些传感器具有方法简单易行、成本低、体积小、能埋入工程结构的优点,可实现对工程结构的实时监控,因此有望在光纤传感领域获得重要应用.随着研究的深入,这种新型 LPFG 表现出来的独特特性必将在光纤传感和通信领域中有着更加广泛的应用.

[ 1 ] Huang S L , Chen W M and Bennett K D 1998 *Proc. SPIE* **3555** 266  
 [ 2 ] Rao Y J , Zeng X K , Zhu Y , Wang Y P , Zhu T , Ran Z L , Zhang L and Ian B 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 643  
 [ 3 ] Bhatia V and Vengsarkar A M 1996 *Opt. Lett.* **21** 692  
 [ 4 ] MacDougall T W , Pilevar S , Haggans C W and Jackson M A 1998 *IEEE Photonics Technology Lett.* **10** 1449

[ 5 ] Rao Y J , Wang Y P , Ran Z L , Zhu T and Yu B M 1998 *Proc. SPIE* **4581** 327  
 [ 6 ] Davis D D , Gaylord T K , Glytsis E N , Konsinski S G , Mettler S C and Vengsarkar A M 1998 *Electron. Lett.* **34** 302  
 [ 7 ] VanWiggeren G D , Gaylord T K , Davis D D , Anemogiannis E , Garrett B D , Braiwish M I and Glytsis E N 2000 *Electron. Lett.* **36** 1354

- [ 8 ] VanWiggeren G D , Gaylord T K , Davis D D , Braiwich M I , Glytsis E N and Anemogiannis E 2001 *Optics Lett.* **26** 61
- [ 9 ] Xu X H and Cui Y P 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 96 ( in Chinese ) 徐新华、崔一平 2003 *物理学报* **52** 96 ]
- [ 10 ] Wang Y P , Rao Y J , Ran Z L , Zhu T and Zeng X K 2002 *Proc. SPIE* **4920** 87
- [ 11 ] Lin C Y , Wang L A and Chem G W 2001 *J. of. Lightwave Tech.* **19** 1159
- [ 12 ] Wang Y P , Rao Y J , Hu A Z , Zeng X K , Ran Z L and Zhu T 2002 *the 15th Optical Fibre Sensors Conference , Technical Digest* 147
- [ 13 ] Rao Y J , Wang Y P , Zhu T , Ran Z L and Zeng X K 2002 *Proc. SPIE* **4920** ( in press )

## Unique characteristics of long-period fibre gratings fabricated by high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses \*

Wang Yi-Ping Rao Yun-Jiang Ran Zeng-Ling Zhu Tao

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

( Received 21 August 2002 ; revised manuscript received 29 September 2002 )

### Abstract

In this paper , we report novel long-period fibre gratings ( LPFGs ) written by focused high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses . A number of unique characteristics of such a LPFG , such as strain , temperature , bend , torsion and transverse-load , etc . , are observed by experiment , for the first time to our knowledge . These unique features are mainly due to the asymmetrical distribution of the refractive index on the cross section of the LPFG induced by high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses . Based on these unique characteristics , we have proposed a novel bend-insensitive LPFG sensor that could solve the problem of cross-sensitivity between bend and other measurements , a novel torsion sensor that can realize absolute measurement of twist rate and a load sensor that can achieve simultaneous measurement of transverse load and temperature using a single LPFG element .

**Keywords** : long-period fiber grating , optical fiber sensor , strain sensor , temperature sensor , bend sensor , torsion sensor , load sensor

**PACC** : 4281W , 4281C , 4281B

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China under the Outstanding Young Scientist Program ( Grant No. 60025515 ) .